



“Análisis de colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros”

Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro y Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

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

Ing. Msc. Iza Tobar, Henry Heriberto

2 de noviembre del 2022

Reporte de Verificación de Contenido



Chuquimarca Bryan_Guashpa Daniel_Trabajo de Titulació...

Scanned on: 3:35 November 2, 2022 UTC



Ing. Henry H. Gu Tolon



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	96
Words with Minor Changes	46
Paraphrased Words	126
Omitted Words	0





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Automotriz
Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Análisis de colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros"** fue realizado por los señores **Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro y Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 02 de noviembre del 2022

Ing. Iza Tobar, Henry Heriberto Mgs.

C. C.: 0502005242



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Automotriz
Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro y Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro**, con cédulas de ciudadanía n° 1726513466 y 1753937364, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis de colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 02 de noviembre del 2022


.....
Sr. Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro
C.C: 1726513466


.....
Sr. Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro
C.C: 1753937364



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Automotriz
Autorización de Publicación

Nosotros **Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro y Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro**, con cédulas de ciudadanía n° 1726513466 y 1753937364 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis de colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 02 de noviembre del 2022

.....
Sr. Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro
C.C: 1726513466

.....
Sr. Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro
C.C: 1753937364

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por su acompañamiento, protección y bendición a lo largo de mi vida.

Con todo el corazón a mis padres Edison y Rocio, por su inmenso amor, apoyo incondicional y esfuerzo para poder brindarme la educación.

A mis hermanos Jennifer, Johana y Edison por ser mi fuente de inspiración para seguir adelante.

A mi compañera de vida Nathaly, por su amor, bondad y apoyo en los buenos y malos momentos de mi vida.

A mi amigo Daniel por su amistad y compañerismo brindado en el transcurso de la carrera.

Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro

A mi madre María Juana Bonilla quien ha sido mi motivación para seguir adelante, mi padre Alejandro Guashpa, hermanos y hermanas.

Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro

Agradecimiento

A Dios, mis padres por permitirme culminar esta etapa de mi vida y a la universidad de la Fuerzas Armadas ESPE por abrirme sus puertas.

Al ingeniero Henry Iza por su amistad y su voluntad para culminar este trabajo.

Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro

A Dios que me ha brindado salud y sabiduría para seguir firme día a día, a mi madre que desde el cielo me ha acompañado con su bendición y a mi familia que ha estado presente siempre, en especial a mi padre por todo su apoyo.

Al Ing. Henry Iza, Bryan Chuquimarca, ESPE-L Carrera de Ingeniería Automotriz, y todos aquellos amigos y compañeros que me han brindado su tiempo, apoyo, amistad y conocimiento durante las etapas de formación y desarrollo de este proyecto.

Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro

Tabla de Contenido

Carátula	1
Reporte de Verificación de Contenido.....	2
Certificado	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de Contenido.....	8
Índice de Ecuaciones.....	18
Índice de Tablas	19
Índice de Figuras	24
Resumen.....	29
Abstract	30
Capítulo I: Generalidades	31
Antecedentes Investigativos	31
Planteamiento del Problema.....	38

Descripción Detallada del Proyecto	40
Justificación e Importancia	46
Objetivos del Proyecto.....	49
<i>Objetivo Principal</i>	49
<i>Objetivos Específicos</i>	50
Metas	50
Hipótesis	51
Variables de Investigación.....	51
<i>Variable Independiente</i>	51
<i>Variable Dependiente</i>	53
Capítulo II: Marco Teórico	55
Programas CAE MEF Explícitos	55
<i>ANSYS LS-DYNA</i>	56
<i>Historia de LS-DYNA</i>	56
<i>Uso de LS-DYNA</i>	57
Tipos de Pruebas y Valoraciones.....	59
<i>Protocolo Euro NCAP</i>	59

	10
<i>Protocolo Latin NCAP</i>	61
<i>Reglamentación UNECE</i>	62
<i>Reglamentación FMVSS</i>	63
Maniquís de Pruebas de Impacto	64
<i>Historia de Maniquís</i>	64
<i>Tamaños Percentiles</i>	65
<i>Maniquís para Impactos</i>	66
<i>Acelerómetros</i>	67
<i>Índice de Lesiones de Maniquís</i>	68
Sistemas y Equipos de Airbag	68
<i>Airbags Frontales</i>	68
<i>Airbags Laterales</i>	69
<i>Airbags en la Actualidad</i>	70
<i>Materiales de Airbags</i>	71
<i>Textiles en Airbags</i>	71
Cinturones de Seguridad	72
<i>Tipos de Cinturones de Seguridad</i>	73

<i>Mecanismos de Seguridad</i>	73
Materiales Estructurales de los Vehículos	74
<i>Propiedades Mecánicas</i>	75
<i>Módulo de Elasticidad contra Densidad</i>	76
<i>Resistencia contra Densidad</i>	77
<i>Coefficiente de Poisson</i>	78
La Biomecánica del Impacto	79
<i>Aplicación de la Mecánica Clásica en Huesos</i>	80
<i>Gravedad de Lesión Anatómica</i>	82
Capítulo III: Metodología de Simulación Explícita en Colisiones	84
Validación del Software	85
<i>Validación Analítica</i>	86
<i>Validación mediante Software</i>	88
Modelado 3D con Programa CAD	90
<i>Selección del Vehículo Base</i>	90
Características del Primer Modelo	92
Características del Segundo Modelo	92

Características del Tercer Modelo.....	93
Características del Modelo Base.....	94
<i>Modelado del Vehículo Tipo SUV.....</i>	<i>95</i>
Preparación del Modelo	97
Creación de la malla FEM	100
<i>Generación de la Malla de Elementos Finitos.....</i>	<i>100</i>
<i>Preparación de la Malla de Elementos Finitos.....</i>	<i>101</i>
<i>Control de Calidad de la Malla de Elementos Finitos.....</i>	<i>103</i>
Designación de Materiales y Secciones al Vehículo Base	105
<i>Material Elástico.....</i>	<i>106</i>
<i>Material de Plasticidad Lineal Por Partes.....</i>	<i>106</i>
<i>Material Lineal Plástico Modificado.....</i>	<i>107</i>
<i>Secciones de los Componentes</i>	<i>108</i>
<i>Asignación de Materiales</i>	<i>109</i>
Unión entre Componentes.....	112
Peso Neto Vehicular del Modelo	113
Dummis para Ensayos	113

<i>Dummy Fast Híbrido III 50 Percentil</i>	113
<i>Dummy Fast Híbrido III 05 Percentil</i>	114
<i>Ubicación de Dummies</i>	115
Contactos de Superficie.....	117
<i>Contacto de Superficie Simple</i>	117
<i>Contacto entre Dos Superficies</i>	118
Cinturones de Seguridad	119
<i>Nodos para el Cinturón de Seguridad de Tres Puntos</i>	119
<i>Generación del Cinturón de Seguridad</i>	119
<i>Unión del Cinturón de Seguridad de Tres Puntos al Bastidor Estructural</i>	122
<i>Asignación de Material</i>	124
Airbags.....	125
<i>Airbag Frontal</i>	125
<i>Airbag Lateral</i>	125
<i>Ubicación de Airbag en el Vehículo Tipo SUV</i>	126
Procesamiento de la Simulación.....	127
<i>Colisión Frontal</i>	127

Bloque Impactador.....	127
Posición para el Ensayo.	128
Condiciones del Protocolo.	129
<i>Colisión Lateral.....</i>	<i>132</i>
Barrera Móvil Deformable.	132
Posición para el Ensayo.	133
Condiciones del Protocolo.	135
<i>Vuelco.....</i>	<i>137</i>
Trineo de Impulso.....	137
Posición para el Ensayo.	138
Condiciones del Protocolo.	139
Capítulo IV: Análisis de Resultados de la Biomecánica de Maniquís	142
Criterios de Evaluación.....	142
Partes Biomecánicas de Análisis.....	142
Colisión Frontal con 40% de Traslape	143
<i>Criterio de Lesión en la Cabeza HIC.....</i>	<i>148</i>
<i>Criterio de Lesión del Cuello NIC.....</i>	<i>151</i>

Fuerza de Corte y Tracción.....	151
Momento de Flexión.....	153
<i>Compresión del Tórax ThCC.....</i>	<i>154</i>
<i>Fuerza del Fémur FFC</i>	<i>155</i>
<i>Comportamiento de la Tibia.....</i>	<i>156</i>
Fuerza de Compresión.....	157
Momento de Flexión.....	159
Índice de Lesión TI.....	161
<i>Movimiento de las Articulaciones en las Rodillas.....</i>	<i>161</i>
Colisión Lateral con Barrera Deformable Móvil	163
<i>Criterio de Lesión en la Cabeza HIC.....</i>	<i>170</i>
<i>Compresión del Tórax ThCC.....</i>	<i>172</i>
<i>Fuerza sobre la Pelvis PSPF</i>	<i>173</i>
<i>Fuerza sobre el Abdomen APF</i>	<i>175</i>
Vuelco	176
<i>Criterio de Lesión en la Cabeza HIC.....</i>	<i>180</i>
<i>Criterio de Lesión del Cuello NIC.....</i>	<i>182</i>

Fuerza de Tracción y Corte.....	182
Momento de Flexión.....	184
<i>Compresión del Tórax ThCC.....</i>	<i>185</i>
<i>Fuerza del Fémur FFC</i>	<i>186</i>
<i>Comportamiento de la Tibia.....</i>	<i>187</i>
Fuerza de Compresión.....	187
Momento de Flexión.....	188
Índice de Lesión TI.....	190
<i>Movimiento de las Articulaciones en las Rodillas.....</i>	<i>190</i>
<i>Fuerza sobre la Pelvis PSPF</i>	<i>191</i>
<i>Fuerza sobre el Abdomen APF</i>	<i>192</i>
Comparación de los Criterios según la Regulación y Tipo de Colisión.....	193
<i>Colisión Frontal con 40% de Traslape.....</i>	<i>194</i>
<i>Colisión Lateral con Barrera Deformable Móvil.....</i>	<i>194</i>
<i>Vuelco.....</i>	<i>195</i>
Gravedad de lesión	196
<i>Colisión Frontal con 40% de Traslape.....</i>	<i>197</i>

<i>Colisión Lateral con Barrera Deformable Móvil</i>	202
<i>Vuelco</i>	204
Capítulo V: Marco Administrativo	209
Recursos	209
<i>Recursos Humanos</i>	209
<i>Recursos Tecnológicos</i>	209
Presupuesto	210
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones	211
Conclusiones	211
Recomendaciones	214
Bibliografía	215
Anexos	222

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 <i>Deflexión estática</i>	86
Ecuación 2 <i>Coeficiente dinámico</i>	87
Ecuación 3 <i>Deflexión dinámica</i>	87
Ecuación 4 <i>Criterio de lesión de la cabeza</i>	149
Ecuación 5 <i>Índice de la tibia</i>	156
Ecuación 6 <i>Momento de flexión resultante</i>	157

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Partes estructurales por modelar del vehículo base</i>	41
Tabla 2 <i>Designación de materiales para los componentes del vehículo base</i>	43
Tabla 3 <i>Parámetros de simulación para los ensayos de colisión</i>	45
Tabla 4 <i>Variable independiente</i>	52
Tabla 5 <i>Variable dependiente</i>	53
Tabla 6 <i>Especificación de la variable dependiente</i>	53
Tabla 7 <i>Historia de LS – DYNA</i>	57
Tabla 8 <i>Detalles de los protocolos Euro NCAP</i>	60
Tabla 9 <i>Detalles de los protocolos Latin NCAP</i>	61
Tabla 10 <i>Evolución de los maniqués de pruebas de impacto</i>	64
Tabla 11 <i>Tipos de maniqués para impactos</i>	66
Tabla 12 <i>Tipos de airbags en la actualidad</i>	70
Tabla 13 <i>Tipos de tejidos textiles en airbags</i>	71
Tabla 14 <i>Reducción de lesiones por el uso de cinturón de seguridad</i>	72
Tabla 15 <i>Propiedades mecánicas de los materiales</i>	75
Tabla 16 <i>Código de gravedad del AIS</i>	82

Tabla 17 <i>Características del tubo de acero estructural</i>	85
Tabla 18 <i>Características del impactador</i>	85
Tabla 19 <i>Deflexión estática</i>	87
Tabla 20 <i>Coefficiente dinámico</i>	87
Tabla 21 <i>Deflexión dinámica</i>	88
Tabla 22 <i>Segmentos tipo SUV</i>	91
Tabla 23 <i>Características del primer modelo</i>	92
Tabla 24 <i>Características del segundo modelo</i>	93
Tabla 25 <i>Características del tercer modelo</i>	94
Tabla 26 <i>Características del modelo base</i>	95
Tabla 27 <i>Asignación de materiales a los componentes del vehículo</i>	109
Tabla 28 <i>Asignación de material a los cinturones de seguridad</i>	124
Tabla 29 <i>Propiedades mecánicas del airbag frontal</i>	125
Tabla 30 <i>Propiedades mecánicas del airbag lateral</i>	126
Tabla 31 <i>Condiciones para colisión frontal</i>	130
Tabla 32 <i>Condiciones para colisión lateral</i>	135
Tabla 33 <i>Condiciones para vuelco</i>	139

Tabla 34 <i>Nodos y juntas para medición</i>	142
Tabla 35 <i>Simulación de colisión frontal sin seguridad pasiva</i>	143
Tabla 36 <i>Simulación de colisión frontal con seguridad pasiva</i>	146
Tabla 37 <i>Criterio HIC36-colisión frontal</i>	149
Tabla 38 <i>Criterio HIC15-colisión frontal</i>	150
Tabla 39 <i>Criterio NIC, fuerza de corte y tracción-colisión frontal</i>	152
Tabla 40 <i>Criterio NIC, momento de flexión-colisión frontal</i>	153
Tabla 41 <i>Criterio ThCC-colisión frontal</i>	154
Tabla 42 <i>Criterio FFC-colisión frontal</i>	155
Tabla 43 <i>Criterio TCFC, fuerza de compresión axial-colisión frontal</i>	158
Tabla 44 <i>Criterio TCFC, momento de flexión-colisión frontal</i>	160
Tabla 45 <i>Índice de lesión TI para colisión frontal</i>	161
Tabla 46 <i>Criterio del movimiento de las articulaciones en la rodilla</i>	162
Tabla 47 <i>Simulación de colisión lateral sin seguridad pasiva</i>	163
Tabla 48 <i>Simulación de colisión lateral con seguridad pasiva</i>	167
Tabla 49 <i>Criterio HIC36-colisión lateral</i>	171
Tabla 50 <i>Criterio Hic15-colisión lateral</i>	172

Tabla 51 <i>Criterio ThCC-colisión lateral</i>	173
Tabla 52 <i>Criterio de fuerzas sobre la pelvis-colisión lateral</i>	174
Tabla 53 <i>Criterio de fuerzas sobre el abdomen-colisión lateral</i>	175
Tabla 54 <i>Simulación de vuelco sin seguridad pasiva</i>	176
Tabla 55 <i>Simulación de vuelco con seguridad pasiva</i>	178
Tabla 56 <i>Criterio HIC36-vuelco</i>	180
Tabla 57 <i>Criterio HIC15-vuelco</i>	181
Tabla 58 <i>Criterio NIC, fuerza de corte y tracción-vuelco</i>	183
Tabla 59 <i>Criterio NIC, momento de flexión-vuelco</i>	184
Tabla 60 <i>Criterio ThCC-vuelco</i>	185
Tabla 61 <i>Criterio FFC-vuelco</i>	186
Tabla 62 <i>Criterio TCFC, fuerza de compresión axial-vuelco</i>	187
Tabla 63 <i>Criterio TCFC, momento de flexión-vuelco</i>	189
Tabla 64 <i>Índice TI para vuelco</i>	190
Tabla 65 <i>Criterio del movimiento de las articulaciones en la rodilla</i>	190
Tabla 66 <i>Criterio de la fuerza sobre la pelvis-vuelco</i>	192
Tabla 67 <i>Criterio de la fuerza sobre el abdomen-vuelco</i>	193

Tabla 68 <i>Valores obtenidos en los criterios de lesión-colisión frontal</i>	194
Tabla 69 <i>Valores obtenidos en los criterios de lesión-colisión lateral</i>	195
Tabla 70 <i>Valores obtenidos en los criterios de lesión-vuelco</i>	195
Tabla 71 <i>Lesiones comunes de la anatomía corporal</i>	196
Tabla 72 <i>Gravedad de lesión en colisión frontal sin seguridad</i>	197
Tabla 73 <i>Gravedad de lesión en colisión frontal con seguridad</i>	200
Tabla 74 <i>Gravedad de lesión en colisión lateral sin seguridad</i>	202
Tabla 75 <i>Gravedad de lesión en colisión lateral con seguridad</i>	203
Tabla 76 <i>Gravedad de lesión en vuelco sin seguridad</i>	205
Tabla 77 <i>Gravedad de lesión en vuelco con seguridad</i>	207
Tabla 78 <i>Recursos humanos</i>	209
Tabla 79 <i>Recursos tecnológicos</i>	210
Tabla 80 <i>Presupuesto</i>	210

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Defunciones notificadas por categoría y regiones.</i>	32
Figura 2 <i>Causas de la siniestralidad en Ecuador 2021.</i>	33
Figura 3 <i>Planteamiento del problema.</i>	39
Figura 4 <i>Fases de la descripción detallada</i>	40
Figura 5 <i>Impacto frontal con barrera deformable Euro NCAP real y simulada.</i>	48
Figura 6 <i>Aceleraciones asiento trasero izquierdo y derecho en prueba y simulación</i>	49
Figura 7 <i>Software de simulación explícita aplicado en la industria automotriz.</i>	55
Figura 8 <i>Colisión de cabeza ficticia con airbag utilizando LS – DYNA.</i>	59
Figura 9 <i>Regulación de vuelco según la FMVSS 208.</i>	63
Figura 10 <i>Curva de distribución normal.</i>	65
Figura 11 <i>Tamaños percentiles del cuerpo humano.</i>	66
Figura 12 <i>Aceleración principal durante una prueba de impacto</i>	67
Figura 13 <i>Índices de lesiones según la ONU/CEPE y Euro NCAP</i>	68
Figura 14 <i>Airbag frontal.</i>	69
Figura 15 <i>Airbag lateral.</i>	70
Figura 16 <i>Pretensores y retractores en asientos de seguridad.</i>	74

	25
Figura 17 <i>Material estructural de la carrocería autoportante</i>	75
Figura 18 <i>Relación del módulo de elasticidad con la densidad</i>	77
Figura 19 <i>Relación de la resistencia y densidad en materiales</i>	78
Figura 20 <i>Coefficiente de Poisson</i>	79
Figura 21 <i>Fuerzas que se someten en un hueso</i>	80
Figura 22 <i>Propiedades mecánicas del hueso en la normalización</i>	81
Figura 23 <i>Probabilidad de supervivencia según valores AIS</i>	83
Figura 24 <i>Procedimiento de la simulación explícita</i>	84
Figura 25 <i>Representación del impacto en caída libre</i>	86
Figura 26 <i>Componentes mallados en Ls PrePost</i>	88
Figura 27 <i>Resultados del impacto simulado</i>	89
Figura 28 <i>Deflexión máxima mediante simulación</i>	90
Figura 29 <i>Venta acumulativa de vehículos de enero-abril 2022</i>	91
Figura 30 <i>Croquis base del modelo de vehículo tipo SUV</i>	96
Figura 31 <i>Modelado del vehículo tipo SUV</i>	96
Figura 32 <i>Dimensiones del modelado del vehículo</i>	97
Figura 33 <i>Importación del modelo en el software de preprocesamiento</i>	98

Figura 34 Carta de control TOPO.....	99
Figura 35 Operación Fuse – Project.....	99
Figura 36 Distancia entre nodos de la malla.....	100
Figura 37 Malla completa del vehículo tipo SUV	101
Figura 38 Distancia aproximada entre nodos	102
Figura 39 Administrador de las cartas de control.....	102
Figura 40 Inspección de nodos duplicados.....	103
Figura 41 Evaluación del índice de Jacobiano-correcto.....	104
Figura 42 Malla preprocesada completa.....	105
Figura 43 MAT_001 Elastic	106
Figura 44 MAT_024 Piecewise Linear Plasticity.....	107
Figura 45 MAT_123 Modified Piecewise Linear Plasticity.....	108
Figura 46 Carta de control para secciones tipo superficie	109
Figura 47 Ubicación de NODAL_RIGID_BODY.....	112
Figura 48 Peso neto vehicular del modelo.....	113
Figura 49 Dummy rápido H-III 50 percentil	114
Figura 50 Dummy rápido H-III 05 percentil	114

Figura 51 <i>Herramienta para posicionar el Dummy</i>	115
Figura 52 <i>Posición de los modelos en el vehículo</i>	116
Figura 53 <i>Carta de control CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE</i>	117
Figura 54 <i>Carta de control CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE</i>	118
Figura 55 <i>Ubicación de nodos para la generación del cinturón de seguridad</i>	119
Figura 56 <i>Trayectoria para la generación del cinturón de seguridad superior</i>	120
Figura 57 <i>Generación del cinturón de seguridad superior</i>	121
Figura 58 <i>Generación del cinturón de seguridad de tres puntos</i>	122
Figura 59 <i>Eliminación de elementos tipo "SEATBEALT"</i>	123
Figura 60 <i>Unión del cinturón de seguridad de tres puntos al bastidor estructural</i>	124
Figura 61 <i>Ubicación de airbags frontales y airbag lateral</i>	127
Figura 62 <i>Bloque principal de impacto</i>	128
Figura 63 <i>Propiedades del material aluminio 3003</i>	128
Figura 64 <i>Alineación del vehículo respecto al bloque principal de impacto</i>	129
Figura 65 <i>Ubicación del bloque principal de impacto respecto al piso</i>	129
Figura 66 <i>Vehículo tipo SUV sin elementos de seguridad pasiva-colisión frontal</i>	131
Figura 67 <i>Vehículo tipo SUV con elementos de seguridad pasiva-colisión frontal</i>	131

Figura 68 <i>Barrera deformable móvil según norma N°95 de la CEPE</i>	132
Figura 69 <i>Impactador de acuerdo a las especificaciones del reglamento N° 95 CEPE</i>	133
Figura 70 <i>Posición del auto impactador en el plano medio</i>	134
Figura 71 <i>Posición vertical del carro impactador</i>	134
Figura 72 <i>Vehículo tipo SUV sin elementos de seguridad pasiva-colisión lateral</i>	136
Figura 73 <i>Vehículo tipo SUV con elementos de seguridad pasiva-colisión lateral</i>	136
Figura 74 <i>Dimensiones principales del trineo</i>	137
Figura 75 <i>Representación del trineo para el ensayo de vuelco</i>	138
Figura 76 <i>Posicionamiento del vehículo tipo SUV en el trineo</i>	138
Figura 77 <i>Vehículo tipo SUV sin elementos de seguridad pasiva</i>	140
Figura 78 <i>Vehículo tipo SUV con elementos de seguridad pasiva</i>	141

Resumen

En esta investigación se detalla el análisis de colisiones: frontal con 40% de traslape , lateral con barrera móvil deformable y vuelco mediante trineo deslizante, para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva como: cinturones de seguridad de tres puntos, airbag lateral y frontal para el estudio biomecánico de los dummies rápidos HIII 50 y 05 percentil, el modelado 3D del vehículo se realizó en software CAD, considerando componentes simplificados que aporten resistencia estructural durante una colisión. El preprocesamiento se basa en el control de la calidad de malla con índice Jacobiano de 0.3 para elementos tipo superficie cuadráticos y triangulares, asignación de materiales y secciones en referencia a vehículos homologados por la NHTSA, condiciones de frontera en función de los protocolos de evaluación CEPE/ONU R94 y R95, Latin NCAP y FMVSS 208, así como parámetros físicos asignados mediante el software *Ls Pre Post*. El procesamiento se desarrolló en *LS Dyna* (CEND INGENIERÍA S.A) para un tiempo de 200 ms para colisión frontal y lateral, mientras que para vuelco un tiempo de 1500 ms. En el posprocesamiento se analizó índices de lesiones establecidos en los protocolos de ensayo con referencia a una escala de gravedad AIS entre 1 y 6. En síntesis, se observa una gran disminución de lesiones al usar componentes de seguridad, la mayoría de criterios dentro del rendimiento mínimo con una gravedad máxima AIS3 y el 90% de supervivencia, no obstante, la colisión frontal representa mayor daño de lesiones anatómicas, centrado en el criterio HIC36 de 1262 y 838 así como HIC15 de 792.1 y 759.4 para los dummies HIII 50 y 05 percentil respectivamente, para una gravedad máxima AIS \geq 4 con riesgo de pérdida vital. Mientras que en las colisiones lateral y vuelco las lesiones disminuyen considerablemente entre ambas condiciones dentro del rendimiento mínimo y máximo.

Palabras clave: Elementos finitos, Categoría M1, Colisión, Biomecánica, Gravedad de lesiones.

Abstract

This research details the analysis of collisions: frontal with 40% overlap, lateral with deformable mobile barrier and rollover by means of sliding sled, for a M1 SUV category vehicle by FEM through explicit methodology with the implementation of passive safety components such as: three-point seat belts, side and frontal airbag for the biomechanical study of fast dummies HIII 50 and 05 percentile, the 3D modeling of the vehicle was performed in CAD software, considering simplified components that provide structural strength during a collision. The preprocessing is based on mesh quality control with Jacobian index of 0.3 for quadratic and triangular surface type elements, assignment of materials and sections in reference to NHTSA approved vehicles, boundary conditions based on UN/ECE R94 and R95, Latin NCAP and FMVSS 208 evaluation protocols, as well as physical parameters assigned using Ls Pre Post software. The processing was developed in LS Dyna (CEND INGENIERÍA S.A) for a time of 200 ms for frontal and lateral collision, while for rollover a time of 1500 ms. In the post-processing, injury rates established in the test protocols were analyzed with reference to an AIS severity scale between 1 and 6. In summary, a large decrease of injuries is observed when using safety components, most criteria within the minimum performance with a maximum severity AIS3 and 90% survival, however, the frontal collision represents greater damage of anatomical injuries, centered on the HIC36 criteria of 1262 and 838 as well as HIC15 of 792.1 and 759.4 for dummies HIII 50 and 05 percentile respectively, for a maximum severity AIS \geq 4 with risk of vital loss. While in side and rollover collisions the injuries decrease considerably between both conditions within the minimum and maximum performance.

Keywords: Finite Element, Category M1, Collision, Biomechanics, Injury severity.

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes Investigativos

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2009) establece que los que traumatismos generados por accidentes de tránsito constituyen un inconveniente de salud y desarrollo que presenta consecuencias en la vida humana como defunción, discapacidad y secuelas, con afección principalmente a jóvenes con edades entre 15 y 29 años.

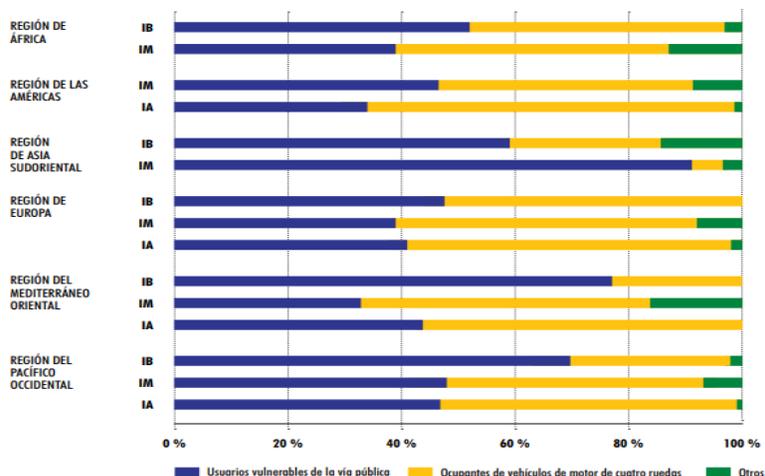
La situación es crítica en cuanto al número de accidentes viales donde se afirma que “más de 1.2 millones de personas fallecen como consecuencia de accidentes en las vías de tránsito y nada menos que otros 50 millones sufren traumatismos no mortales generando lesiones e incapacidad” (OMS, 2009, p. 5).

La OMS (2009) indica que la causa principal de generación de accidentes se debe a vehículos inseguros y no reglamentados en cuanto al uso correcto y necesario de los equipos de seguridad pasiva, así como también la falta de cumplimiento de normativas y ensayos internacionales.

En la figura 1 se muestra las defunciones por regiones, emitidas porcentualmente por la OMS relacionado a la seguridad vial.

Figura 1

Defunciones notificadas por categoría y regiones.



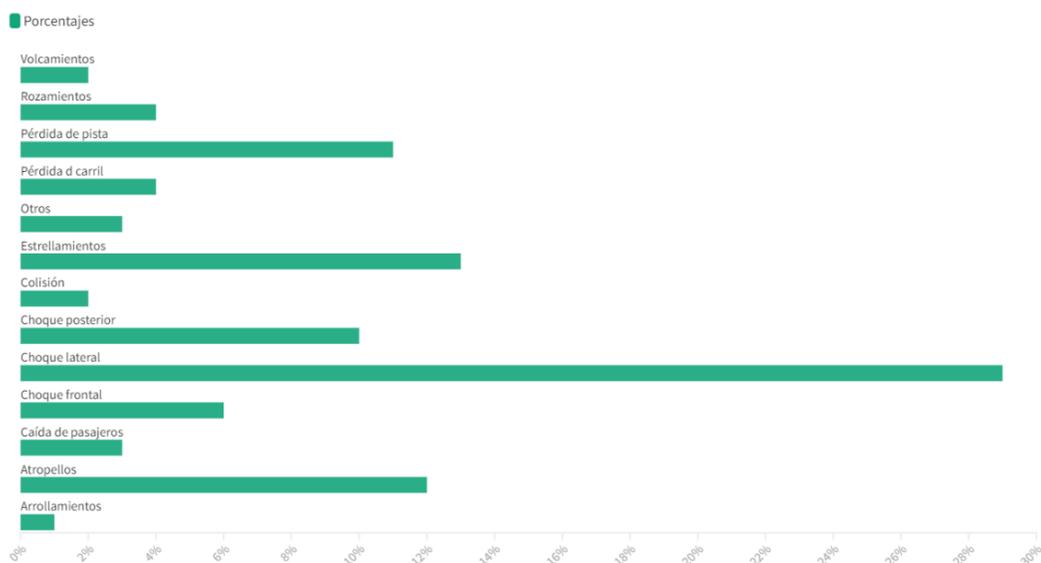
Nota. La figura indica los resultados de las defunciones, la segunda incidencia con mayor porcentaje se encuentra en los ocupantes de vehículos con cuatro ruedas. Tomado de *Defunciones Notificadas por Categoría de Usuario de la Vía Pública (%)*, por Regiones de la OMS y Grupos de Ingresos (p.15), por OMS, 2009.

En Ecuador, según el Ministerio de Gobierno (s.f.) en la Agencia Nacional de Tránsito ANT, se señala una media anual de 33 fallecimientos por cada 100 mil habitantes, producto de accidentes de tránsito, por consiguiente, se ubica al país con una elevada tasa de mortalidad a nivel de Latinoamérica.

Según Menéndez (2022) de acuerdo al último reporte de la ANT del año 2021, se ha originado 19 337 accidentes de tránsito con la pérdida de 1 888 vidas humanas, por volcamiento 2%, colisión total 2%, choque posterior 10%, choque lateral 29%, choque frontal 6%, estrellamientos 13%, entre otros como: rozamientos, pérdida de pista, caída de pasajeros, atropellos y arrollamientos. En la figura 2 se muestra las principales causas de siniestralidad y porcentajes correspondientes.

Figura 2

Causas de la siniestralidad en Ecuador 2021



Nota. La principal causa de muerte en el año 2021 es originada por el choque lateral con 29% del total, con alrededor de 19 337 defunciones. Tomado de *Causas de la Siniestralidad en el Ecuador*, por Agencia Nacional de Tránsito, 2021.

La Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas, mediante el reglamento N°94, establece las prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal con aplicación en los vehículos de la categoría M1, cuya masa total admisible no supera las 2,5 toneladas; podrán homologarse otros vehículos a petición del fabricante (Diario Oficial de la Unión Europea, 2012).

La Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas, mediante el reglamento N°95, establece prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral de la estructura del

habitáculo de los vehículos de motor en las categorías M1 y N1 (Diario Oficial de la Unión Europea, 2015).

Según Vázquez et al. (2020) la reglamentación de los Estados Unidos de América (EUA) define estándares federales de seguridad para los vehículos de motor, con la especificación de los ensayos y certificación del vuelco dinámico FMVSS 208, a cualquiera de los lados del vehículo sobre una estructura deslizante.

La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE, s.f.) proporciona estándares y documentos técnicos para profesionales de ingeniería, con directrices y referencias a la interacción y evaluación de los pasajeros ante impacto frontal, lateral, y posterior en función de la clasificación de deformación por colisión y tipo de material, con el objetivo de realizar una cuantificación sistemática de la interacción, basada en pruebas de colisión con barrera rígida móvil y rígida fija. Tiene como propósito estudiar la estructura del vehículo y reducir el riesgo de lesión de los ocupantes, en base a maniqués calibrados bajo reglamento técnico.

En Ecuador según refiere el Servicio Ecuatoriano de Normalización (2016) mediante el Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 034 y la Subsecretaría del Sistema de la Calidad de la Productividad, que los vehículos automotores deben disponer de la protección necesaria para impactos frontal y lateral con elementos mínimos de seguridad, en función de la reglamentación técnica N°94 y N°95 de la ONU/CEPE.

Según Vázquez et al. (2017) en la actualidad la Euro NCAP, se encarga de mantener una filosofía enfocada en que se autoricen y comercialicen autos seguros y confiables tanto para usuarios como para peatones en el caso eventual de choque o impacto, el espíritu de la Euro NCAP se centra específicamente en evaluar la seguridad de los autos comercializados en la “Comunidad Económica Europea” (CEU).

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos (s.f.) refiere que la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA), tiene por misión reducir muertes, lesiones y pérdidas económicas a consecuencia de accidentes automovilísticos, a partir de 1978 empezó con la calificación de vehículos contra impactos frontales mediante maniqués para prueba de choque, en 1996 se implementa el ensayo para colisión lateral, y a partir del año 2000 se incorpora el análisis de resistencia de los vehículos por el efecto de vuelco con simulación que represente el mundo real.

LATIN NCAP (s.f.) mediante protocolos y ensayos de laboratorio garantiza la integridad física de los ocupantes adultos e infantiles por medio de lecturas a partir de maniqués que se utilizan para evaluar la protección, ante colisión de impacto frontal con 40% *overlap* con barrera deformable descentrada, impacto lateral con barrera deformable, impacto lateral de poste y el latigazo cervical.

De acuerdo a Vázquez et al. (2020) actualmente existen nueve programas de evaluación de autos nuevos (NCAP), entre los más importantes están: US-NCAP, JNCAP, Euro NCAP, Latin NCAP, Asean NCAP, Global NCAP, entre otros, que se realizan por medio de instituciones independientes donde se llevan a cabo distintos ensayos a escala real con el fin de evaluar la seguridad de ocupantes y peatones, dichos ensayos se ejecutan en base a estrictos protocolos donde se pueden considerar: impactos frontales, impactos posteriores, impactos laterales y compresión de toldo, la finalidad de ejecutar estos ensayos se centra en la difusión de resultados a los consumidores, lo que incide en la comercialización de autos más seguros.

Con la invención del automóvil con motor de combustión interna a inicios de los años noventa y su rápida comercialización en todo el mundo, provocó que se convirtieran en herramientas indispensables para la población en corto plazo, y a medida que se volvieron

cada vez más populares, los accidentes de tránsito también empezaron a producirse, provocando lesiones y muertes en pasajeros y peatones, con lo que, ingenieros de la época cuestionaron la seguridad de los autos debido a este tipo de siniestros, por esta razón implementaron pruebas controladas de impactos de automóviles para ver la afectación que tenían las personas al producirse estos eventos. En un inicio para verificar los tipos de lesiones en pasajeros se realizó pruebas de choques de autos con cadáveres, voluntarios humanos y animales, lo cual provocó mucha controversia en técnicos automotrices y en la población en general, debido a que esto no era nada ético y viable, posteriormente se prohibió este tipo de tests.

De acuerdo a HUMANETICS (s.f.) a mediados de 1900 varios organismos y empresas como NHTSA, SAE, *Sierra Engineering Co.*, *General Motors*, *Humanetics*, entre otros investigaron el desarrollo de la construcción de maniqués de pruebas de impacto con el que se tendría un modelo humano que represente antropomórficamente su comportamiento y funcionamiento con el objetivo de medir lesiones en colisiones de aeronaves y automóviles, se generaron modelos según su orden cronológico como *Sierra Sam*, *VIP*, *Hybrid I*, *Hybrid II* en una primera instancia hasta finales de los sesenta. El Híbrido II era un maniqué de pruebas de impacto que medía las principales lesiones incluida los traumas de la cabeza y pecho, pero con el desarrollo de la industria automotriz se deseó implementar más sensores que midan lesiones en el cuello, tórax, piernas y otras lesiones para todas las edades, tamaños y formas, por esta razón en 1978 se genera el modelo *Hybrid III* que es actualmente el más utilizado en pruebas de colisiones automotrices para impacto frontal, en 1994 se integran los modelos infantiles.

En la actualidad existen organismos como SAE, NHTSA, Global NCAP, Toyota, Sierra Stand laboratorios, GM, entre otros que investigan el desarrollo de modelos de maniqués biomecánicos cada vez más robustos que puedan censar lesiones más complejas de predecir

en colisiones. Por medio de estas investigaciones se ha creado el maniquí THOR que es uno de los más avanzados en tecnología actualmente, con este maniquí se puede medir más lesiones en comparación que con el maniquí *Hybrid III*, con el modelo THOR se obtiene resultados de las velocidades angulares producidas en el cerebro con lo cual se calcula el criterio de lesión del cerebro BrIC que es uno de los criterios requeridos en pruebas de impacto oblicuo que serán implementadas para verificar la seguridad de automóviles por Euro NCAP en los próximos años.

Los maniqués de pruebas de impacto cuentan con sensores electrónicos como acelerómetros y potenciómetros que se encuentran distribuidos en zonas críticas del cuerpo que tienen el objetivo de medir o censar señales de fuerza Gs, desplazamientos, momentos y fuerzas, con estos datos obtenidos en la colisión se compara con valores o patrones estandarizados que se encuentran en las regulaciones que indican el tipo de lesión que se genera en el cuerpo humano.

El desarrollo de tecnologías referentes a ingeniería asistida por computadora CAE a permitido generar softwares cada vez más robustos y complejos que puedan simular eventos dinámicos de colisiones de automóviles con resultados que se encuentran enormemente validados con la meta de identificar lesiones en pasajeros.

Los impactos automotrices son eventos dinámicos de poca duración temporal esto quiere decir que duraran pocos milisegundos (500 milisegundo máx.) generando una gran cantidad de energía cinética y que por consecuencia producirá grandes deformaciones de los componentes del automotor, también los pasajeros experimentan elevadas fuerzas Gs producidas en la colisión. Para simular este tipo de dinámica de colisiones se necesita un software FEM robusto que utilice una **metodología explícita**; esto quiere decir que tenga la capacidad de calcular millones de ciclos de una manera estable con un bajo gasto

computacional y con una duración de microsegundos por cada ciclo, con lo cual se obtendrá resultados con alta precisión que es suficientemente detallada para verificar el comportamiento biomecánico y estructural de la colisión.

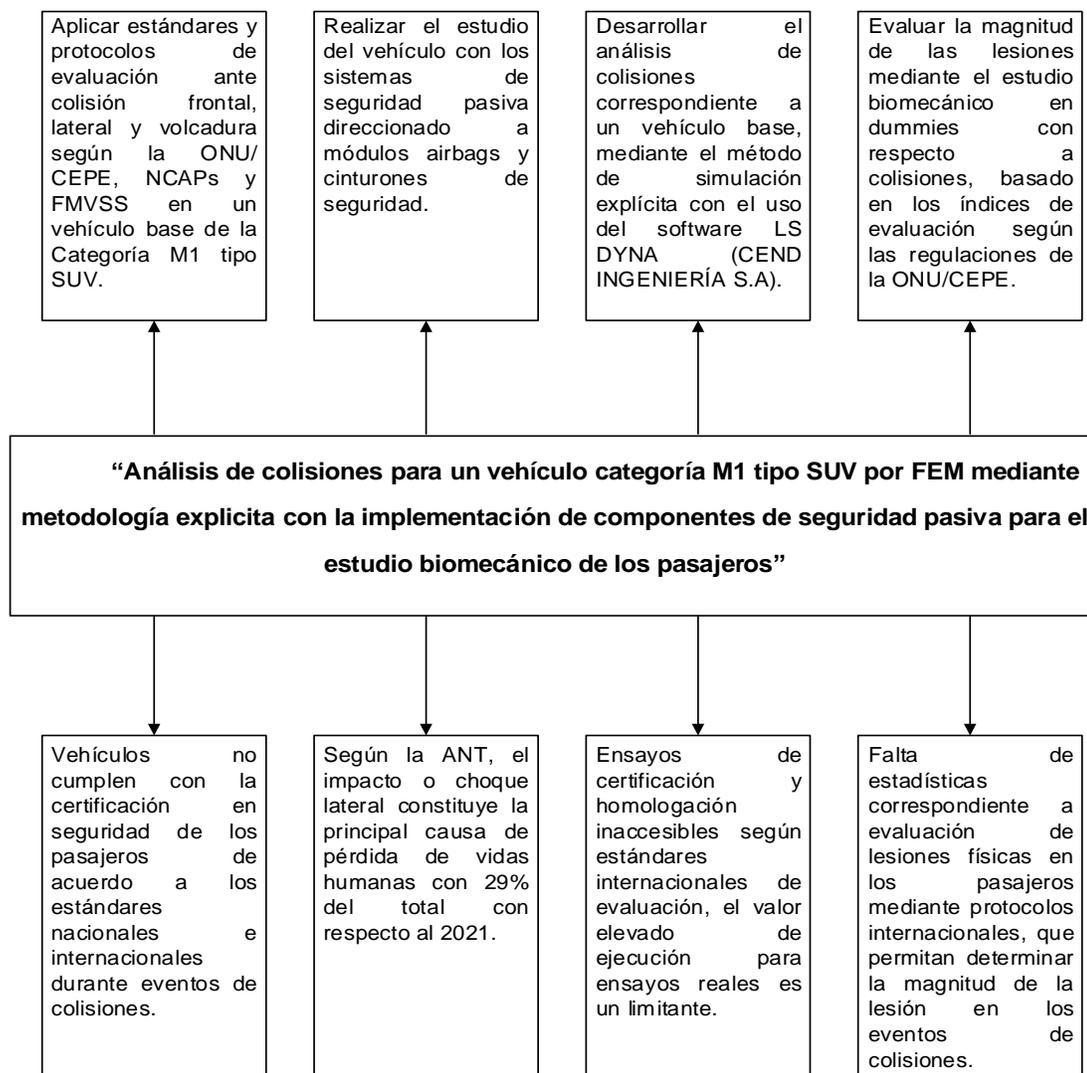
Uno de los softwares más utilizados a nivel mundial según publicaciones de artículos, implementación y generación de investigación referente a seguridad de pasajeros es CAE LS-DYNA que cuenta con un desarrollo de más de 60 años y se especializa en realizar simulaciones no lineales utilizando una metodología explícita, siendo el más empleado en empresas, organismos y laboratorios que se encargan de realizar estudios con referencia de Euro NCAP, NHTSA, artículos publicados en SAE, y revistas de mayor prestigio a nivel mundial.

Planteamiento del Problema

En Latinoamérica, las prestaciones de la seguridad pasiva del automóvil según normativas internacionales garantizan la integridad física de los ocupantes ante colisiones de diferentes eventos, en contraste, los vehículos tipo SUV comercializados en el Ecuador están limitados en equipamiento de seguridad (cinturones de seguridad y airbag), debido a la falta de cumplimiento de la normativa sugerida nacionalmente, que repercute en los siniestro de tránsito causando defunciones, lesiones, traumas, discapacidades y secuelas a los pasajeros, con mayor repercusión en impactos laterales, motivo por el cual se requiere el desarrollo de los ensayos para la certificación de seguridad en función de los índices de evaluación de lesiones según regulaciones internacionales. La ejecución real conlleva elevados precios, por esta limitante se opta la metodología de simulación explícita por FEM de los diferentes ensayos requeridos, tal como se detalla en la figura 3.

Figura 3

Planteamiento del problema



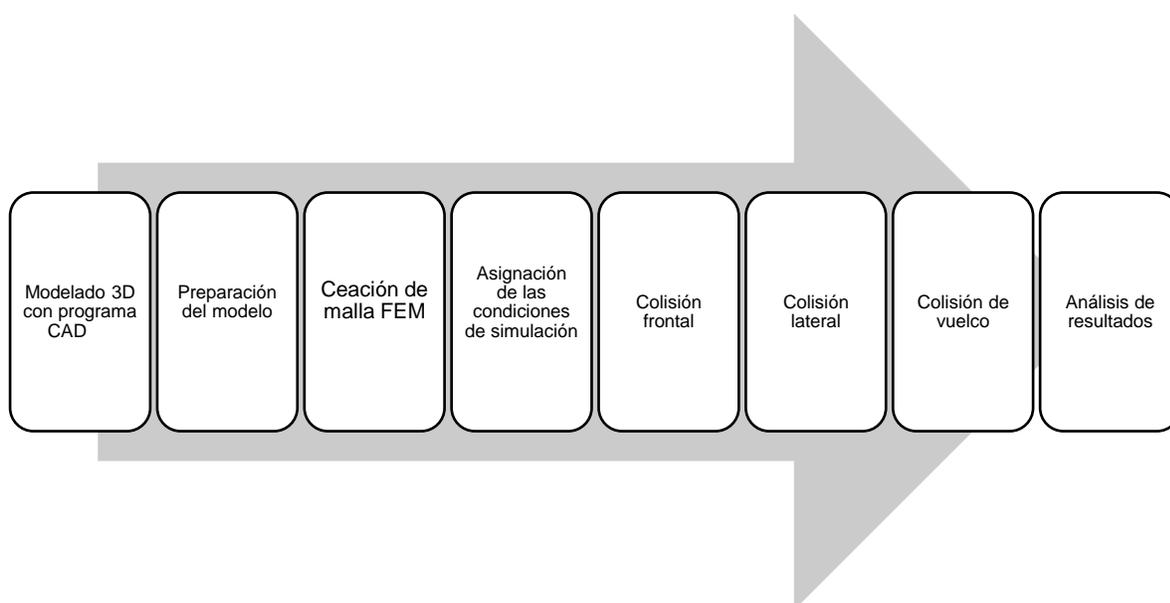
A fin de generar soluciones para la problemática planteada, se propone el análisis de colisiones (frontal, lateral y vuelco) de un vehículo categoría M1 Tipo SUV mediante la metodología por simulación explícita no lineal en LS DYNA (CEND INGENIERÍA S.A), en base a la seguridad pasiva y el estudio biomecánico en dummies, reemplazando a los pasajeros a bordo acorde a las regulaciones de la ONU/CEPE, FMVSS y protocolos de evaluación de NCAPs para determinar la magnitud de las lesiones en base al vehículo modelado de ensayo.

Descripción Detallada del Proyecto

La presente investigación de “Análisis de colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros” considera lo siguiente, como se detalla en la figura 4.

Figura 4

Fases de la descripción detallada



Para iniciar el proceso de modelado 3D se realizará un análisis de tres modelos de vehículos tipo SUV de los más comercializados en el país de la categoría M1, en el que se observará la configuración de los diseños del bastidor y todos sus sistemas ensamblados con el objetivo de obtener un modelo base estándar para realizar el proyecto.

En la recopilación de información como medidas, características y proporciones de los modelos de los vehículos se accederá a fichas técnicas, manuales de construcción y ensamblaje. Una vez se tenga la configuración estándar del modelo base se generará un

modelo 3D propio empleando un programa CAD, en el que se modelará las partes del automóvil considerando primordiales los componentes estructurales que aporten a la resistencia del automóvil en simulaciones de colisión, en la tabla 1 se describe las partes del vehículo que se modelarán.

Tabla 1

Partes estructurales por modelar del vehículo base

Parte por modelar	Tipo de componente	Observaciones
Bastidor compacto según modelo base	Superficies 2D	Los componentes estarán en contacto y en algunos se realizará una superficie media para generar nodos de unión.
Parabrisas y vidrios laterales	Superficies 2D	Se generará en contacto con la estructura de la puerta, no se considerará el mecanismo que levanta y baja el vidrio.
Asientos con cinturones de seguridad	Cojines y estructura del asiento en superficies 2D	El cinturón de seguridad no se modelará ya que se genera automáticamente con el programa.
Sistema de transmisión	Ejes, diferenciales y elementos robustos se genera con solido 3D, sistemas que tengan un espesor inferior a 10 mm con superficies 2D	No se modelará sistemas de sujeción y uniones especiales como juntas universales, homocinéticas, entre otras, debido a que se realizará una unión simplificada.
Sistema de dirección	Superficies 2D	
Sistemas de frenos	Superficies 2D	No se modelará cañerías y sistemas que no aporten una resistencia estructural considerable para el vehículo en la simulación de colisiones.
Sistema de suspensión	Superficies 2D, por ejemplo, mesas y varillaje de suspensión	No se modelará espirales/resortes como tampoco amortiguadores debido a que se colocará elementos simplificados de unión.
Sistema de escape	Componentes con espesores inferiores a 10 mm con superficies 2D	No se realizará conexiones con pernos en ningún tramo del escape, se generará una conexión por contacto entre todas las partes del escape y el automóvil.

Parte por modelar	Tipo de componente	Observaciones
Motor y caja de cambios	Sólidos 3D	Se generará un modelo simplificado del motor y la caja de cambios como un bloque sólido exceptuando los mecanismos internos como biela manivela y transmisión por engranajes, el objetivo es representar la masa y propiedades inerciales del motor y caja de cambios del automóvil.
Sistema de refrigeración	Superficies 2D	No se modelará mangueras y elementos que no aporten resistencia estructural al vehículo.
Sistema admisión	Superficies 2D	No se generará conexiones con pernos.
Tanque de combustible	Superficies 2D	El tanque de combustible debe estar vacío según requisito por normativa.
Puertas y cajuelas	Superficies 2D	No se modelará ningún mecanismo interno de las puertas y de las cajuelas.
Autopartes	Superficies 2D	Se modelará el tablero de instrumentos, retrovisores, y obviará módulos que no aporten resistencia estructural al auto, por ejemplo: radio, limpia parabrisas, logos y marcas, cajuelas internas entre otros.
Sistema de airbag frontal y lateral	Líneas 1D	Se generará una malla 2D con LSPP en base a líneas generadas en el programa CAD

El modelo CAD será generado con el programa *Dessault Systems SolidWorks* (Versión estudiantil), el cual cuenta con los recursos computacionales necesarios para modelar el automóvil. Se revisará posibles fallas del modelado como interferencias, separaciones, componentes duplicados, componentes basuras y caras imperfectas y pequeñas, para esto se utilizará softwares preprocesadores especializados, en el que se ubicarán estos errores y corregirán.

En base del modelo CAD limpio y reparado se generará una malla FEM, la misma contará con elementos de tipo *Shell 2D* que se generan en los componentes de superficies, también el modelo contará con elementos de unión simplificada tipo rígido para representar los seguros de las puertas, capo, sujeción de asiento con la carrocería, uniones de tablero, sujeción del motor y el bastidor, entre otros.

Las mallas 2D generadas contarán con elementos cuadriláteros (mayor cantidad) y triangulares, la malla 3D contará con elementos hexaédricos, la cual viene definida en los modelos de dummies y accesorios de protocolo.

La calidad de malla del modelo se controlará con índices de calidad de malla Jacobiano en el que se busca que los elementos tengan un índice superior a 0.3 y con esto se garantizará que no se obtendrá errores en el proceso de la simulación para obtener resultados confiables.

Los tipos de materiales que se van a utilizar en los componentes del automóvil base se detallan a continuación en la tabla 2.

Tabla 2

Designación de materiales para los componentes del vehículo base

Tipo de componente	Material	Observaciones
Bastidor estructural	Acero estructural	Se utilizará las librerías de materiales asignados en los modelos de vehículos que se encuentran disponibles en la página web de la NHTSA. Se asignará propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, radio de Poisson, densidad, límite de fluencia, resistencia última a la tracción y deformación plástica máxima según lo requerido en MAT_024 de LSDYNA (CEND INGENIERÍA S.A).
Elementos estructurales secundarios (estructuras de los asientos, estructuras del capó y complementos)	Acero estructural	Se utilizarán las librerías de materiales asignados en los modelos de vehículos que se encuentran disponibles en la página web de la NHTSA. Se asignará propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, radio de Poisson, densidad, límite de fluencia, resistencia última a la tracción y deformación plástica máxima según lo requerido en MAT_024 de LSDYNA (CEND INGENIERÍA S.A).

Tipo de componente	Material	Observaciones
Cojines asientos	Espojas de baja densidad	Se utilizarán las librerías de materiales asignados en los modelos de vehículos que se encuentran disponibles en la página web de la NHTSA, artículos publicados acerca del MAT_057, entre otros.
Vidrios y parabrisas	Vidrios templados y laminados	Se utilizarán las librerías de materiales asignados en los modelos de vehículos que se encuentran disponibles en la página web de la NHTSA.
Ruedas	Cauchos hiperelásticos	Se utilizarán las librerías de materiales asignados en los modelos de vehículos que se encuentran disponibles en la página web de la NHTSA.
Motor y caja de cambios	Acero	Se utilizarán las librerías de materiales asignados en los modelos de vehículos que se encuentran disponibles en la página web de la NHTSA.
Maniquí de pruebas de impacto	Elastómeros, cauchos, aceros, aluminios, compuestos, entre otros	Materiales definidos en planos de construcción publicados por GM en la página de UNECE. Se consideran validados todos los materiales asignados en modelos generados y calibrados según LST y Universidad de Washington.
Cinturones de seguridad	Material compuesto de tipo textil (opcional)	Se asignará el material según el entrenamiento de LSDYNA (CEND INGENIERÍA S.A) proporcionado por LST, se investigará modelos publicados en artículos acerca de MAT_024.
Airbag	Material compuesto textil	Se asignará según material de entrenamiento de LSDYNA (CEND INGENIERÍA S.A) proporcionado por LST, se investigará modelos publicados en artículos acerca de MAT_034.
Otras autopartes	Materiales rígidos y flexibles	Se empleará lo requerido en el modelo, las librerías MAT_024 y MAT_001.

Se desarrollará las simulaciones de colisión frontal, lateral y vuelco de acuerdo con los parámetros de la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros de simulación para los ensayos de colisión

Tipo de colisión	Condición de simulación	Valor o característica
Simulación 1 de colisión frontal con 40% de <i>overlap</i> (traslape frontal entre vehículo y barrera de impacto).	Tipo de barrera de impacto	Según lo indicado en el reglamento R94 de la CEPE
	Velocidad del vehículo impacto frontal	64 km/h
	Tipo de maniquí para el Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre
	Tipo de maniquí de pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer
	Tipo de cinturones de seguridad	3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores
	Peso del automóvil	Inferior a 2.5 toneladas
	Tipo de airbag	Airbag frontal y lateral para conductor Airbag frontal para pasajero
Simulación 2 de colisión lateral con barrera móvil deformable	Peso del carro para impacto	950 ± 20 kg Según lo indicado en el reglamento R95 de la CEPE
	Velocidad vehículo impactador	50 km/h
	Tipo de maniquí para el Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre
	Tipo de maniquí de pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer
	Tipo de cinturones de seguridad	3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores
	Peso del automóvil estático	Inferior a 2.5 toneladas
	Tipo de airbag	Airbag frontal y lateral para conductor Airbag frontal para pasajero
Simulación 3 de colisión de vuelco.	Tipo de trineo de propulsión	Según lo indicado en la FMVSS 208
	Velocidad del trineo y vehículo	48 km/h
	Tipo de maniquí para el Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre
	Tipo de maniquí de pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer
	Tipo de cinturones de seguridad	3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores
	Peso del automóvil	Inferior a 2.5 toneladas
	Tipo de airbag	Airbag lateral para conductor

Finalmente se realizará el análisis de los índices y criterios de lesión en los *dummies* biomecánicos obtenidos en los diferentes ensayos, para determinar anatómicamente la

gravedad de impacto en el cuerpo humano. De la misma manera se relacionará el protocolo Latin NCAP para la deducción de resultados.

Justificación e Importancia

El desarrollo de este proyecto se enfoca en presentar el análisis de colisiones de un vehículo, Categoría M1 tipo SUV, el mismo que constituye un factor grave y frecuente en los accidentes de tránsito que generan diferentes lesiones anatómicas en el cuerpo humano. La certificación de un vehículo seguro no puede ser validado de forma real por sus limitantes, por lo que se desarrolla mediante simulación explícita en LS DYNA (CEND INGENIERÍA S.A), el cual constituye un software que permite sustentar con bajos recursos económicos y computacionales los diferentes ensayos de colisión presente en el vehículo, considerando la seguridad e integridad de los pasajeros bajo la normativa RTE INEN 034R que especifica el uso obligatorio de las regulaciones de la ONU/CEPE N° 94 para colisión frontal, ONU/CEPE N° 95 para colisión lateral, y de la FMVSS 208 para volcamiento, con la finalidad de obtener los valores máximos y mínimos de rendimiento relacionado a los índices y criterios de evaluación correspondiente a la dimensión de las posibles lesiones generadas mediante el análisis biomecánico.

El software FEM utiliza metodología explícita que tiene la capacidad de calcular millones de ciclos con bajo gasto computacional, con precisiones en microsegundos que es suficientemente detallada para verificar el comportamiento estructural y biomecánico de un evento de colisión, esto debido a la duración temporal de máximo 500 milisegundos en un evento dinámico de colisión de automóviles, por lo cual, es necesario el análisis a detalle en cada fracción de tiempo. Según las regulaciones CEPE indica que el evento de colisión debe ser filmado con cámaras especiales de alta velocidad que tengan una precisión de un

fotograma cada milisegundo, implementando el software FEM explícito se obtendrá un resultado cada microsegundo aproximadamente.

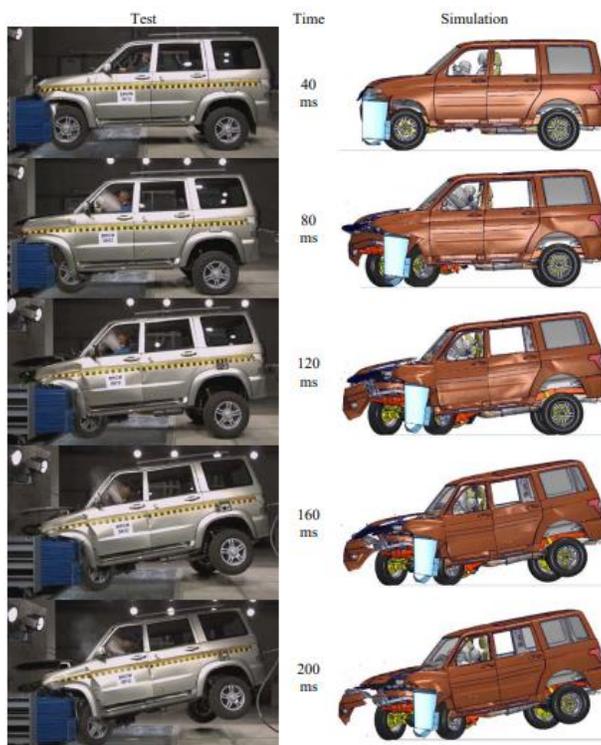
El desarrollo de ensayos para colisiones presenta la necesidad de un elevado recurso económico, la adquisición del maniquí específico para cada ensayo de impacto tiene un costo de aproximadamente 150 000 dólares americanos, por lo cual los hacen modelos poco accesibles, y por esta razón se opta el uso del software LS DYNA (CEND INGENIERÍA S.A) que dispone de diferentes modelos con la calibración necesaria para el desarrollo.

Como indica Alekseev et al. (2017) LS DYNA tienen validación del software bajo las regulaciones internacionales, como el artículo de la revista de Física y Mecánica de Materiales correspondiente a la “***Validation of EURO NCAP Frontal Impact of Frame Off-Road Vehicle: Road Traffic Accident Simulation***” realizado por la Universidad Politécnica de San Petersburgo, donde se comprueba la coincidencia del comportamiento de elementos virtuales con relación a elementos de ensayo a escala real. El desarrollo hace mención del modelado de un vehículo de complejidad baja, debido a la ausencia de datos iniciales propios de la industria, obteniendo como resultado un modelo con todos los parámetros funcionales para el desarrollo de simulación ante la interacción física, también incluye el modelo comercial de maniquí *Hybrid III 50%*.

Para validación del software en un principio se compara los modelos real y computacional evaluando propiedades y características como largo, ancho, alto, espacio libre, distancia entre ejes, peso y coordenadas al centro de gravedad, asegurándose de que tengan medidas iguales. Con respecto a la simulación y comparativa con la Euro NCAP como se indica en la figura 5, se basa en el análisis por fracciones de segundo de los parámetros característicos como deformación de la carrocería, deformación del bastidor, rotación de la rueda durante el impacto y el comportamiento de la suspensión.

Figura 5

Impacto frontal con barrera deformable Euro NCAP real y simulada



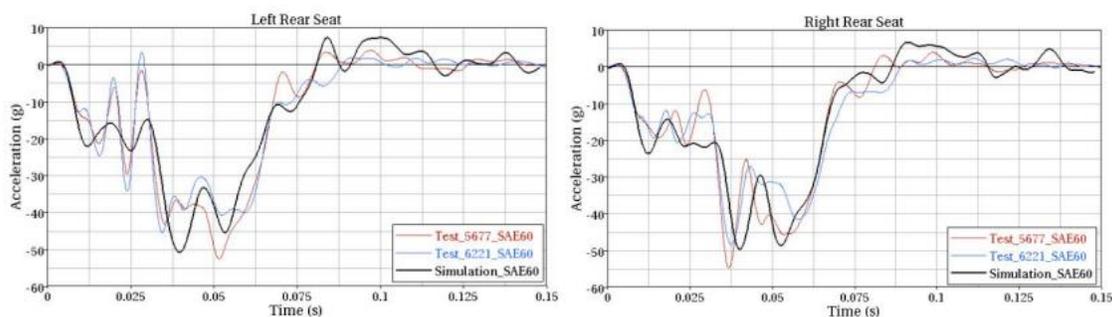
Nota. Tomado de “Validation of EURO NCAP Frontal Impact of Frame Off-Road Vehicle: Road Traffic Accident Simulation” (p.66), por Alekseev et al. , 2017.

Otra validación se obtiene del artículo del Centro Nacional de Análisis de Choques NCAC 2012-W-005 de la universidad George Washington (GWU) correspondiente a la **“Extended Validation of the Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan”**, se basa en el programa NCAP y la NHTSA ante prueba de impacto frontal con el estudio comparativo de parámetros como masa, inercia y centro de gravedad del vehículo, también se incluye la cantidad y ubicación de acelerómetros para evaluar el rendimiento según la NCAP.

En la validación The National Crash Analysis Center (2012) hace referencia al Programa de Verificación y Validación de Seguridad Vial (RSVVP) para generar medidas objetivas, la métrica MPC de *Sprague-Geers* para cuantificar la similitud en curvas de prueba y simulación como se muestra en la figura 6. De la misma manera la métrica ANOVA para evaluar el error residual. Los criterios de aceptación son de una diferencia de menos del 40 % en magnitud, un error residual promedio de menos del 5 % y una desviación estándar de los errores residuales de menos del 20 %, respectivamente.

Figura 6

Aceleraciones asiento trasero izquierdo y derecho en prueba y simulación



Nota. La figura muestra la comparación entre dos test reales frente a una simulación basado en condiciones SAE. Tomado de “Extended Validation of the Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan” (p.5), por The National Crash Analysis Center, 2012.

Objetivos del Proyecto

Objetivo Principal

- Analizar colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros.

Objetivos Específicos

- Modelar un vehículo tipo SUV que represente un modelo 3D estándar en base a vehículos de la categoría M1 tipo SUV más vendido en el país, utilizando un programa CAD especializado.
- Simular una colisión frontal del vehículo SUV estándar con un *overlap* 40% al lado del conductor contra una barrera rígida, basado en el procedimiento de ensayo de la CEPE R94, para verificar y documentar las lesiones anatómicas de pasajeros por medio de simulación computacional FEM, empleando programas CAE con el método explícito no lineal.
- Simular una colisión lateral del vehículo SUV estándar de impacto con barrera móvil deformable, basado en el procedimiento de ensayo de la CEPE R95, para verificar y documentar las lesiones anatómicas de pasajeros por medio de simulación computacional FEM, empleando programas CAE con el método explícito no lineal.
- Simular una colisión de vuelco del vehículo SUV en base al ensayo de impulso de trineo según el procedimiento indicado en FMVSS 208, para verificar y documentar las lesiones anatómicas de los pasajeros mediante la simulación computacional FEM, empleando programas CAE con el método explícito no lineal.
- Determinar el grado de incidencia del impacto que genere mayores lesiones al cuerpo humano en base a las condiciones del ensayo computacional e índices de evaluación de acuerdo con las regulaciones de estudio, para proporcionar información relevante sobre las consideraciones del diseño y selección de automóviles.

Metas

- Modelar el vehículo base categoría M1 tipo SUV con la asignación de materiales específicos y validados para la simulación.

- Obtener criterios de evaluación en lesiones de los maniquís empleados para cada tipo de colisión.
- Determinar la gravedad de lesiones producidas en los diferentes tipos de colisiones.
- Determinar qué tipo de colisión provoca mayor cantidad de lesiones en los pasajeros, según la magnitud y protocolos de evaluación.

Hipótesis

La metodología de simulación explícita no lineal por FEM basada en el reglamento de la ONU/CEPE, FMVSS y protocolos NCAPs permitirá evaluar las principales causas y grado de lesiones debido al producto de la energía y fuerzas Gs originadas en el cuerpo humano mediante el análisis biomecánico de maniquís correspondiente al conductor y pasajero, comparadas con los otros tipos de colisiones.

Variables de Investigación

Variable Independiente

Ensayos de simulación computacional mediante metodología explícita no lineal de los diferentes tipos de colisión de un vehículo base Categoría M1 Tipo SUV.

Tabla 4

Variable independiente

Conceptualización	Categorías	Indicadores	Índice	Técnicas e instrumentos
La simulación computacional de los tipos de colisiones consiste en la aplicación referente a un vehículo base de la categoría M1 tipo SUV, con características referenciales a tres SUVs con mayor venta a nivel del país.	Colisión frontal	Evento	40% <i>overlap</i>	ONU/CEPE reglamento N° 94 y N°95.
		Velocidad	64 km/h	
		Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre	Protocolo Latin NCAP.
		Pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer	Analizar la configuración y diseño de 3 modelos tipo SUV en el país, en base a modelos más comercializados.
		Cinturón de seguridad	3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores	
		Peso del automóvil	Inferior a 2.5 toneladas	Generar el modelo base 3D y partes estructurales empleando programa CAD.
		Tipo de airbag	Frontal Lateral	
	Colisión Lateral	Evento	Vehículo de impacto 950 kg	Controlar y corregir anomalías e interferencias en el modelo base 3D mediante pre-procesadores especializados
		Velocidad	50 km/h	
		Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre	
		Pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer	
		Cinturón de seguridad	3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores	Generar malla FEM con índices de calidad Jacobiano.
		Peso del automóvil	Inferior a 2.5 toneladas	Designar materiales para los distintos componentes del modelo base 3D mediante librerías de la NTHSA.
		Tipo de airbag	Frontal Lateral	
	Volcadura	Evento	Plataforma con inclinación 23°	Ejecutar simulación frontal, lateral y vuelco en base a reglamentos y protocolos internacionales en el software LS – DYNA (CEND INGENIERÍA S.A).
Velocidad		48 km/h		
Conductor		Maniquí Híbrido III 50% hombre		
Pasajero delantero		Maniquí Híbrido III 5% mujer		
Cinturón de seguridad		3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores		
Peso del automóvil		Inferior a 2.5 toneladas		
Airbag		Lateral		

Variable Dependiente

Índices de lesiones obtenidas en el análisis biomecánico de los maniquís

Tabla 5

Variable dependiente

Conceptualización	Categorías	Indicadores	Índice	Técnicas e instrumentos		
Criterios del análisis biomecánico que definen la gravedad de lesiones de los pasajeros ante colisiones en las diferentes partes del cuerpo, con la influencia de componentes de seguridad pasiva como airbags y cinturones de seguridad.	Criterio del comportamiento del maniquí	Cabeza	HIC36 HIC15	ONU/CEPE reglamento N° 94 y N°95.		
		Cuello	NIC: Tracción Compresión Cizalladura Momento de flexión		Analizar criterios de comportamiento (aceleraciones y fuerzas Gs).	
		Tórax	THC	Relacionar la escala de gravedad de lesiones con los resultados obtenidos.		
		Abdomen	APF			
		Pelvis	PSPF			
		Fémur	FFC			
				Tibia	TCFC TI	
				Rodilla		

Tabla 6

Especificación de la variable dependiente

Índice de evaluación		HIII 50 Percentil	HIII 05 Percentil
Lesión de la cabeza		HIC36 ≤ 1000 HIC15 < 700	HIC36 ≤ 1000 HIC15 < 779
Lesión del cuello NIC	Tracción	3.290 kN a 0 ms	2.070 kN a 0 ms
		2.815 kN a 35 ms	1.819 kN a 31 ms
		1.097 kN a ≥ 60 ms	0.690 kN a ≥ 54 ms
	Compresión	4.000 kN a 0 ms	2.520 kN a 0 ms
		1.100 kN a ≥ 30 ms	0.693 kN a ≥ 27 ms
	Cizalladura	3.100 kN a 0 ms	1.953 kN a 0 ms
		1.500 kN a 25-35 ms	0.945 kN a 20-29 ms
1.100 kN a ≥ 45 ms		0.693 kN a ≥ 37 ms	
Momento de flexión "y"		≤ 57 Nm	≤ 31 Nm

Índice de evaluación		HIII 50 Percentil	HIII 05 Percentil
Compresión del tórax ThCC		≤ 50 mm	≤ 41 mm
Fuerza del fémur FFC		9.070 kN a 0 ms 7.560 kN a ≥ 10 ms	6.186 kN a 0 ms 5.156 kN a ≥ 9 ms
Comportamiento de la tibia	Fuerza de compresión	≤ 8 Kn	≤ 5.104 kN
	Índice de lesión TI	≤ 1.3	≤ 1.3
Movimiento de las articulaciones en rodillas		≤ 15 mm	≤ 12 mm
Fuerza sobre la pelvis PSPF		≤ 6 kN	≤ 6 kN
Fuerza sobre el abdomen APF		≤ 2.5 kN	≤ 2.5 kN

Nota. Tomado de *Accidental Injury: Biomechanics and Prevention*, por A. Nahum y J. Melvin, 2002, Springer Science. Y *Anthropomorphic Dummies for Crash and Escape System Testing*, por ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH & DEVELOPMENT, 1996.

Capítulo II

Marco Teórico

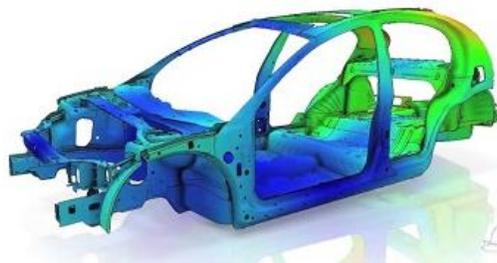
Programas CAE MEF Explícitos

Los programas de ingeniería asistidos por computador (CAE) que utilizan el análisis por elementos finitos (FEM) de forma explícita se caracterizan por solventar problemas donde se requiere un análisis en grandes deformaciones, así como también la presencia de las fuerzas de inercia (4RealSim, 2020).

Según Goebel Engineering (2021) dentro de la industria automotriz este tipo de programas se utilizan con una gran frecuencia, especialmente para simular la seguridad de los autos en el caso de impactos, lo que repercute en que la utilización de los mismos sea indispensable para el desarrollo de nuevas tecnologías en los automóviles, así mismo este tipo de programas explícitos logran predecir con gran exactitud el comportamiento de los ocupantes en un vehículo o el impacto de una colisión en ocupantes. En la figura 7 se muestra la aplicación del software para FEM en el diseño tecnológico de vehículos.

Figura 7

Software de simulación explícita aplicado en la industria automotriz



Nota. La figura muestra la aplicación del software CAD FEM, en la simulación de una carrocería con el fin de mejorar la calidad y ciclo de vida. Tomado de SIMULA[Fotografía], por 3DCadPortal, sf.

ANSYS LS-DYNA

De acuerdo a Engineering Simulation And Scientific Software (2022) la línea de softwares ANSYS, actualmente sirven como herramientas necesarias en el desarrollo del campo de la ingeniería que tiene la necesidad y requieren de ensayos de simulación de producto y procesos.

Hoy en día ANSYS es el líder mundial a lo que se refiere en simulación de ingeniería abarcando temas como:

- Fluidodinámica.
- Análisis estructural.
- Multifísica.
- Electromagnética.
- Aplicaciones personalizadas.

Por otro lado, LS- DYNA es un software de simulación multifísica que puede simular deformaciones no lineales que se generan en milisegundos, la combinación de Ansys y LS-DYNA permite innumerables aplicaciones en distintas industrias como: automotriz, aeroespacial, conformación mecánica, productos de consumo, estructural, electrónicos, defensa, biociencia entre otros (Vetturazzi, 2020).

Historia de LS-DYNA

LS – DYNA, en un inicio nace del programa 3D FEA DYNA3D, el cual fue desarrollado por el Dr. John O. Hallquist en 1976 en las instalaciones del laboratorio nacional *Lawrence Livermore* (LLNL), fue pensado para simular el impacto de fusión completo o bomba nuclear, así como también el análisis no lineal de estructuras, en esos años no existían softwares disponibles para tal suceso y los softwares 2D eran inadecuados para tal labor (LS-DYNA, s.f.).

A continuación, en la tabla 7 se muestra un resumen de la historia del software LS-DYNA:

Tabla 7

Historia de LS – DYNA

Año	Características
1978	Pedido de liberación código DYNA 3D, por parte de Francia y sea puesto en dominio público.
1979	Lanzamiento de la primera versión de forma vectorizada y explícita para la súper computadora CRAY 1.
1979 - 1981	Captación de interés por parte de Japón y Europa, y el fabricante de motores de avión Rolls – Royce comenzaron a usarlo.
1982	Impartición de seminarios para usuarios en Japón y Europa, empresas interesadas en comercializar el software.
1984	Desarrollo del auto contacto superficial, dinámica de cuerpo rígido acoplada a FEM y así como muchas mejoras.
1988	Más de 600 cintas conteniendo DYNA3D, DYNA2D, NIKE2D, NIKE3D. Códigos FEM implícitos se distribuyeron en el mundo.
Finales de 1988	Fundación de la Corporación de Tecnología de software de Livermore (LSTC), con el fin de comercializar y desarrollar LS - DYNA, basado en DYNA3D.
1989	DYNA3D se posiciona como el código FEM más avanzado para análisis dinámico.

Nota. Tomado de *Historia de LS-DYNA*, por Ingeniería Avanzada para Soluciones Reales, 2017.

Posterior, ANSYS en el año 2019 adquirió LS- DYNA, con lo cual posibilitó el análisis de complejos problemas del mundo real debido a que LS DYNA se llegó relacionar con las distintas líneas de ANSYS como son: *Mechanical*, *SpaceClaim*, *Workbench* entre otras, por lo cual posibilita el uso de todas las herramientas de pre y posprocesamiento en el ecosistema ANSYS (Vetturazzi, 2020).

Uso de LS-DYNA

En la industria Automotriz, LS – DYNA se utiliza para el análisis del diseño de vehículos, el mismo que se caracteriza por predecir valores altamente confiables con precisión en

colisiones, del mismo modo permite analizar los efectos de dicha colisión en los ocupantes del vehículo, con LS – DYNA la industria automotriz puede probar el diseño de sus distintos modelos de vehículos en la parte estructural y de seguridad sin tener que experimentar de forma real, lo cual beneficia el ahorro de tiempo y costos (LS-DYNA, s.f.).

A continuación, se señalan algunas características especiales que ofrece LS – DYNA en el área automotriz:

- Bolsas de aire.
- Modelos ficticios híbridos III.
- Modelos de infladores.
- Sensores.
- Pretensores.
- Cinturones de seguridad.
- Anillos colectores.
- Acelerómetros.
- Retractares.

Actualmente existen varias investigaciones de validación basadas en simulación de impactos con uso de cuerpos antropomórficos ficticios, como se muestra en la figura 8.

Figura 8

Colisión de cabeza ficticia con airbag utilizando LS – DYNA



Nota. La figura muestra la simulación de choque ejecutada en LS – DYNA y la experimentación real para validar la confiabilidad del programa para 90 ms. Tomado de “Validation of EURO NCAP Frontal Impact of Frame Off-Road Vehicle: Road Traffic Accident Simulation” (p.65), por Alekseev et al., 2017.

Tipos de Pruebas y Valoraciones

Protocolo Euro NCAP

Las valoraciones y pruebas se llevan a cabo para valorar la seguridad de los vehículos que ingresan y comercializan en Europa, algunas consideraciones para dichas valoraciones se basan en protocolos referente a la seguridad de ocupantes que abarcan desde adultos, niños, usuarios vulnerables en caminos y asistencia de seguridad (Vázquez et al., 2020).

A continuación, en la tabla 8, se señalan aspectos importantes sobre la preparación del vehículo y los dummies empleados para la ejecución de las distintas pruebas.

Tabla 8

Detalles de los protocolos Euro NCAP

Tipo de colisión	Parámetros	Detalle
Choque frontal completo contra barrera rígida.	<p>Esta valoración se realiza con 100% de empalme del frente del vehículo.</p> <p>Considerar una velocidad de impacto de 50 km/h.</p> <p>Barrera de concreto con una masa no menor a las 70 toneladas.</p> <p>Utilización de dos dummies de mujeres adultas de talla mediana es decir HIII 5% o HIII 05F, ubicados uno en el asiento de conductor y el otro en el asiento posterior de forma opuesta al asiento del conductor.</p>	
Choque frontal parcial.	<p>Impacto con un empalme del 40%.</p> <p>Considerar una velocidad de impacto de 64 km/h.</p> <p>Colocación de dos dummies de hombres medianos (50%) en los asientos de frente y en los posteriores dummies de niños entre 6 y 10 años (Q6 y Q10).</p>	
Choque lateral con barrera deformable.	<p>Utilización de chasis desplazable con barrera deformable, con una masa combinada de 1300 kg.</p> <p>Velocidad de impacto de 50 km/h.</p> <p>Colocación de un Dummy hombre mediano (WorldSID 50%) y dos dummies infantiles en los asientos traseros de entre 6 y 10 años (Q6 y Q10).</p>	
Choque lateral oblicuo.	<p>El vehículo se desliza mediante una plataforma a una velocidad de 32 km/h e impacta a un poste cilíndrico metálico.</p> <p>El poste metálico debe ser de un diámetro de alrededor de 254 mm.</p> <p>Colocación de un Dummy adulto (WorldSID 50) en el asiento del conductor.</p>	

Nota. Tomado de "Protocolos Euro-NCAP", Vázquez et al., 2020.

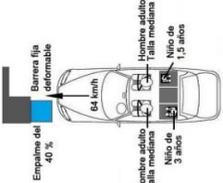
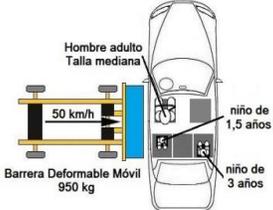
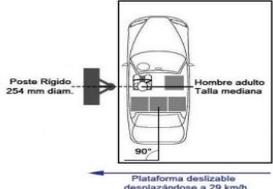
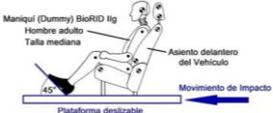
Protocolo Latin NCAP

Latin NCAP es el programa de evaluación de autos nuevos en Latinoamérica y El Caribe, el mismo que se basa en pruebas de choque definidas en los protocolos de euro NCAP.

Las pruebas que realiza Latin NCAP en el laboratorio de choques de ADAC permiten evaluar la protección tanto de pasajero adulto como de pasajero niño, ofrecida por el vehículo ante un eventual choque frontal y lateral. En la tabla 9 se indica los diferentes ensayos y parámetros del protocolo.

Tabla 9

Detalles de los protocolos Latin NCAP

Tipo de colisión	Parámetros	Detalle
Frontal Parcial	40% Overlap. Barrera fija deformable. Velocidad 64 km/h.	
Lateral	Barrera deformable móvil de 950 Kg. Velocidad de barrera 50 Km/h.	
	Poste rígido de 254 mm de diámetro Plataforma deslizante a 29 km/h En dirección perpendicular	
Posterior	Movimiento de impacto a baja velocidad	

Nota. La tabla indica los diferentes ensayos de impacto, que pueden ser ejecutados al lado derecho o izquierdo de la posición del vehículo para pruebas de impacto frontal y lateral. El ensayo posterior permite el análisis de golpe cervical a bajas velocidades. Tomado de “Protocolos Latin-NCAP”, Vázquez et al., 2020.

Reglamentación UNECE

La Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas, mediante el reglamento N°94, establece las prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal con aplicación en los vehículos de la categoría M1, cuya masa total admisible no supera las 2,5 toneladas. También define el procedimiento y especificaciones para la evaluación de la seguridad en maniqués de tipo Híbrido III con relación a la conformidad de la producción en base a disposiciones transitorias (Diario Oficial de la Unión Europea, 2012).

La Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas, mediante el reglamento N°95, establece las prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral de la estructura del habitáculo de los vehículos de motor en las categorías M1 y N1 basados en un proceso transitorio de evaluación mediante el maniquí 3D-H con sus respectivos criterios técnicos (Diario Oficial de la Unión Europea, 2015).

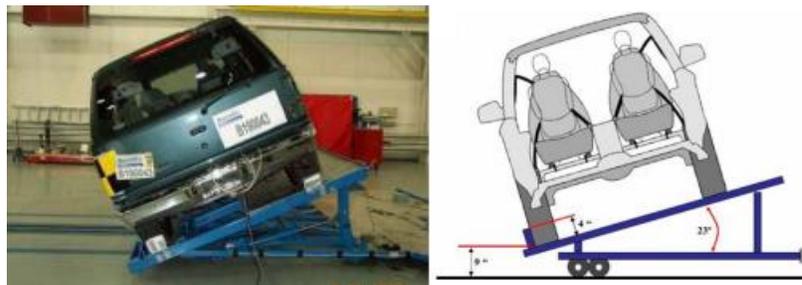
La ONU/CEPE dispone de regulaciones específicas para impacto frontal al 100% de empalme, impacto frontal al 40% de empalme, impacto lateral con barrera deformable móvil MDB e impacto lateral contra poste rígido.

Reglamentación FMVSS

La reglamentación de los Estados Unidos de América (EUA) define estándares federales de seguridad para los vehículos de motor, con la especificación de los ensayos y certificación del vuelco dinámico FMVSS 208, a cualquiera de los lados del vehículo sobre una estructura deslizante, misma que consiste en acelerar una plataforma rodante de volcadura con un vehículo, dicha plataforma debe ser inclinada a 23 grados con respecto a la horizontal como se muestra en la figura 9, misma que está constituida de componentes que restringen el deslizamiento lateral de los neumáticos y por ende del vehículo sobre la plataforma, también para esta regulación se considera la colocación de un *Dummy* tipo HIII 50% en el asiento del conductor, con las consideraciones señaladas la plataforma debe alcanzar una velocidad constante de alrededor de 48 km/h para posteriormente ser detenida en una longitud no mayor a 71 cm (Vázquez et al., 2020).

Figura 9

Regulación de vuelco según la FMVSS 208



Nota. La figura muestra las condiciones del trineo deslizante con dimensiones en pulgadas según la FMVSS 208. Tomado de “Occupant Dynamics in Rollover Crashes: Influence of Roof Deformation and Seat Belt Performance on Probable Spinal Column Injury” (p.1975), por Bidez et al., 2007.

Maniqués de Pruebas de Impacto

Historia de Maniqués

Según Ibañez (2018) los maniqués empleados para ensayos en colisiones de vehículos están ya casi presentes en la industria alrededor de un siglo, con el paso del tiempo han ido cambiando constantemente específicamente en la incorporación de nuevas tecnologías que permite desarrollar vehículos más seguros para los pasajeros

Su inicio se remonta en los años 50 del siglo XX, donde los accidentes de vehículos y otros medios empezaron a poseer cifras significativas así también la comprobación de los sistemas de seguridad se ejecutaban por personas voluntarias pero que no existían muchos, del mismo modo la comprobación se realizó con animales (cerdos, monos y osos) e incluso en situaciones se emplearon cadáveres para comprobar las lesiones, traumas, secuelas que dejaban los accidentes en los pasajeros

A continuación, en la tabla 10 se muestra algunas características del proceso de evolución de los maniqués de prueba o conocidos como *Dummy*.

Tabla 10

Evolución de los maniqués de pruebas de impacto

Año	Características	Detalle
1949	Primer <i>Dummy</i> "Sierra Sam" por la empresa Sierra Engineering. Muñeco tipo percentil 95%.	
1969	Fabricación del VIP 50 y misma mejorada por GM en el conocido <i>Hybrid I</i> . Surgimiento de las versiones del I y II.	

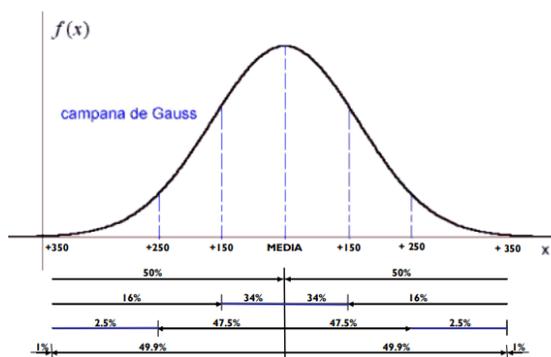
Año	Características	Detalle
1997	Hibrido III, siendo este el estándar de la industria. Adopción del Hibrido III por la mayor parte de los organismos reguladores.	

Tamaños Percentiles

Las dimensiones del cuerpo humano se distribuyen normalmente según la distribución de Gauss, en función de variables aleatorias y la densidad poblacional como se indica en la figura 10, donde la mayoría de los individuos se localizan en el valor medio para cualquier dimensión del cuerpo humano.

Figura 10

Curva de distribución normal



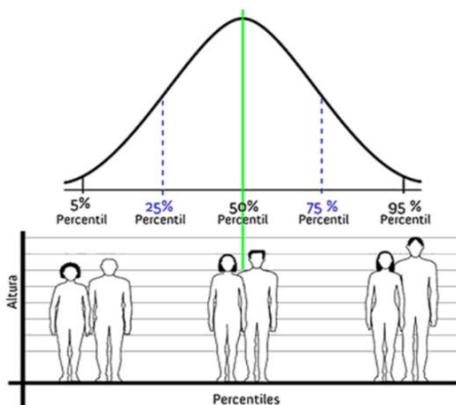
Nota. La media de las dimensiones del cuerpo humano representa el 50% en los individuos, por lo que existe otros muy bajos o altos en menor cantidad. Tomado de *Distribución Normal*, por Valero Cabello, 2010.

El percentil representa una medida de posición, donde expresa en cantidad porcentual de individuos de una población que disponen dimensiones corporales iguales o menores a un valor determinado como se muestra en la figura 11. Los valores más utilizados son P50, P95 y

P5, donde el 50% corresponde a la mediana de la población, con el 95% se está haciendo mención que la mayoría está situada debajo del punto indicado y el 5% representa una talla pequeña donde la cantidad de individuos es baja (Valero Cabello, 2010).

Figura 11

Tamaños percentiles del cuerpo humano



Nota. Tomado de *Los Dummies en la Actualidad*, por RIVEKIDS TECHNOLOGY, 2018.

Maniquís para Impactos

En la actualidad existen varios modelos de maniquís de pruebas que usan dependiendo el tipo de colisión, los modelos más utilizados se detallan en la tabla 11:

Tabla 11

Tipos de maniquís para impactos

Tipo de colisión	Tipo de maniquí	Regulación
Frontal	<i>Hybrid III</i> , THOR	ONU/CEPE R94
Lateral	World SID, SID-IIS, ES-2, USSID	ONU/CEPE R95
Posterior	BIORID2	UN 94
Vuelco	<i>Hybrid III</i>	FMVSS 208/ 216

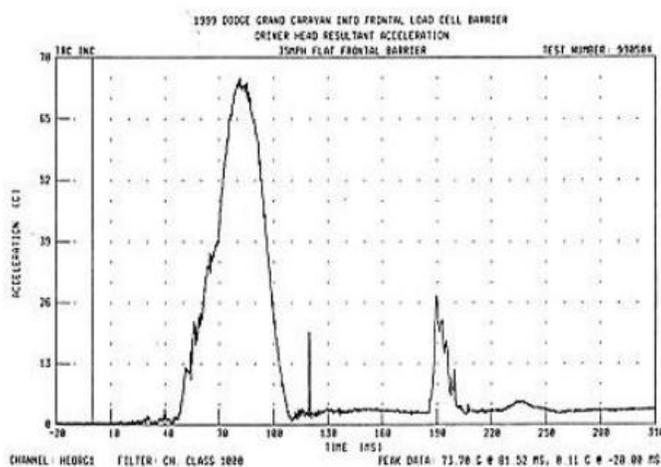
Acelerómetros

Un acelerómetro mide la fuerza generada por vibración o el cambio de movimiento de la masa en una dirección particular, denominada como aceleración, producto de esto, la masa comprime el material piezoeléctrico y se genera una carga eléctrica proporcional a la fuerza. Estos valores sirven para determinar la magnitud de una lesión en la cabeza, pecho, pelvis, piernas, pies y otras partes del maniquí. (UDLAP, s.f.)

En la figura 12 se indica un ejemplo de la gráfica de aceleración medida con un acelerómetro.

Figura 12

Aceleración principal durante una prueba de impacto



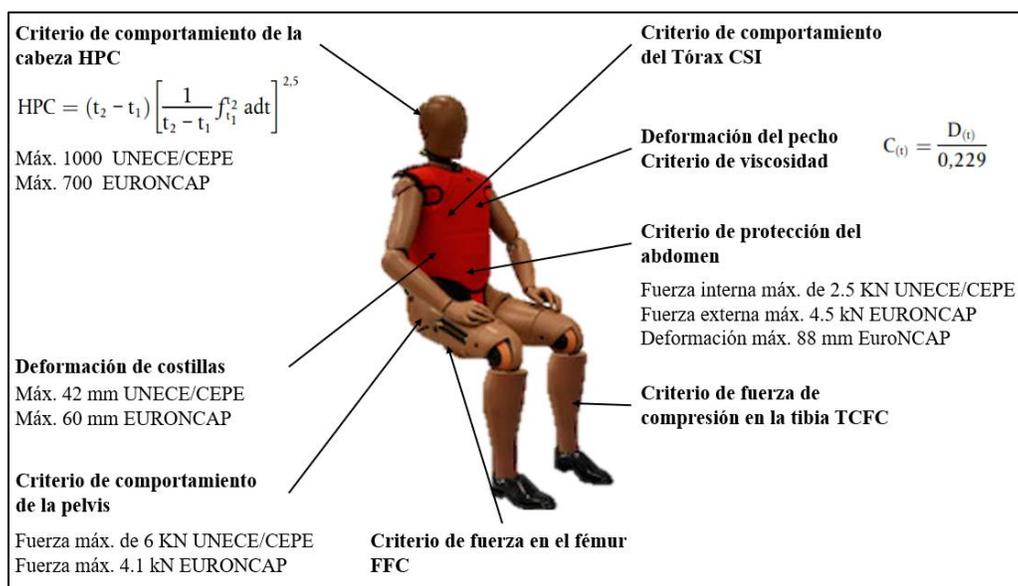
Nota. Aceleración de la cabeza del conductor, durante el transcurso de un impacto, donde los puntos altos indican el contacto de la cabeza con algún objeto que puede ser sólido o bolsa de aire. Tomado de *Aceleración Principal Durante Prueba de Impacto* (p.5), por UDLAP, s.f.

Índice de Lesiones de Maniqués

Los índices de lesiones están regulados según la Comisión Económica Para Europa CEPE/ONU y NCAPs para las diferentes partes del cuerpo del maniquí. Algunos se muestran en la figura 13, los mismos que son independientes a la aplicación del modelo ficticio.

Figura 13

Índices de lesiones según la ONU/CEPE y Euro NCAP



Sistemas y Equipos de Airbag

Hoy en día existen diversos sistemas, pero todas comparten el objetivo de proteger las mismas zonas del cuerpo humano, existen diversas configuraciones, pero los más comunes son los que se detallan a continuación:

Airbags Frontales

Normalmente en la parte frontal existe el airbag para el conductor y el acompañante como se muestra en la figura 14, para el primero se ubica en el centro del volante y se llega a desplegar cuando se realiza un choque a velocidad superior de 30 km/h, el tamaño del mismo depende estrechamente por el fabricante pero generalmente se ubica entre unos 35 y 60 litros,

por otro lado para el acompañante el airbag se ubica en la zona detrás del salpicadero y en cuanto al tamaño es mucho mayor que el del conductor entre uno 70 y 165 litros (Fernandez Albalat, 2017).

Figura 14

Airbag frontal



Nota. Tomado de *Airbag Frontal* (p.52), por Fernandez Albalat, 2017.

Airbags Laterales

En el mercado actual este tipo de airbags se conocen como “cojines de aire”, y su finalidad se centra en poder evitar que los ocupantes impacten contra las puertas, de esta forma se protege la caja torácica y caderas en el momento de producirse un choque lateral, normalmente se ubican en los paneles de la puerta o así como también en los laterales de los asientos como se muestra en la figura 15, con un tamaño que oscila entre 15 y 30 litros, del mismo modo estos llegan a activarse al superar una velocidad de 18 km/h. (Fernandez Albalat, 2017).

Figura 15*Airbag lateral*

Nota. Tomado de *Airbag Lateral* (p.53), por Fernandez Albalat, 2017.

Airbags en la Actualidad

Con el fin de brindar la mayor protección posible a los ocupantes existen configuraciones innovadoras como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12*Tipos de airbags en la actualidad*

Tipo de airbag	Características	Detalle
Cortina	Se combina con los airbags laterales y se despliegan conjuntamente. Finalidad de reducir lesiones en la cabeza y cuello por lo que se ubica en la guarnición del techo.	
Cinturón	Airbag integrado a la tira del cinturón en plazas posteriores. Se despliega en un tiempo de 40 ms. Reduce considerablemente lesiones en la caja torácica, pecho y abdomen.	
Posterior	Diseñados para vehículos pequeños y se expande por detrás del reposacabezas al producirse un choque posterior.	

Tipo de airbag	Características	Detalle
Peatón	Se expande por el capó entre la luna delantera y el vano del motor en el caso de atropello con el fin de proteger al peatón.	

Nota. Tomado de *Airbag Frontal* (p.53), por Fernandez Albalat, 2017.

Materiales de Airbags

Normalmente los materiales más empleados para la fabricación de airbags es el nylon o tejido de poliamida y para su lubricación puede ser el talco o el almidón, por otro lado para que se realice su activación es necesario de una carga propulsora la cual está constituida por ácido de sodio, del mismo modo el gas que se presenta en la combustión se encarga de reaccionar con el oxidante (oxígeno, óxido de cobre o de hierro) con el fin de que se convierta en nitrógeno y pueda llenar la bolsa (HELLA TECH WORLD, 2022).

Textiles en Airbags

Hoy en día los materiales textiles presentes en bolsas de aire son muy comunes por su nivel de seguridad para conductores y pasajeros, a continuación, en la tabla 13 se detallan las más importantes.

Tabla 13

Tipos de tejidos textiles en airbags

Tipo	Características
Tejidos planos y ensamble	Se emplean en airbags frontales y están recubiertos de silicona con el fin de ofrecer la mayor permeabilidad al aire. Piezas cortadas con equipos láser y se ensamblan con máquinas CNC, con el fin de cumplir los más altos estándares de calidad.
Tejido de una sola pieza	Toman multitud de formas y no se requiere costura. Se aplican para airbags laterales del tipo costura. Permanecen inflados mucho más comparados con los tradicionales.

Tipo	Características
X – Tethers	<p>Nueva generación para fabricación de airbags.</p> <p>Permite determinar de forma tridimensional el despliegue del airbag con lo cual se toma consideraciones para el diseño del automóvil.</p> <p>Proporcionan facilidad de control por secciones de la bolsa de aire.</p>

Nota. Tomado de *Estructura y Funcionamiento del Airbag*, por HELLA TECH WORLD, 2022.

Cinturones de Seguridad

El cinturón de seguridad viene hacer uno de los elementos más importantes de la seguridad pasiva del vehículo ya que en el caso de producirse un choque son los encargados de soportar la reacción, normalmente tienen que soportar 1,5 toneladas, disminuyendo notablemente las lesiones ocasionadas por el impacto (Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito, 2016).

El uso considerado del cinturón de seguridad disminuye en gran proporción las defunciones en accidentes de tránsito, a continuación, en la tabla 14, se muestra algunos porcentajes de reducción de lesiones por el uso del cinturón de seguridad.

Tabla 14

Reducción de lesiones por el uso de cinturón de seguridad

Tipo de lesión	Porcentaje de reducción de lesiones	
	Conductor	Pasajero
Lesiones del cerebro	33%	56%
Fracturas de cráneo	18%	18%
Heridas faciales	45%	64%
Lesiones a los ojos	38%	40%
Fracturas faciales	6%	6%
Lesiones a los pulmones	33%	58%

Nota. Tomado de *Cinturones de Seguridad*, por Department of transport, 1985, como se citó en Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito, 2016.

Tipos de Cinturones de Seguridad

Según FIA Foundation for the Automobile and Society (2009) los cinturones de seguridad están normalizados bajo regulaciones nacionales e internacionales, basados en un diseño de alto rendimiento, donde debe cumplir las principales dimensiones, facilidad de operación y ajuste. Actualmente existe cuatro tipos.

- Cinturón abdominal y diagonal de tres puntos, valorado por la efectividad y facilidad de uso con aplicación en automóviles, camionetas, camiones y minibuses.
- Cinturón abdominal de dos puntos, aunque cumple la posibilidad de expulsión, no evita que la cabeza y tórax se desplacen hacia adelante y tenga contactos fuertes.
- Cinturón diagonal, cumple con la retención superior del cuerpo humano, pero es inadecuado contra el deslizamiento bajo el cinturón.
- Arnés completo, ofrece excelente protección debido a la sujeción en hombros, abdomen y muslos.

Mecanismos de Seguridad

Dentro de los mecanismos de seguridad que permiten la actuación inmediata del accionamiento del cinturón de seguridad se encuentran los pretensores, mismos que pueden ser activados de forma mecánica o de forma comandada por el sensor que posee el airbag, así mismo se encuentran los retractores los cuales son mecanismos que permiten que se extienda o retraiga el cinturón de seguridad con el movimiento que realiza el ocupante, permitiendo también el bloqueo del mismo al ocasionarse una colisión o parada brusca. A continuación, en la figura 16 se muestra los mecanismos mencionados.

Figura 16

Pretensores y retractores en asientos de seguridad



Nota. La figura muestra el uso de los mecanismos de seguridad más actuales en los cinturones de seguridad, considerando que los pretensores vienen equipados en vehículos de alta gama.

Tomado de *Pretensores en Cinturón de Seguridad*, por RIVEKIDS, 2021.

Materiales Estructurales de los Vehículos

Cada material dispone de una serie de ventajas constructivas para las carrocerías de los vehículos que se utilizan actualmente, los mismos que pueden ser de la combinación de varios elementos de distinta naturaleza. La finalidad es reducir peso y aumentar resistencia, sin dejar un lado aspectos de seguridad.

La carrocería es el principal elemento estructural que forma parte de la seguridad pasiva del vehículo, debe garantizar la resistencia siendo ligera, rígida y deformable, es así como se puede encontrar aceros de alto límite elástico, de ultra alto límite elástico, aceros al boro, acero doble fase, aleaciones de aluminio, fibras de carbono, entre otros, como se observa en la figura 17 (Auto Crash, 2020).

Figura 17**Material estructural de la carrocería autoportante**

Nota. La parte central del vehículo está construida con aceros de mayor resistencia alcanzando valores de límites elásticos superior a 1200 N/m. Tomado de *¿Por qué el diseño y el material de la carrocería es fundamental en la seguridad del vehículo?*, por Auto Crash, 2020.

Propiedades Mecánicas

Según Budynas & Nisbett (2012) las propiedades de los materiales deben garantizar la viabilidad y rendimiento en una aplicación específica, en función del diseño y cargas al cual va a estar sometido el componente mecánico, estos deben ser estar basados en las propiedades mecánicas, las cuales se detallan en la tabla 15.

Tabla 15*Propiedades mecánicas de los materiales*

Clase	Propiedad	Unidades
Generales	Densidad	$kg/m^3, lbm/ft^3$
Mecánicas	Módulo de elasticidad, módulo de Young	GPa, Mpsi
	Resistencia a la fluencia o la cedencia	MPa, kpsi
	Resistencia (última) a la tensión	MPa, kpsi
	Resistencia a la compresión	MPa, kpsi
	Resistencia a la fractura	$MPa \cdot m^{1/2}, kpsi \cdot in^{1/2}$
	Dureza	H (Brinell, Vickers)
	Alargamiento	%
	Límite de resistencia a la fatiga	MPa, kpsi
	Tenacidad	$kJ/m^2, Btu/in^2$

Clase	Propiedad	Unidades
Térmicas	Punto de fusión	°C, K, °F, R
	Temperatura de transición vítrea	°C, K, °F, R
	Temperatura máxima de servicio	°C, K, °F, R
	Temperatura mínima de servicio	°C, K, °F, R
	Conductividad térmica	W/m.K, Btu/h.ft.R
	Calor específico	J/kg.K, Btu/lbm.R
	Coefficiente de expansión térmica	1/K, 1/R
	Resistencia al choque térmico	°C, K, °F, R

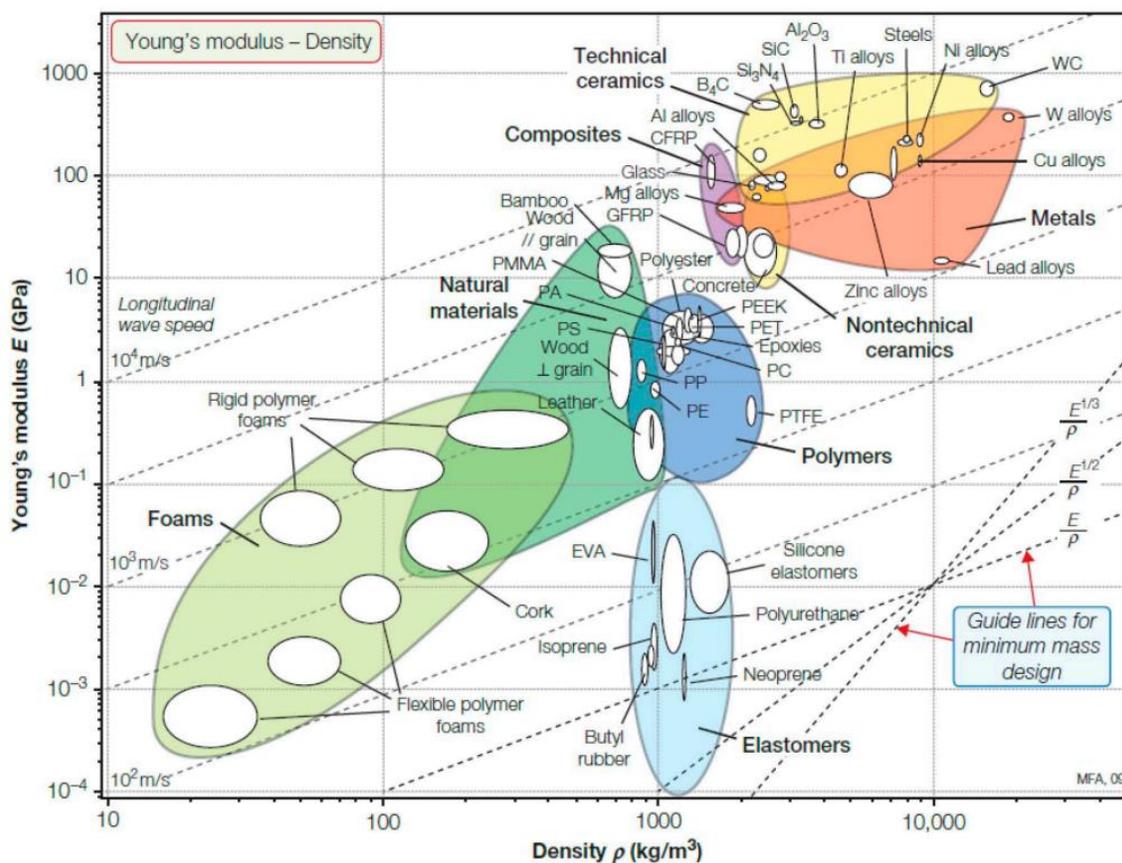
Las propiedades específicas de cada material limitan el rendimiento en determinadas aplicaciones, por lo que es importante, determinar sus valores característicos mediante gráficos de propiedades de materiales desarrollados por Michael Ashby.

Módulo de Elasticidad contra Densidad

La figura 18 muestra la relación entre el módulo de Young (Pendiente de la curva de esfuerzo contra deformación en la zona elástica del material) y la densidad de materiales para determinadas familias.

Figura 18

Relación del módulo de elasticidad con la densidad



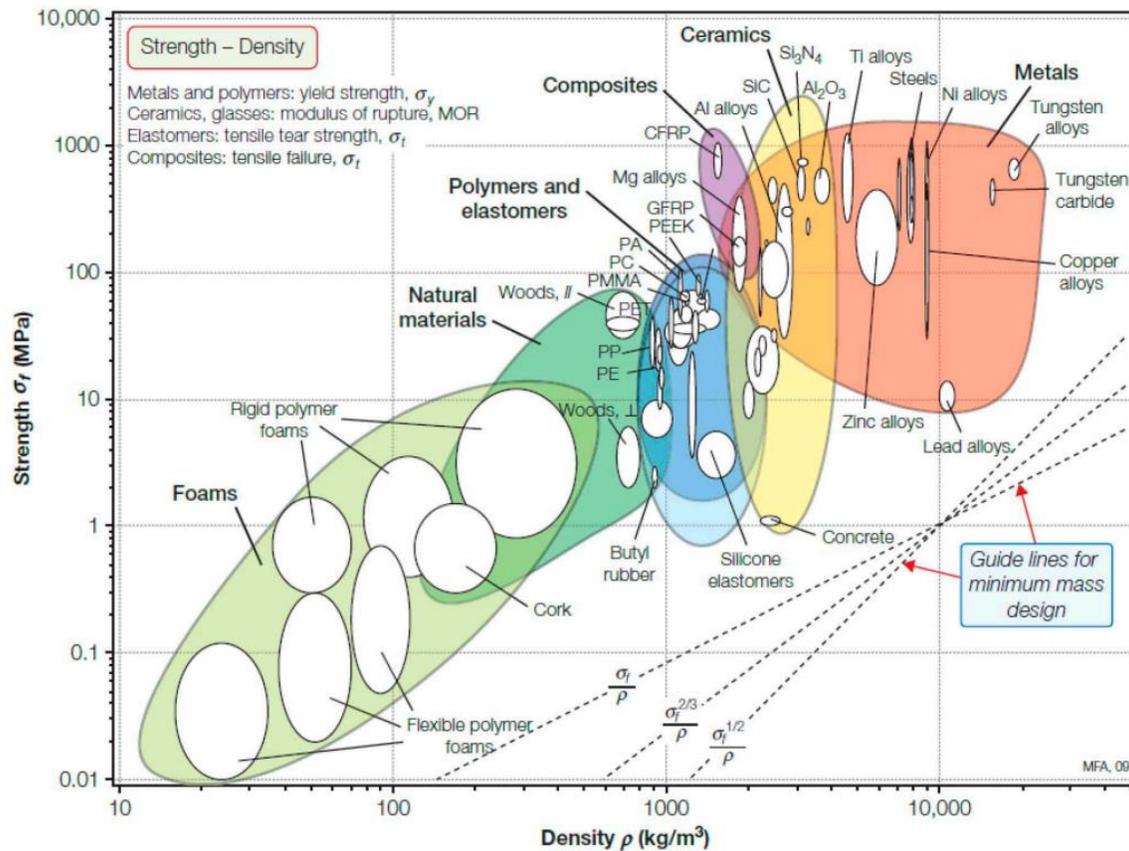
Nota. La figura indica la agrupación de familias en elastómeros, polímeros, cerámicas, metales, materiales compuestos y naturales con sus respectivas aleaciones. Tomado de *Módulo de Young E contra Densidad ρ de Diferentes Materiales* (p.61), por Budynas & Nisbett, 2012.

Resistencia contra Densidad

Relaciona la resistencia y densidad como se muestra en la figura 19, para metales y polímeros se considera como resistencia a la fluencia, en cerámicas y cristales como resistencia al aplastamiento compresivo, para materiales compuestos la resistencia a la tensión y en elastómeros la resistencia al desgarre.

Figura 19

Relación de la resistencia y densidad en materiales



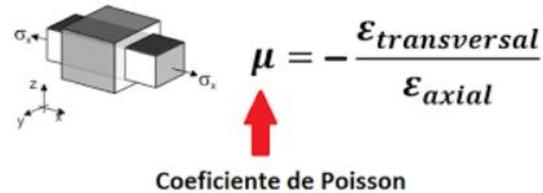
Nota. La figura indica la agrupación de familias en elastómeros, polímeros, cerámicas, metales, materiales compuestos y naturales con sus respectivas aleaciones. Tomado de Módulo de Young E contra Densidad ρ de Diferentes Materiales (p.64), por Budynas & Nisbett, 2012.

Coefficiente de Poisson

Indicativo de la deformación de una parte del material ante la reacción de ciertos esfuerzos, como una cantidad adimensional entre la posición longitudinal y axial como se indica en la figura 20 (INGENIERIA Y MECANICA AUTOMOTRIZ, 2020).

Figura 20

Coeficiente de Poisson



Nota. Tomado de *Fórmula del Coeficiente de Poisson*, por INGENIERIA Y MECANICA AUTOMOTRIZ, 2020.

La Biomecánica del Impacto

Según Delgado et al.(2011) la biomecánica del impacto también se conoce como biomecánica de las lesiones, se define como la ciencia que se encarga del estudio de las sollicitaciones mecánicas (momentos, fuerzas, entre otros) sobre el material biológico con el fin de determinar los daños producidos sobre los tejidos, falla en relación a la mecánica del material como: fractura, lesión, rotura.

Esta disciplina mencionada se centra principalmente en:

- Determinar el mecanismo que produce una lesión determinada, por ejemplo, la fractura de la tibia tiene el mecanismo productor una torsión.
- Predecir el comportamiento del material biológico mediante sollicitaciones mecánicas es decir aplicando fuerzas, momentos, entre otros.
- Determinar y cuantificar el inicio de una lesión hasta llegar al límite de resistencia mecánica del material biológico.

Actualmente en el estudio de la biomecánica del impacto queda mucho por recorrer esto debido a que el comportamiento del material biológico es uno de los más complejos, como pueden ser algunos de ellos: dificultad para mantener las muestras con sus propiedades mecánicas, inconvenientes para obtener probetas ideales para los distintos ensayos y así como la dificultad de generar el trabajo de la muestra como en el interior de organismo.

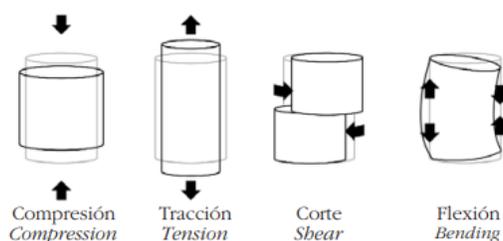
Aplicación de la Mecánica Clásica en Huesos

Según Caeiro et al. (2013) el hueso se relaciona con el estudio mecánico y la ciencia de los materiales cuando se somete a determinada carga, puede ser considerado como un tejido o una estructura de acuerdo a funciones tanto fisiológicas como mecánicas, respectivamente.

La fuerza o carga se manifiesta en diferentes formas de aplicación como la compresión, tracción y cizalladura o corte. También existen esfuerzos de flexión basados en la tracción y compresión con dirección normal a la fuerza aplicada como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Fuerzas que se someten en un hueso

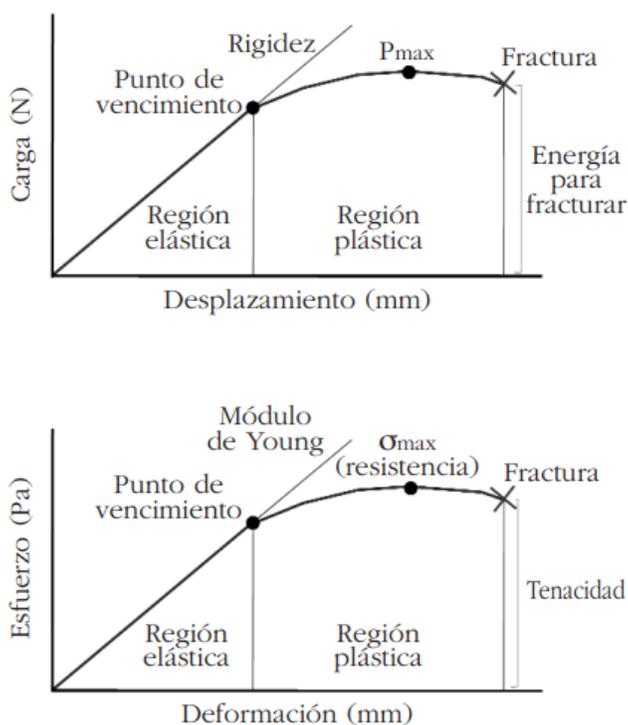


Nota. En la figura el contorno gris indica la geometría inicial de la muestra, mientras que el contorno de color negro la muestra final después de la aplicación de la carga. Tomado de “Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos” (p.45), por Caeiro et al., 2013.

La deformación total del hueso en relación a la dirección de la fuerza aplicada permite determinar la resistencia y la rigidez de la estructura (hueso) en una curva de carga-desplazamiento, sin embargo, es importante conocer una estandarización mediante curvas de esfuerzo-deformación para comparar materiales distintos, o a su vez puede normalizarse en función de las dimensiones del objeto. En la figura 22 se muestra la relación de curvas correspondientes para la normalización.

Figura 22

Propiedades mecánicas del hueso en la normalización



Nota. En la figura se muestra la normalización de la curva carga-desplazamiento (arriba) en esfuerzo-deformación (abajo). Adaptado de “Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos” (p.46), por Caeiro et al., 2013.

Gravedad de Lesión Anatómica

Según Abajas (2016) una de las escalas que permite evaluar la gravedad de las lesiones basadas en anatomía corporal es la AIS, misma que fue desarrollada en la década de los 70 por la Asociación para el Avance de la Medicina Automotriz (AAAM), se define como una codificación de gravedad global de lesiones específicamente en nueve regiones del cuerpo (cabeza, cara, cuello, tórax, abdomen, columna vertebral, extremidades superiores – inferiores y área corporal externa), así también considera una escala de importancia en 6 puntos como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16

Código de gravedad del AIS

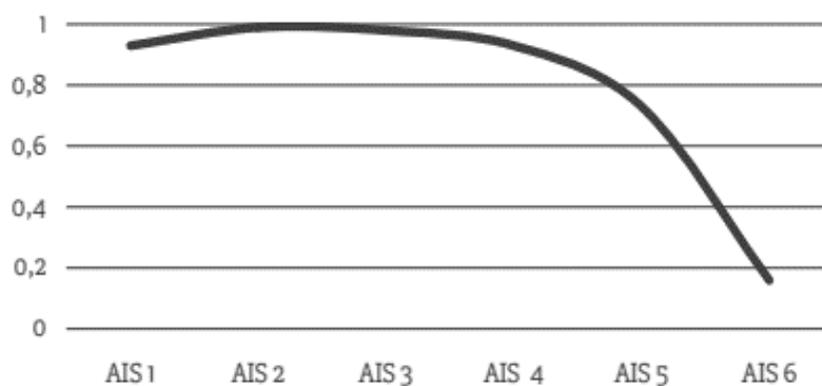
Código de gravedad del AIS	
1	Menor
2	Moderado
3	Serio
4	Grave
5	Crítico
6	Máximo

Nota. La tabla muestra una escala ordinal donde 1 equivale a una lesión menor y así como 6 a una gravedad máxima que actualmente no existe tratamiento. Tomado de *Código de Gravedad del AIS*, Abajas , 2016.

Actualmente la evolución de la escala AIS ha permitido un mayor detalle de la gravedad en las lesiones, así en la figura 23 se muestra la relación clara que existe entre la gravedad y mortalidad.

Figura 23

Probabilidad de supervivencia según valores AIS



Nota. Como se observa en la figura existe una relación no lineal, debido a que la mortalidad no es componente de la gravedad. Tomado de *Probabilidad de Supervivencia Según Valores AIS*, Abajas , 2016.

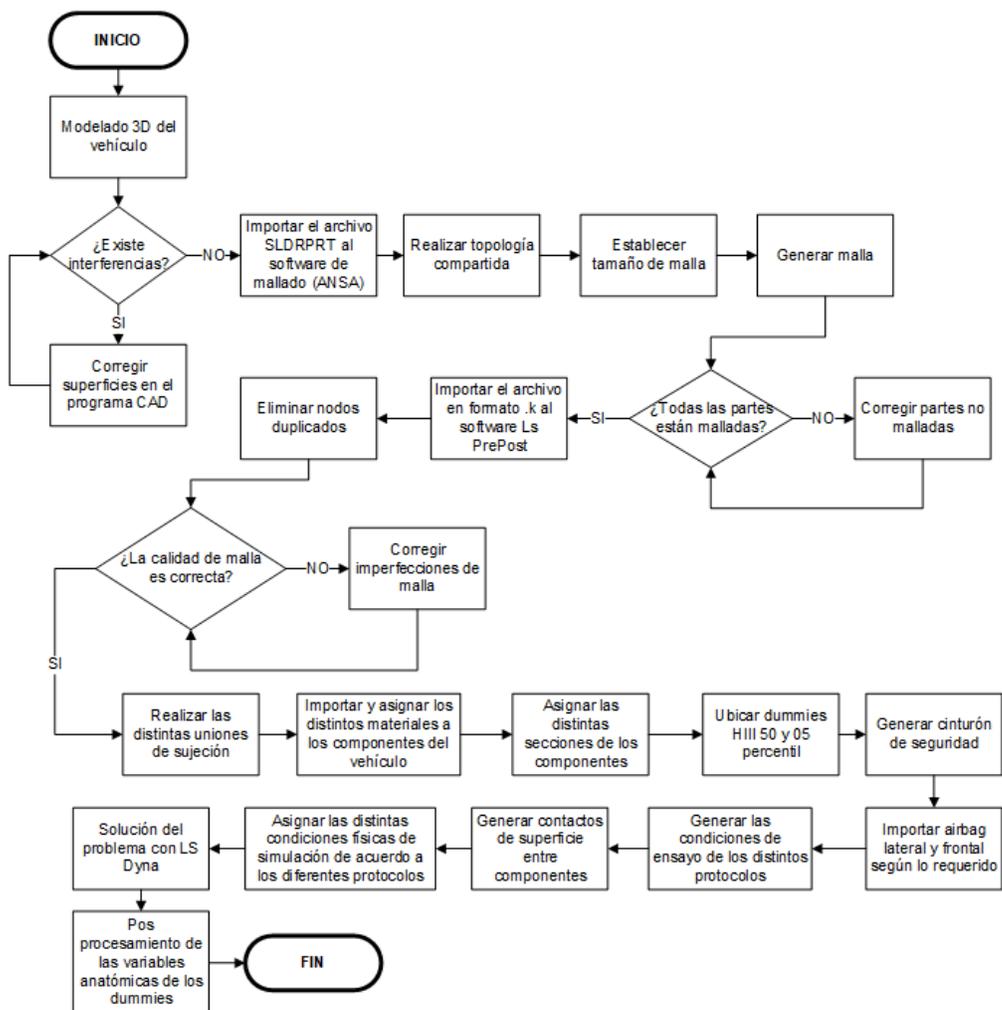
Capítulo III

Metodología de Simulación Explícita en Colisiones

La metodología de simulación explícita se desarrolla bajo el procedimiento detallado en la figura 24.

Figura 24

Procedimiento de la simulación explícita



Validación del Software

El ensayo de impacto dinámico de una masa por caída libre contra una barra estructural de sección circular, dispone de una configuración específica tal como se muestra en la figura 25, sus principales características geométricas y propiedades mecánicas son:

- Tubo de acero estructural de sección circular como se detalla en la tabla 17:

Tabla 17

Características del tubo de acero estructural

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Longitud	L	825 mm
Diámetro medio	D_m	35 mm
Espesor	t	1 mm
Módulo de Young	E	200 GPa
Densidad de masa	ρ	$7.89 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Radio de Poisson	ν	0.3
Límite de fluencia	SIGY	0.271 GPa

- Impactador de forma cilíndrica como de detalla en la tabla 18:

Tabla 18

Características del impactador

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Longitud	L	100 mm
Diámetro	D	100 mm
Masa	m	7.43 Kg
Altura de caída	H	500 mm
Módulo de Young	E	200 GPa
Densidad de masa	ρ	$7.89 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Radio de Poisson	ν	0.3
Límite de fluencia	SIGY	0.271 GPa

Tabla 19*Deflexión estática*

Componentes	Unidad	Valor	Ecuación 1	Deflexión estática
Masa del impactador [m]	kg	7.43	$\delta_{est} = \frac{mgl^3}{192EI}$	mm
Gravedad [g]	m/s ²	9.81		0.06325
Longitud de la barra [l]	m	0.825		
Módulo de elasticidad (E)	GPa	200		
Inercia sección del tubo x10 ⁴	m ⁴	1.685		

2. Determinar el coeficiente dinámico en función de la ecuación 2, como se detalla en la tabla 20.

Ecuación 2*Coeficiente dinámico*

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{est}}}$$

Tabla 20*Coeficiente dinámico*

Componentes	Unidad	Valor	Ecuación 2	Coeficiente dinámico
Altura del impactador [H]	mm	500	$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{est}}}$	-
Deflexión estática [δ_{est}]	mm	0.06325		126.743

3. Calcular la deflexión dinámica en función de la ecuación 3, como se muestra en la tabla 21.

Ecuación 3*Deflexión dinámica*

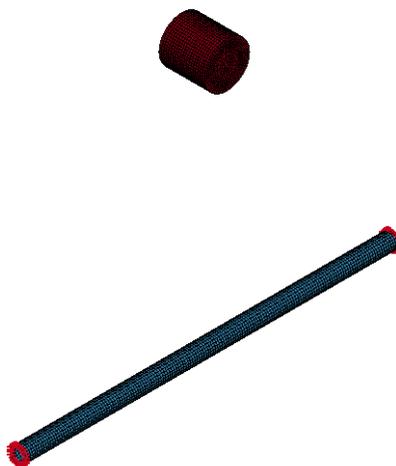
$$\delta_{din} = K_d \delta_{est}$$

Tabla 21*Deflexión dinámica*

Componentes	Unidad	Valor	Ecuación 3	Deflexión dinámica
Coeficiente dinámico [K_d]	-	126.743	$\delta_{din} = K_d \delta_{est}$	mm
Deflexión estática [δ_{est}]	mm	0.06325		8.016

Validación mediante Software

Con el modelado de la barra y el impactador en el software *SolidWorks* (Versión estudiantil) con las dimensiones y consideraciones señaladas en la figura 25, importar el archivo en formato step al software *Ls PrePost* para generar el mallado de los componentes, la asignación de materiales y propiedades mecánicas, asignación de secciones, creación de contacto entre impactador y barra, restricción de los extremos de la barra y la asignación de la gravedad en las unidades correspondientes como se observa en la figura 26.

Figura 26*Componentes mallados en Ls PrePost*

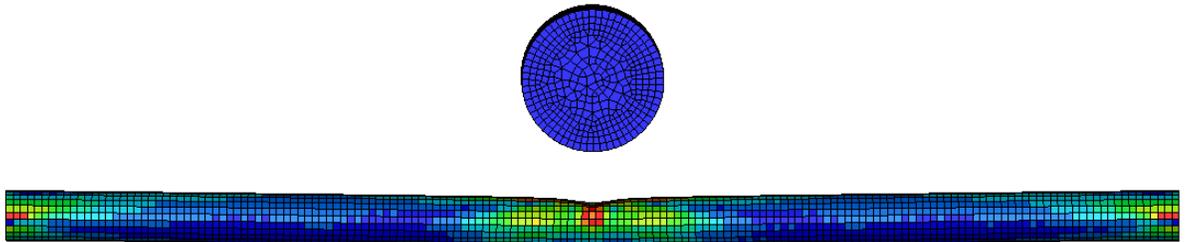
Nota. En la figura se muestra un mallado de 5 mm para ambos componentes así también la asignación del material MAT 024 con las propiedades mecánicas señaladas, una sección tipo

Shell para el impactador y la barra con una sección de 20 mm y 1 mm respectivamente así también la creación de contacto entre el impactador y la barra mediante la carta de control *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*.

Para ejecutar la simulación se considera un tiempo de 2000 ms esto debido a la altura considerada para el impacto así también la fijación de nodos en los extremos de la barra, a continuación en la figura 27 se observa la deflexión generada por el impacto en caída libre.

Figura 27

Resultados del impacto simulado

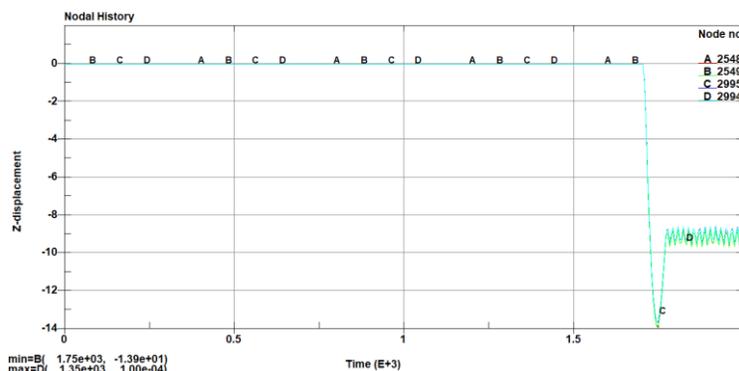


Nota. La figura muestra la una deflexión generada en la barra en la parte central debido al impacto.

Con la finalidad de determinar la deflexión máxima generada de forma exacta en la barra, se identifican los nodos que reciben el impacto los cuales son : 2548, 2549, 2994 y 2995, para obtener la gráfica característica como se muestra en la figura 28.

Figura 28

Deflexión máxima mediante simulación



Nota. La figura muestra el resultado de deflexión máxima la cual se encuentra entre 9 mm aproximadamente, una vez estabilizada la deflexión, el pico máximo presente en 1750 ms se debe a la configuración fija de los extremos de la barra.

En conclusión, al comparar el modelo analítico y la simulación, se tiene una diferencia de 0.84 mm en contra del modelo matemático, relativamente bajo y próximo.

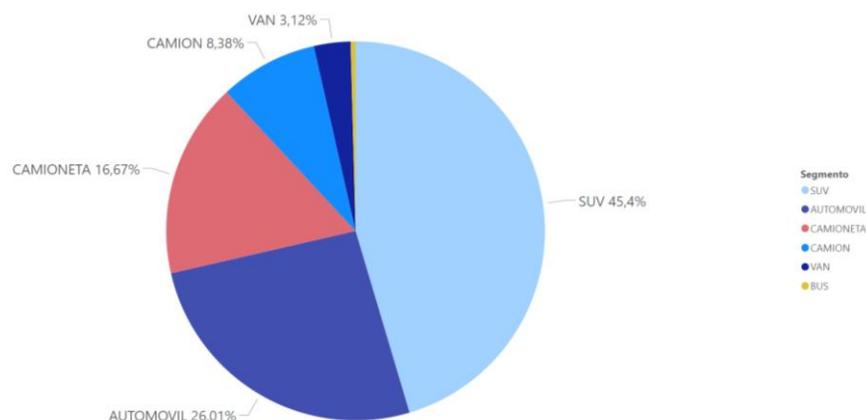
Modelado 3D con Programa CAD

Selección del Vehículo Base

Según la ASOCIACIÓN DE EMPRESAS AUTOMOTRICES DEL ECUADOR (AEADE, 2022) con registro del 10 de mayo del 2022, presenta porcentualmente la venta acumulativa de vehículos del periodo enero-abril en sus diferentes categorías, como se muestra en la figura 29, donde principalmente resalta el segmento SUV con 45.5 %.

Figura 29

Venta acumulativa de vehículos de enero-abril 2022



Nota. Tomado de *Ventas Históricas de Vehículos*, por ASOCIACIÓN DE EMPRESAS AUTOMOTRICES DEL ECUADOR, 2022.

El top 5 de los segmentos más vendidos tipo SUV, correspondiente al mismo periodo, se encuentra en el detalle de la tabla 22.

Tabla 22

Segmentos tipo SUV

Marca	Modelo	Unidades
Chevrolet	Captiva LTZ Turbo AC 1.5 5P 4x2 TM	1 491
Chery	Tigo 2 AC 1.5 5P 4x2 TM	1 198
Jetour	X70 II AC 1.5 5P 4x2 TM	1 169
Shineray	SWM G01 AC 1.5 5P 4x2 TM	977
Renault	Duster Intens AC 1.6 5P 4x2 TM	953
Otros		14 223
TOTAL		20 011

Nota. Tomado de *Modelos más vendidos por segmentos-Top 5*, por ASOCIACIÓN DE EMPRESAS AUTOMOTRICES DEL ECUADOR, 2022.

Características del Primer Modelo. El modelo se basa en el vehículo tipo SUV con mayor venta en el periodo enero-abril del 2022, sus características se detallan en la tabla 23.

Tabla 23

Características del primer modelo

Vehículo	Captiva LTZ Turbo AC 1.5 5P 4x2 TM	
Configuración	Bastidor	
	Monocasco	
Sistemas	Seguridad Activa	Seguridad Pasiva
	Sistema de frenos ABS + EBD.	Airbags 4, frontales y laterales.
	Cámara de reversa.	Cinturones de 3 puntos para todos sus asientos.
	Control de estabilidad (ESP).	Sistema de anclaje ISOFIX.
	Control de tracción.	Apoyacabezas delanteros y posteriores regulables.
	Asistente de arranque en pendiente (HSA).	
	Sensor de estacionamiento posterior.	
	Inmovilizador antirrobo.	
Características	Dimensiones	
	Largo (mm)	4655
	Ancho (mm)	1835
	Alto (mm)	1760
	Distancia entre ejes (mm)	2750
	Neumáticos	215/55R18
	Peso neto vehicular (kg)	
	1950	
	Número de pasajeros	
	5	

Nota. Tomado de CHEVROLET CAPTIVA TURBO, por Chevrolet, 2021.

Características del Segundo Modelo. Se basa en el modelo de vehículo tipo SUV, ubicado en segunda posición en ventas nacionales, correspondiente al periodo enero-abril del 2022, sus características se detallan en la tabla 24.

Tabla 24*Características del segundo modelo*

Vehículo	Chery -Tiggo 2 AC 1.5 5P 4x2 TM	
Configuración	Bastidor	
	Monocasco	
Sistemas	Seguridad Activa	Seguridad Pasiva
	Seguro de niños en las puertas traseras.	Columna de dirección colapsable.
	Sistema de luces de conducción diurnas led.	Barras de impacto lateral.
	Retrovisores exteriores con luz direccional incorporada.	Airbags 2, conductor y pasajero.
	Sistema antibloqueo de frenos (ABS).	Cinturones de seguridad de 3 puntos.
	Sistema de distribución electrónica de presión de frenado (EBD).	Sistema de anclaje ISOFIX.
	Control de tracción (TCS).	Testigo sonoro de cinturón de seguridad desabrochado para conductor.
	Control electrónico de estabilidad (ESP).	Carrocería con deformación programada.
	Asistente de salida en pendiente (HHC).	Sistema SAFE CAGE de protección de habitáculo de pasajeros.
	Sensor de reversa.	
Características	Dimensiones	
	Largo (mm)	4200
	Ancho (mm)	1760
	Alto (mm)	1570
	Distancia entre ejes (mm)	2555
	Neumáticos	205/55R16
	Peso neto vehicular	
	-	
	Número de pasajeros	
	5	

Nota. Tomado de *CHERY TIGGO 2*, por CHERY, 2021.

Características del Tercer Modelo. El tercer modelo corresponde al tercer puesto con mayores ventas a nivel nacional en el periodo enero-abril del 2022, sus características se detallan en tabla 25.

Tabla 25*Características del tercer modelo*

Vehículo	X70 II AC 1.5 5P 4x2 TM	
Configuración	Bastidor	
	Monocasco	
Sistemas	Seguridad Activa	Seguridad Pasiva
	Dirección electrónica	Airbags 4.
	Sistema ABS	Asiento de conductor ajustable
	Frenos Front/Post: Disco	Cinturones de tres puntos.
	Control de distribución EBD	Barras laterales contra impacto.
	Control de estabilidad ESP	
	Freno de parqueo automático	
	Suspensión delantera: Mc Pherson	
	Suspensión posterior: Enlaces Múltiples	
Características	Dimensiones	
	Largo (mm)	4702
	Ancho (mm)	1900
	Alto (mm)	1710
	Distancia entre ejes (mm)	2745
	Neumáticos	255/45R20
	Peso neto vehicular	
	-	
	Número de pasajeros	
	Tres filas de asientos: 7 pasajeros	

Nota. Tomado de *JETOUR X70*, por GRUPO ROLDAN, 2021.

Características del Modelo Base. El modelo característico, se basa en una geometría general y simplificada, de acuerdo a la categoría considerada bajo la norma NTE INEN 2656, correspondiente a la clasificación vehicular y el RTE INEN 034 de elementos mínimos de seguridad en vehículos automotores, para lo cual, en la tabla 26 se detalla las características del modelo.

Tabla 26*Características del modelo base*

Vehículo	Modelo Representativo	
Configuración	Bastidor	
	Monocasco	
Sistemas	Seguridad Activa	Seguridad Pasiva
	No definida	2 airbags frontales y 1 lateral. Cinturones de 3 puntos sin sistemas de pretensión y retractores. Barras laterales contra impacto. Barra frontal contra impacto. Asientos con apoyacabezas.
Características	Dimensiones aproximadas	
	Largo (mm)	4519
	Ancho (mm)	1832
	Alto (mm)	1680
	Distancia entre ejes (mm)	2683
	Neumáticos	No definido
	Peso neto vehicular	
	Por definir	
	Número de pasajeros	
	5 pasajeros (2 para simulación)	

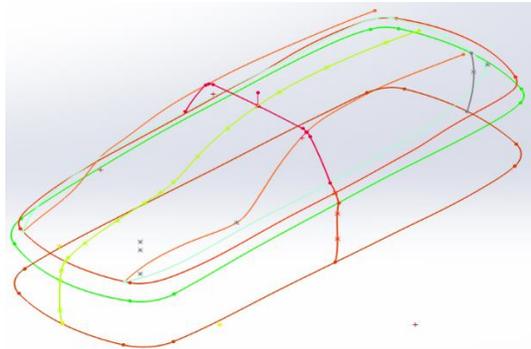
Nota. En la tabla, las dimensiones aproximadas representan en promedio a los tres modelos de referencia. Los datos faltantes como el peso neto vehicular será definido una vez generada la malla, asignado materiales y juntas de unión.

Modelado del Vehículo Tipo SUV

El modelado del vehículo está basado en un croquis 3D como se muestra en la figura 30, mediante curvas de proyección definidas a partir de una geometría 2D, posteriormente con la aplicación de superficies se define el modelo simplificado con los detalles necesarios para el proceso de análisis.

Figura 30

Croquis base del modelo de vehículo tipo SUV

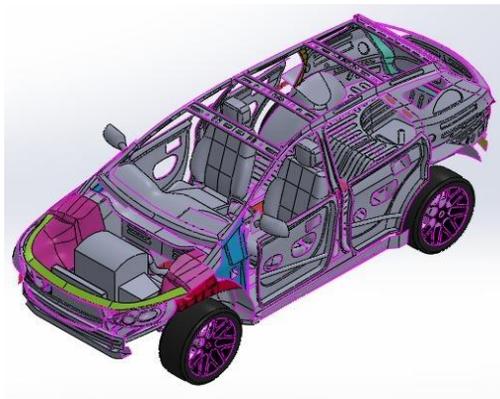


Nota. La figura indica las curvas principales del modelo simplificado, las mismas que son la base para el desarrollo de superficies del vehículo.

El modelo final, dispone de la implementación de los sistemas y autopartes automotrices de forma simplificada y representativa, la estructura del bastidor, travesaños longitudinales y transversales tiene refuerzos estructurales, adicional se incluye barreras contra impactos, así como se muestra en la figura 31.

Figura 31

Modelado del vehículo tipo SUV

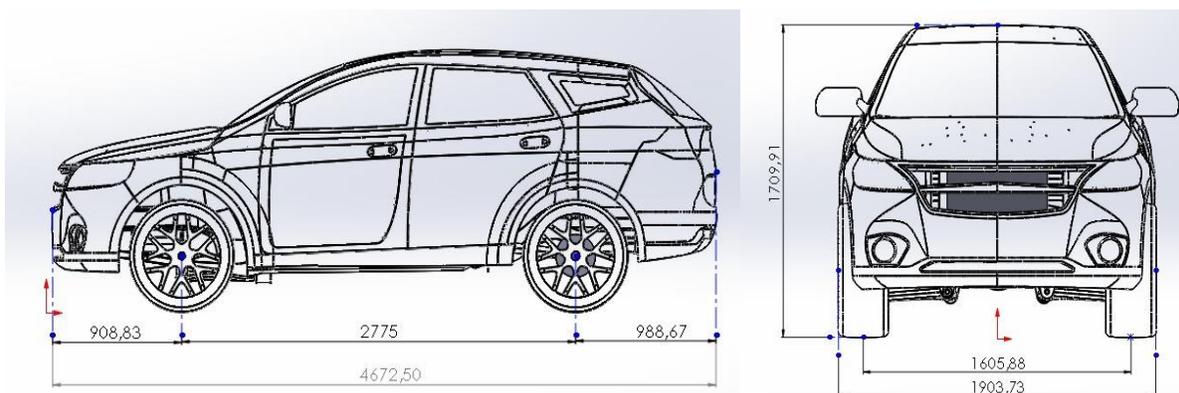


Nota. La figura muestra el modelo comprendido por: bastidor y carrocería completa, parabrisas y vidrios laterales, sistema de transmisión, sistema de dirección, sistema de suspensión, motor y caja de cambios, sistema de refrigeración, sistema de admisión, sistema de escape, tanque de combustible, puertas y otras autopartes.

Las dimensiones principales obtenidas al finalizar el modelado del conjunto automotor, se detallan en la figura 32.

Figura 32

Dimensiones del modelado del vehículo



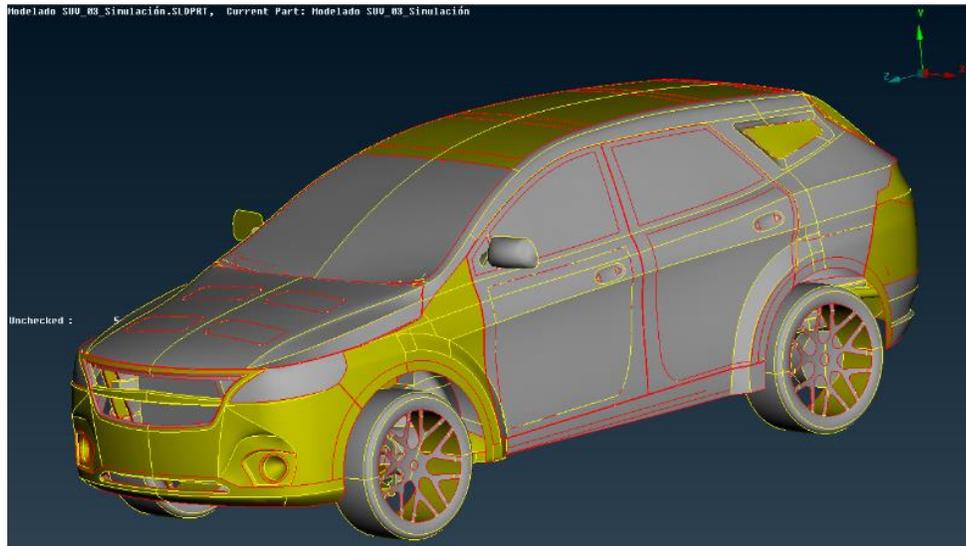
Nota. La figura muestra las dimensiones finales en vista lateral izquierda y vista frontal, las cuales varían aproximadamente hasta 150 mm (largo total), producto del diseño de las autopartes en relación a la geometría característica.

Preparación del Modelo

Para la preparación del modelo del vehículo tipo SUV, se utiliza el software de preprocesamiento ANSA (versión estudiantil), para lo cual, inicialmente se procede a importar el archivo en formato “.SLDPRT”, como se observa en la figura 33 con la finalidad de mantener las unidades de longitud (mm) utilizadas en el software de modelado.

Figura 33

Importación del modelo en el software de preprocesamiento



Nota. En la figura se visualiza las superficies cerradas y abiertas con líneas de color amarillas y rojas correspondientemente en la interfaz de ANSA (versión estudiantil).

Posteriormente, se procede a realizar la fusión de todos los componentes del modelo, con uso del módulo de topología correspondientes a LS DYNA (Licencia obtenida mediante CEND INGENIERÍA S.A detallada en el anexo 1) como se muestra en la figura 34, para lo cual, se utiliza la carta principal “Faces” donde se selecciona la operación “Fuse” y seguido “Project”.

Figura 34

Carta de control TOPO.



A continuación, en la figura 35 se visualiza el procedimiento de fusión de los componentes del modelo, con esto se consigue que las topologías de las distintas superficies del vehículo sean compartidas y permita garantizar un mallado de elementos finitos de forma correcta.

Figura 35

Operación Fuse – Project.



Nota. La figura muestra la ejecución de la operación que tarda varios minutos, esto debido a la cantidad de detalles que contiene el modelo.

Las siguientes operaciones consisten en evaluar y solucionar las interferencias y duplicados entre las superficies del modelo, mediante la herramienta “*Check*” del preprocesador, para proceder con la generación del mallado.

Creación de la malla FEM

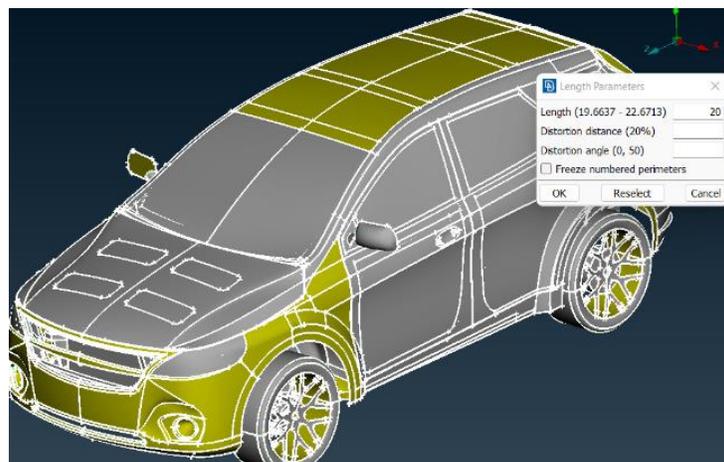
La malla FEM es de discretización y dominio libre, ya que está definida en función del contorno del problema (superficies) debido a que no conlleva un patrón, los elementos generados pueden ser cuadriláteros o triangulares (2D).

Generación de la Malla de Elementos Finitos

Para el mallado del conjunto de superficies del vehículo tipo SUV que está compuesto por 3 448 componentes, se requiere establecer la longitud aproximada entre cada nodo, por consiguiente, basado en los vehículos de la NHTSA para simulación de colisión, el valor es de 20 milímetros, en la figura 36 se muestra el valor establecido como parámetro, a su vez es importante considerar la relación entre la malla FEM y el gasto computacional. A menor longitud del elemento, mayor gasto computacional.

Figura 36

Distancia entre nodos de la malla

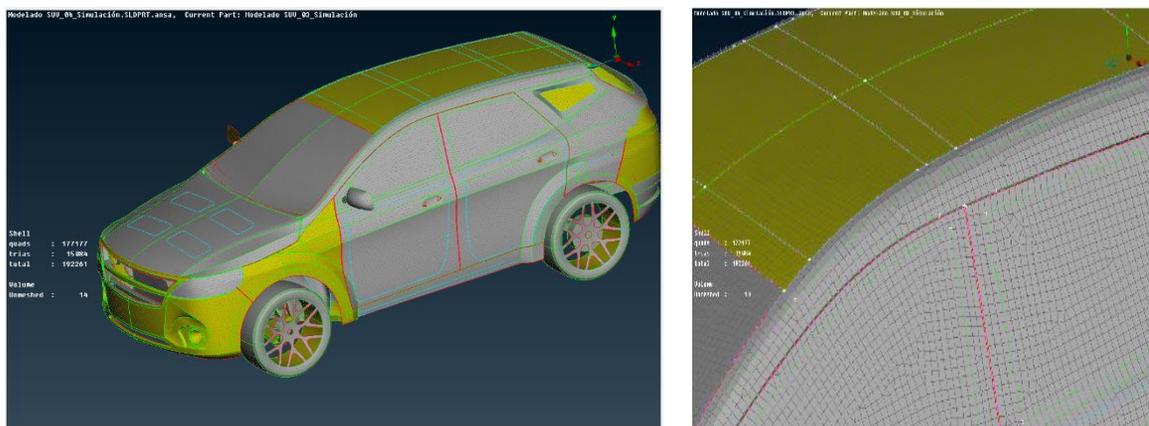


Nota. La figura muestra la longitud de malla, tomando en cuenta que se requiere valores más exactos referenciados en la aplicación real.

La generación de malla es de tipo superficie, una vez realizada mediante el preprocesador de forma automática y manual, en la figura 37 se muestra la malla completa al 100% de 192 261 componentes con matriz de forma cuadrangular y triangular en su mayoría.

Figura 37

Malla completa del vehículo tipo SUV

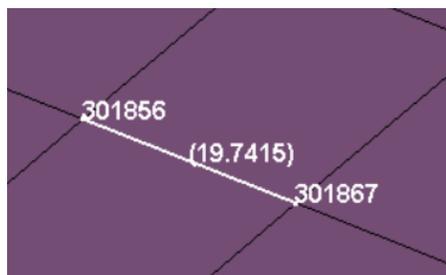


Preparación de la Malla de Elementos Finitos

Mediante el procesamiento de *LS PrePost*, Inicialmente se procede a comprobar la longitud aproximada de la distancia entre nodos, como se indica en la figura 38, con un valor de 19.7415 mm, aproximadamente 20 mm definido en el preprocesador anterior. Es importante considerar las unidades de trabajo definidas en *LS-Dyna* como se muestra en el anexo 2.

Figura 38

Distancia aproximada entre nodos



En el administrador de las cartas de control de *LS PrePost* que se muestra en la figura 39, se observa que la malla de elementos finitos del vehículo tipo SUV está formada por 292 partes, 192 261 elementos y 185 305 nodos.

Figura 39

Administrador de las cartas de control

Keyword Manager

Keyword Edit | Keyword Search

Edit: PART Edit

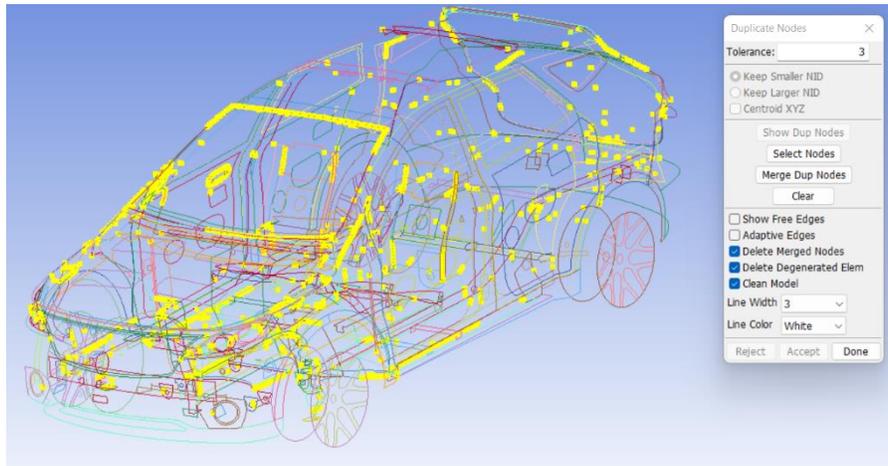
Model All RefBy

Name	Count
ELEMEN	192261
KEYWORD	1
NODE	185305
PART	292
SECTION	292
SET	1
TITLE	1

La preparación de la malla de elementos finitos consiste en verificar nodos duplicados y posteriormente fusionar aquellos que se encuentren en una tolerancia que no afecte a las superficies abiertas, en la figura 40 se muestra los nodos duplicados en las geometrías.

Figura 40

Inspección de nodos duplicados



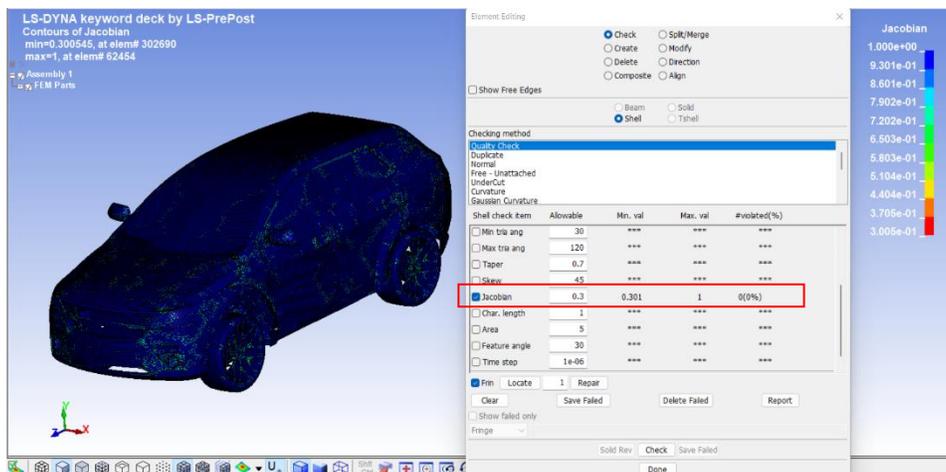
Nota. La figura indica los nodos duplicados en las uniones de los elementos tipo superficie fusionados a 3 mm de tolerancia, considerando la independencia de ciertos componentes.

Control de Calidad de la Malla de Elementos Finitos

El control de la calidad de malla está basado en el índice de Jacobiano, según Janzen (2012) establece la fiabilidad en base a la medida de la desviación de un elemento en su forma original sea cuadrilátero o de forma triangular, es aplicado para sólidos y superficies en el rango de 1 hacia -1, en función del desorden de la calidad, para lo cual ANSYS recomienda usar un valor igual o superior a 0.3 para elementos tipo superficie y 0.2 para sólidos. En la figura 41 se muestra el criterio Jacobiano de la calidad de malla del vehículo tipo SUV para un valor de 0.3 como aceptable.

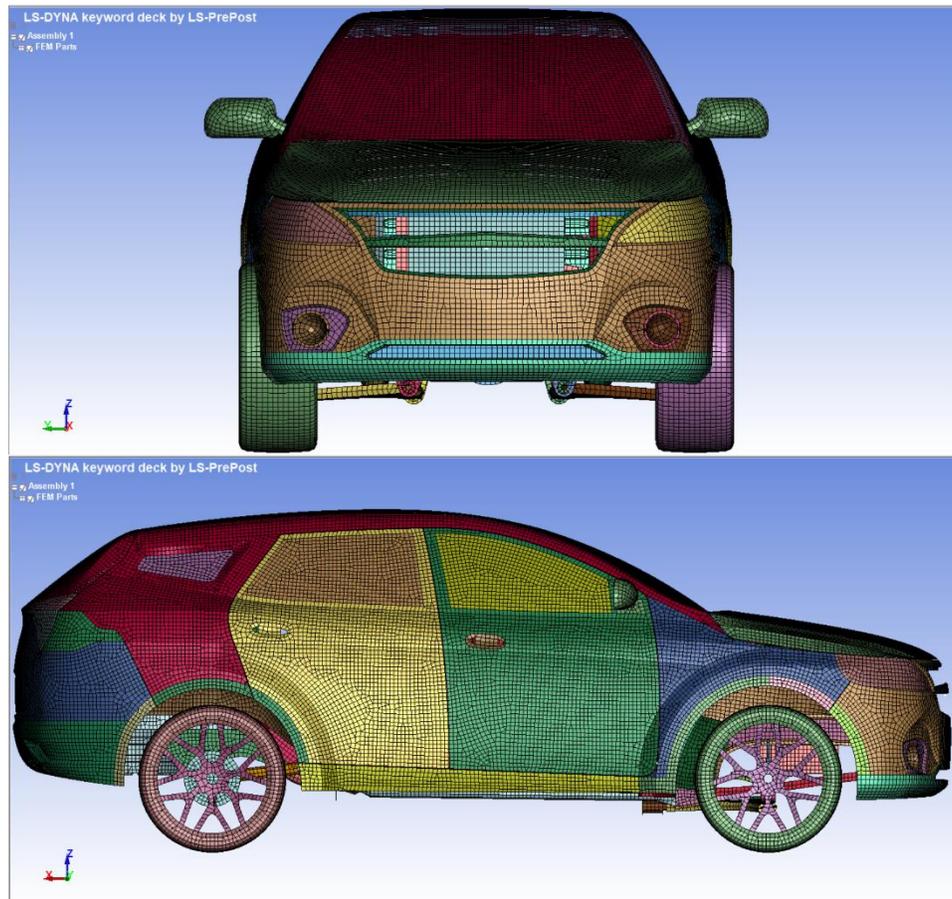
Figura 41

Evaluación del índice de Jacobiano-correctido



Nota. En la figura se muestra la calidad de malla de elementos finitos en base al criterio Jacobiano con un valor mínimo de 0.3000545 y máximo 1.

En la figura 42 se muestra la malla preprocesada del modelo final, con las condiciones necesarias para el desarrollo de la simulación.

Figura 42*Malla preprocesada completa*

Nota. La figura indica la malla preprocesada del modelo, vista frontal y lateral derecha.

Designación de Materiales y Secciones al Vehículo Base

Los datos característicos de los materiales están referenciados del vehículo Toyota Yaris y RAV 4 de la NHTSA (Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras), de libre descarga para simulación de colisiones, los mismo son:

- MAT 001, *Elastic*
- MAT 024, *Piecewise linear plasticity*
- MAT 123, *Modified piecewise linear plasticity*

Material Elástico

Corresponde al material *MAT_ELASTIC*, de tipo elástico isotrópico, disponible para vigas, láminas y elementos sólidos, donde sus propiedades mecánicas no varían con la dirección, es decir sus valores característicos son idénticos en todas las direcciones, tiene suposiciones de linealidad y elasticidad. En la figura 43, se detalla la carta de control correspondiente a sus propiedades mecánicas.

Figura 43

MAT_001 Elastic

The screenshot shows a software interface for defining material properties. The title bar reads "Keyword Input Form". At the top, there are buttons for "NewID", "MatDB", "RefBy", "Pick", "Add", "Accept", "Delete", "Default", "Done", and "Setting". Below these are checkboxes for "Use *Parameter" and "Comment", and a text field for "(Subsys: 1 Modelado SUV Transformado_08_Simulacion.key)". The main area is titled "*MAT_ELASTIC_(TITLE) (001) (2)". Under the "TITLE" section, the text "Motor y caja" is entered. A table of properties is displayed:

1	MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT_USED
	12002712	7.890e-06	200.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.0

Below the table is a "COMMENT:" section with a text area. At the bottom, a status bar shows: "Total Card: 2 Smallest ID: 12002712 Largest ID: 14003079 Total deleted card: 0". On the right side of the window, a list of cards is visible, including "12002712 Motor y caja" and "14003079 Ruedas".

Nota. La figura muestra las propiedades necesarias de la carta de control del MAT_001, donde MID: Material de identificación; RO: Densidad de masa; E: Módulo de Young; PR: Radio de Poisson; Las propiedades restantes quedan por defecto.

Material de Plasticidad Lineal Por Partes

El *MAT_PIECEWISE LINEAR PLASTICITY*, es un material elastoplástico, con tensión arbitraria frente a la curva de deformación, se puede definir una dependencia arbitraria de la

velocidad de deformación, se aplica en láminas y sólidos. En la figura 44, se detalla la carta de control correspondiente.

Figura 44

MAT_024 Piecewise Linear Plasticity

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Modelado SUV Transformado_08_Simulacion.key) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (5)

TITLE
Bastidor estructural

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
2000297	7.890e-06	200.00000	0.3000000	0.4000000	0.0	1.000e+21	0.0	
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
8.0000000	8.0000000	2100400	0	0.0				
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

COMMENT:

Total Card: 5 Smallest ID: 2000297 Largest ID: 16003996 Total deleted card: 0

2000297 Bastidor estructural
6001345 Elementos estructu
8002212 Faros
10002215 Mascarilla
16003996 Tablero

Nota. La figura indica las propiedades necesarias de la carta de control del MAT_024, MID: Material de identificación; RO: Densidad de masa; E: Módulo de Young; PR: Radio de Poisson; SIGY: Límite de fluencia; LCSS: Curva de deformación; Las propiedades restantes quedan por defecto correspondientes a la tasa de deformación y valores efectivos de la deformación plástica.

Material Lineal Plástico Modificado

Corresponde al *MAT_ MODIFIED PIECEWISE LINEAR PLASTICITY*, es un material de tipo elastoplástico, que admite una curva de deformación y está en dependencia de la velocidad de la misma, se aplica para elementos de vaciado y macizos. En la figura 45, se detalla la carta de control correspondiente.

Figura 45

MAT_ 123 Modified Piecewise Linear Plasticity

Keyword Input Form

NewID: 18004448 Vidrios y parabrisas

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Modelado SUV Transformado_08_Simulacion.key) Setting

*MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (123) (1)

TITLE: Vidrios y parabrisas

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	18004448	2.500e-06	70.000000	0.2200000	0.0300000	1.0000000	0.0150000	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP	EPSTHIN	EPSMAJ	NUMINT
	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	1.0000000
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 18004448 Largest ID: 18004448 Total deleted card: 0

Nota. La figura indica las propiedades necesarias de la carta de control del MAT_123, MID: Material de identificación; RO: Densidad de masa; E: Módulo de Young; PR: Radio de Poisson; SIGY: Límite de fluencia; ETAN: 1 (lineal); Las propiedades restantes quedan por defecto correspondientes a la tasa de deformación y valores efectivos de la deformación plástica.

Secciones de los Componentes

Las secciones del modelo son de tipo superficie, por lo cual es necesario definir diferentes secciones en función del espesor ideal para cada conjunto de componentes o elementos. En la figura 46, se indica la carta de control característica para la creación de la misma.

Figura 46

Carta de control para secciones tipo superficie

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment

(Subsys: 1 Modelado SUV_07_Simulacion.key)

*SECTION_SHELL_(TITLE) (13)

TITLE

Elementos estructurales 1 mm

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/JRID	ICOMP	SETYP
1	2	1.0000000	2	1	0	0	1
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.
 Replace Insert
 Delete Help

- 1 Elementos estructurales 1 mm
- 2 Bastidor estructural 4.75 mm
- 3 Motor y caja 20 mm
- 4 Vidrios y parabrisas 4 mm
- 5 Ruedas 5 mm
- 6 Rines 3 mm
- 7 Mascanillas 2.4 mm
- 8 Faros 2 mm
- 9 Sistemas automotrices 15 mm
- 10 Bases motor 4.75 mm
- 11 Tablero 3.47 mm
- 12 cojines y asientos 5 mm
- 13 Estructura asientos 4 mm

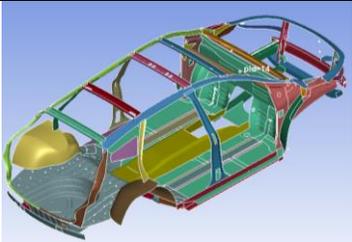
Nota. La figura muestra las propiedades necesarias de la carta de control *SECTION SHELL*, SECID: Sección ID; ELFORM: Formulación del elemento (predeterminado); T1: espesor en mm; Las propiedades restantes quedan por defecto.

Asignación de Materiales

La asignación de materiales para cada conjunto de componentes específicos se indica en la tabla 27, los cuales corresponde a los materiales MAT 001, MAT 024 y MAT 123, mediante la importación de las cartas de control correspondientes de la librería de NHTSA. De la misma manera es necesario determinar la sección adecuada para cada uno.

Tabla 27

Asignación de materiales a los componentes del vehículo

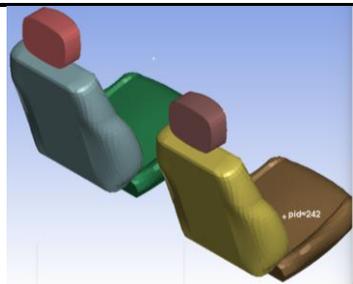
Bastidor estructural	
	MAT_024 Acero-Anexo 3 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06 Módulo de Young (GPa): 200 Radio de Poisson: 0.3 Límite elástico (GPa): 0.40 Sección (mm): 4.75

Elementos estructurales



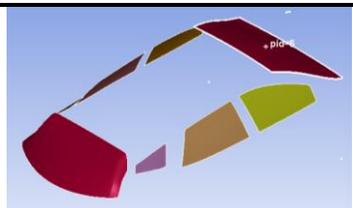
MAT_024 Acero-Anexo 4
 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
 Módulo de Young (GPa): 200
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.271
 Sección (mm): 1

Cojines de asientos



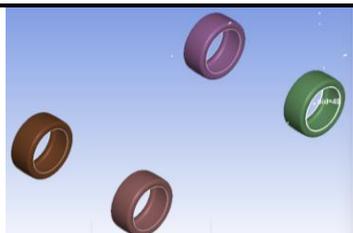
MAT_001 Polímero-Anexo 5
 Densidad de masa (kg/mm^3): 1.750e-06
 Módulo de Young (GPa): 0.3
 Radio de Poisson: 0.3
 Sección (mm): 5

Vidrios y parabrisas



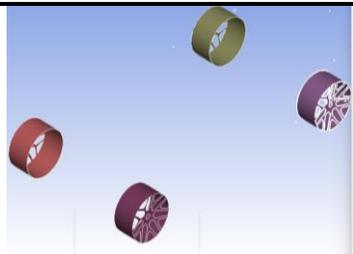
MAT_123 Cerámico Metal-Anexo 6
 Densidad de masa (kg/mm^3): 2.500e-06
 Módulo de Young (GPa): 70
 Radio de Poisson: 0.22
 Límite elástico (GPa): 0.03
 Sección (mm): 4

Ruedas



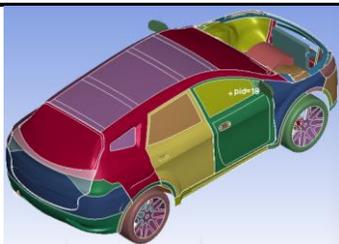
MAT_024 Acero
 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
 Módulo de Young (GPa): 200
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.271
 Sección (mm): 8

Rines



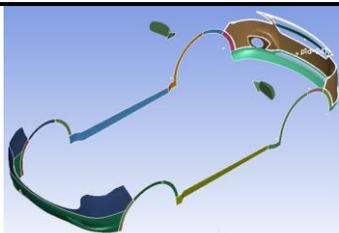
MAT_024 Acero
 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
 Módulo de Young (GPa): 200
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.271
 Sección (mm): 12

Motor y caja de cambios



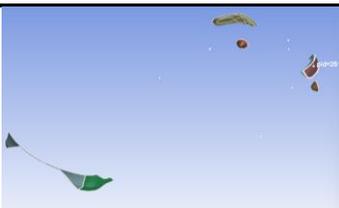
MAT_001 Acero-Anexo 7
 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
 Módulo de Young (GPa): 200
 Radio de Poisson: 0.3
 Sección (mm): 20

Mascarillas



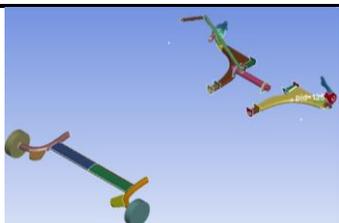
MAT_024 Elastómero-Anexo 8
 Densidad de masa (kg/mm^3): 1.415e-06
 Módulo de Young (GPa): 1
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.02
 Sección (mm): 2.4

Faros



MAT_024 Cerámico Metal-Anexo 9
 Densidad de masa (kg/mm^3): 2.950e-06
 Módulo de Young (GPa): 1
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.02
 Sección (mm): 2

Sistemas automotrices



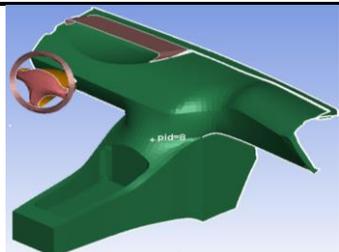
MAT_024 Acero
 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
 Módulo de Young (GPa): 200
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.271
 Sección (mm): 15

Bases del motor



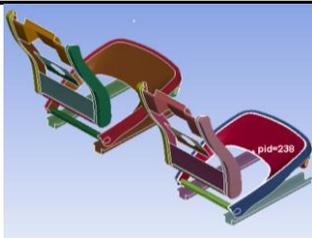
MAT_024 Acero
 Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
 Módulo de Young (GPa): 200
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.40
 Sección (mm): 4.75

Panel del vehículo



MAT_024 Elastómero-Anexo 10
 Densidad de masa (kg/mm^3): 9.150e-07
 Módulo de Young (GPa): 1
 Radio de Poisson: 0.3
 Límite elástico (GPa): 0.02
 Sección (mm): 3.47

Estructura de asientos



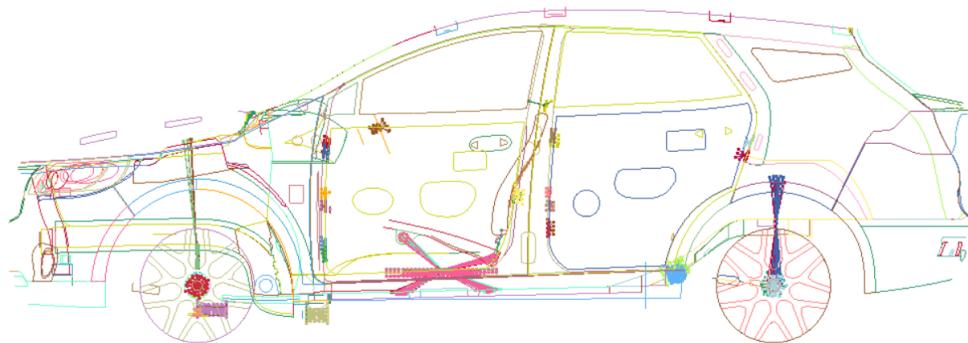
MAT_024 Acero
Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06
Módulo de Young (GPa): 200
Radio de Poisson: 0.3
Límite elástico (GPa): 0.271
Sección (mm): 4

Unión entre Componentes

En el modelo simplificado se utiliza la unión de cuerpo rígido (*NODAL_RIGID_BODY*) en todos los componentes representativos a compuertas, componentes de suspensión, dirección y finalmente en soportes de la estructura de los asientos. En la figura 47, se muestra las uniones definidas en elementos de tipo superficie mediante la creación de entidades.

Figura 47

Ubicación de NODAL_RIGID_BODY



Nota. La figura indica los contactos de unión requeridos en componentes específicos en una vista lateral izquierda del vehículo tipo SUV.

Peso Neto Vehicular del Modelo

El modelo final incluido todas las autopartes que tengan incidencia en la simulación, asignación de materiales, definición de secciones y contactos de unión necesarias, tiene un peso neto vehicular de 2 166.92 kg, tal como se muestra en la figura 48.

Figura 48

Peso neto vehicular del modelo



Nota. La figura indica el valor del peso neto vehicular obtenido mediante la herramienta de medida de elementos en *LS PrePost*. Adicional se observa las coordenadas del centro de gravedad (CG) del vehículo en una vista lateral derecha.

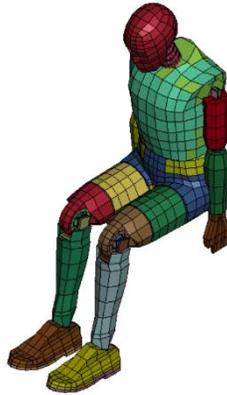
Dummies para Ensayos

Dummy Fast Híbrido III 50 Percentil

Modelos desarrollados por *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC), para el entorno de LS-DYNA. El *Dummy* utiliza un sistema de unidades en milímetro (mm), milisegundo (ms), kilogramo (kg) y kilo newton (kN). En la figura 49, se observa el modelo de la familia HIII rápido 50 percentil en posición estándar que representa antropomórficamente a un hombre.

Figura 49

Dummy rápido H-III 50 percentil



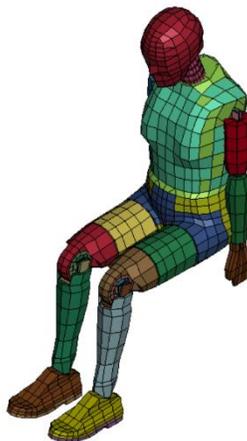
Nota. La figura muestra el modelo rápido HIII 50 percentil con calibración estándar, formado por 147 parte con secciones de tipo viga, discretos, superficies y sólidos, así como uniones, articulaciones y contactos con un peso total de 78.987 kg.

Dummy Fast Híbrido III 05 Percentil

En la figura 50 se presenta al modelo de la familia HIII rápido 05 percentil, en posición estándar el cual representa antropomórficamente a una mujer.

Figura 50

Dummy rápido H-III 05 percentil



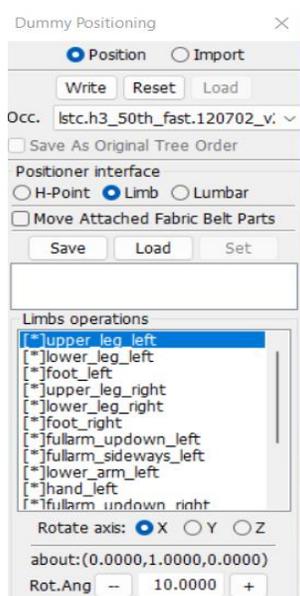
Nota. La figura indica el modelo HIII 05 percentil con calibración estándar, formado por 147 parte con secciones de tipo viga, discretos, superficies y sólidos, así como uniones, articulaciones y contactos con un peso total de 50.5639 kg.

Ubicación de Dummies

La ubicación de los modelos debe ser atendida al espacio designado para el pasajero (HIII 05 percentil) y conductor (HIII 50 percentil), así como también de acuerdo a consideraciones generales de los reglamentos y protocolos de evaluación, para lo cual se utiliza la herramienta *Dummy Positioning*, la cual se observa en la figura 51. El procedimiento se realiza en función de la rotación o traslación del punto H y la rotación de las extremidades (*Limbs*).

Figura 51

Herramienta para posicionar el Dummy



Nota. La figura indica que la posición puede efectuarse mediante *Positioner interface*, entre las tres opciones indicadas, y seguidamente la traslación o rotación adecuada.

El *Dummy* HIII 50 percentil en el vehículo debe atender a una posición de manejo, en relación a las extremidades del cuerpo, cabeza, cuello y lumbar, mientras que el *Dummy* HIII 05 percentil debe tener una posición normal arbitraria, como se indica en la figura 52 para ambos casos.

Figura 52

Posición de los modelos en el vehículo



Nota. La figura muestra la posición de los dummies, tanto del conductor como acompañante en el vehículo base mediante las vistas: lateral izquierda, lateral derecha y frontal.

Contactos de Superficie

Trata la forma de interacción entre partes inconexas, específicamente entre superficies según el requerimiento del modelo, puede ser mediante set de: segmentos, elementos tipo superficie, partes o nodos. De la misma manera, partes individuales, para lo cual se utiliza dos tipos de contactos:

- *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*
- *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*

Contacto de Superficie Simple

En análisis de impactos, donde la deformación varía demasiado y no existe la predeterminación de los contactos, se recomienda implementar un *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*, para detectar automáticamente los mismos, correspondiente a un mismo conjunto de superficies, en la figura 53 se indica la carta de control respectiva.

Figura 53

Carta de control *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Vehiculo SUV_Dummies_10.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (1)

1	CID	TITLE													
		MPP1 MPP2													
2	IGNORE	BCKT	LCCKCT	NS2TRK	INITLTR	PARMAX	UNUSED	CPARM6							
	0	200		3	2	1.0005	0								
3	UNUSED	CHKSEGG	PENSF	GRPABLE											
	0	1.0	0												
4	SURFA	SURFB	SURFATYP	SURFBTYP	SABOXID	SBBOXID	SAPR	SBPR							
			0	0			0	0							
5	ES	ED	DC	VC	VDC	PENCHK	BI	DI							
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0E+20							
6	SESA	SFSB	SAST	SBST	SFSAT	SFSBT	ESF	VSF							
	1.0	1.0			1.0	1.0	1.0	1.0							

CID=Contact interface ID. This must be a unique number.

Nota. La figura indica la carta de control para el contacto entre un solo conjunto de superficies.

La configuración se basa en posicionar un valor en SURFATYP y SURFBTYP, el cual indica el

tipo de set a utilizar. En SURFA o SURFB seleccionar el conjunto único de elementos. Los coeficientes de fricción estática FS y dinámica FD corresponden a un valor específico de aplicación. Los demás valores quedan por defecto.

Contacto entre Dos Superficies

Del mismo principio, al ser un análisis de impacto se recomienda el *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*, para detectar automáticamente los mismos, correspondiente a dos conjuntos de superficies, en la figura 54 se indica la carta de control respectiva.

Figura 54

Carta de control *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 Vehiculo SUV_Dummies_10.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_ (THERMAL) (29)

1 CID TITLE

MPP1 MPP2

2 IGNORE BCKT LCBCKT NS2TRK INITTR PARMAX UNUSED CPARM8

0 200 3 2 1.0005 0

3 UNUSED CHKSEGS PENSE GRPABLE

0 1.0 0

4 SURFA SURFB SURFATYP SURFBTYP SABOXID SBBOXID SAPR SBPR

0 0 0 0 0 0

5 FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0E+20

6 SFSA SFSB SAST SBST SFSAT SFSBT ESF VSF

1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0

Nota. La figura muestra la carta de control para el contacto entre dos conjuntos de superficies. La configuración se basa en posicionar un valor en *SURFATYP* y *SURFBTYP*, el cual indica el tipo de set a utilizar, mientras en *SURFA* y *SURFB* se asigna un conjunto o parte para cada uno. Los coeficientes de fricción estática FS y dinámica FD corresponden a un valor específico de aplicación. Los demás valores quedan por defecto.

Cinturones de Seguridad

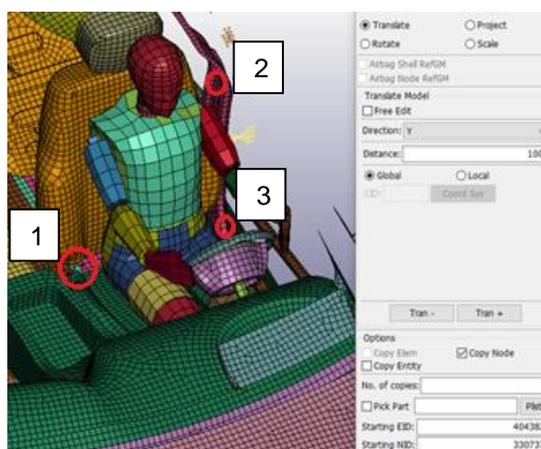
Para la implementación se considera la aplicación del cinturón de seguridad de tres puntos debido a que es uno de los más utilizados en vehículos convencionales en el país.

Nodos para el Cinturón de Seguridad de Tres Puntos

Dentro del bastidor estructural del vehículo tipo SUV se ubican tres nodos para trazar la trayectoria del cinturón de seguridad en el aparatado *Transform de Ls PrePost*. Como se observa en la figura 55, el primer nodo se ubica alrededor de la pelvis, mediante la operación *Traslata* se copia un nodo de dicha zona y se desfasa en la dirección y distancia necesaria.

Figura 55

Ubicación de nodos para la generación del cinturón de seguridad



Nota. Como se muestra en la figura los nodos 2 y 3 se ubican en componentes del bastidor estructural para asegurar el cinturón de seguridad, este procedimiento se repite para los dummies HIII de 50 y 05 percentil.

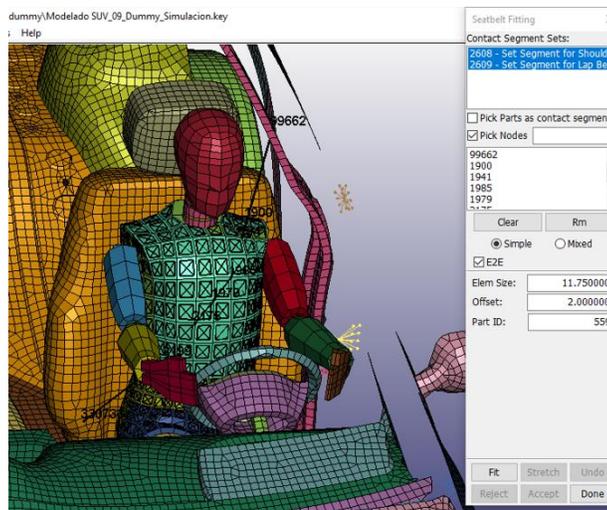
Generación del Cinturón de Seguridad

Se accede al ajuste del cinturón de seguridad (*Seatbelt Fitting*) de *Ls PrePost* y se procede a seleccionar los contactos del pecho y la pelvis que viene generados por defecto en

los maniqués para poder trazar la trayectoria del cinturón como se observa en la figura 56, el cinturón inicia desde el nodo del bastidor estructural hasta el nodo desfasado de la pelvis y del mismo nodo a la parte lateral, generando así los tres puntos del cinturón.

Figura 56

Trayectoria para la generación del cinturón de seguridad superior

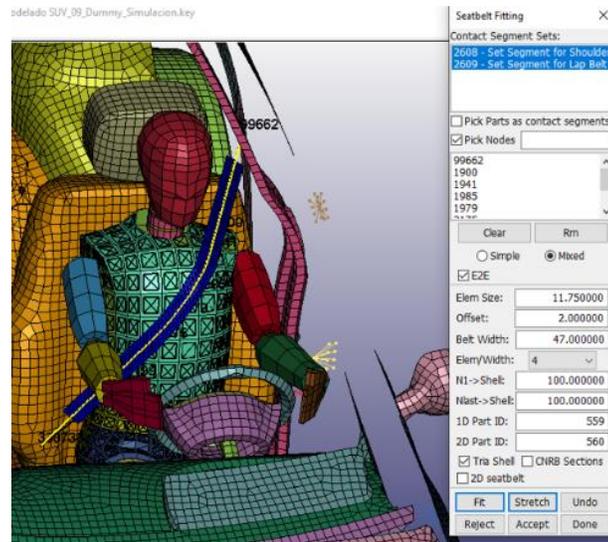


Nota. En la figura se indica la trayectoria generada con los distintos nodos señalados anteriormente, es importante verificar si no existe interferencia con los brazos del *Dummy*, esto aplica tanto para el HIII de 50 y 05 percentil, caso contrario es obligatorio eliminar la trayectoria y generar una nueva.

Una vez generada la trayectoria adecuada, seleccionar la opción de mezclado (*Mixed*) y adaptar (*Fit*) para poder visualizar la generación del cinturón de seguridad y finalmente la opción *Stretch* con el fin de posicionar de mejor manera al pecho del *Dummy* como se visualiza en la figura 57.

Figura 57

Generación del cinturón de seguridad superior

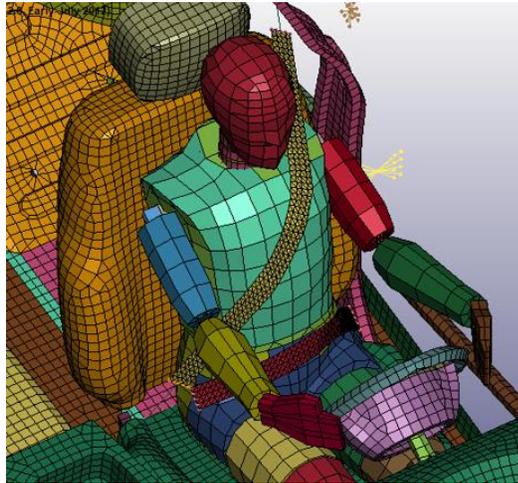


Nota. En la figura se muestra la forma correcta de la generación del cinturón superior de seguridad de tres puntos en el *Dummy* HIII 50 percentil. Este procedimiento se repite para el otro modelo ficticio.

Para generar el cinturón de seguridad inferior, verificar que este activo el contacto de la pelvis y generar la trayectoria adecuada como se muestra en la figura 58 el cinturón de seguridad completo.

Figura 58

Generación del cinturón de seguridad de tres puntos.



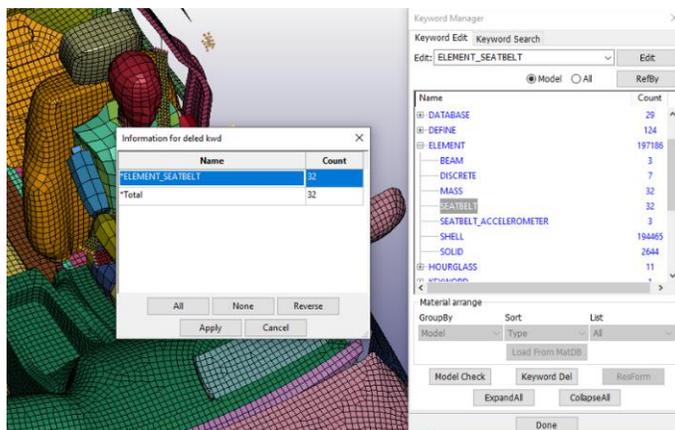
Nota. En la figura se observa el cinturón de seguridad completo sin ninguna interferencia en el *Dummy* HIII 50 percentil, este procedimiento se repite para el otro modelo ficticio.

Unión del Cinturón de Seguridad de Tres Puntos al Bastidor Estructural

Se elimina los elementos tipo *SEATBELT*, generados con la construcción de los cinturones de seguridad como se observa en la figura 59, esto con el objetivo de realizar uniones rígidas.

Figura 59

Eliminación de elementos tipo “SEATBEALT”

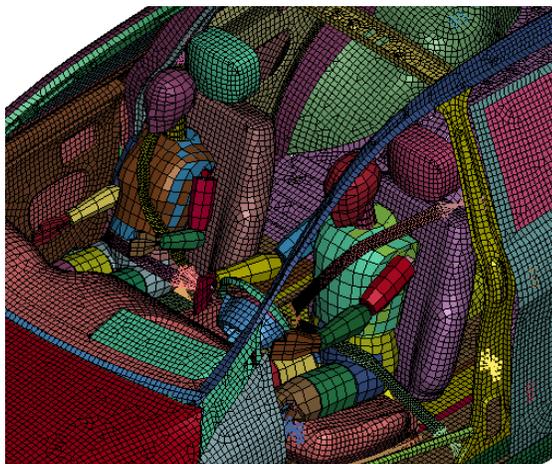


Nota. En la figura se observa los elementos “SEATBEL” los cuales se asemejan al funcionamiento de los pretensores equipados en vehículos de alta gama, en el estudio no se considera este tipo de elementos por lo cual se eliminan de los cinturones tanto del *Dummy Hill* 50 y 05 percentil.

Posterior, mediante el apartado *Entity Creation* de *Ls PrePost* se ejecutan las uniones rígidas mediante la operación *Nodal Rigid Body* como se observa en la figura 60, donde se seleccionan varios nodos de la parte terminal de los cinturones junto con el nodo común de unión del cinturón superior e inferior y posterior hacía el bastidor estructural.

Figura 60

Unión del cinturón de seguridad de tres puntos al bastidor estructural



Asignación de Material

El material empleado es el *MAT_PIECEWISE LINEAR PLASTICITY* con el fin de evitar errores al momento de ejecutar las simulaciones ya que por lo general los materiales empleados vienen hacer los textiles, poliéster o nylon, de los cuales no existe la validación necesaria dentro de *LS PrePost*, a continuación, en la tabla 28, se muestra las propiedades mecánicas del material.

Tabla 28

Asignación de material a los cinturones de seguridad

Detalle	Propiedades
	Densidad de masa (kg/mm^3): 7.890e-06 Módulo de Young (GPa): 200 Radio de Poisson: 0.3 Límite elástico (GPa): 0.271 Sección (mm): 2mm

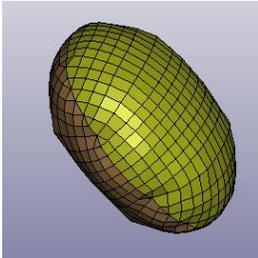
Airbags

Airbag Frontal

Para el airbag frontal se considera el *MAT_FABRIC_ (034)*, mismo que esta específicamente desarrollado para bolsas de aire y se caracteriza por ser un material ortotrópico, es decir sus propiedades mecánicas son diferentes en cada uno de los ejes. A continuación, en la tabla 29 se muestra las características principales del material basado en cartas de control de bolsas de aire realizadas por la NTHSA.

Tabla 29

Propiedades mecánicas del airbag frontal

Detalle	Propiedades
	Densidad de masa (kg/mm^3): 8.760e-07 Módulo de Young Longitudinal (GPa): 0.3 Módulo de Young Transversal (GPa): 0.2 Radio de Poisson: 0.2 Capacidad calorífica a volumen constante (Cv): 1023. Capacidad calorífica a presión constante (Cp): 1320. Temperatura del gas de entrada: 781.90 K Diámetro del airbag (mm): 711 Sección tipo Shell (mm): 0.33

Nota. La tabla muestra al airbag frontal a implementarse, una consideración importante es realizar el plegado adecuado que se ajuste al volante del vehículo, mediante el apartado de *Airbag Folding* de *Ls PresPost*.

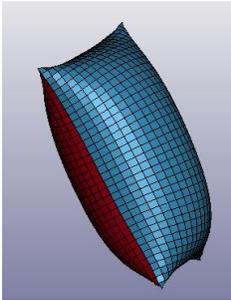
Airbag Lateral

Para el airbag lateral se considera las mismas propiedades mecánicas a diferencia de la forma y tamaño, de modo que puede absorber las fuerzas generadas por la zona de las costillas, los brazos y el pecho. A continuación, en la tabla 30 se muestra las características

principales del material empleado, el cual es tomado de las cartas de control de bolsas de aire realizadas por la NTHSA.

Tabla 30

Propiedades mecánicas del airbag lateral

Detalle	Propiedades
	Densidad de masa (kg/mm^3): 8.760e-07 Módulo de Young Longitudinal (GPa): 0.3 Módulo de Young Transversal (GPa): 0.2 Radio de Poisson: 0.2 Capacidad calorífica a volumen constante (Cv): 1023. Capacidad calorífica a presión constante (Cp): 1320. Temperatura del gas de entrada: 781.90 K Largo del airbag (mm): 450 Ancho del airbag (mm): 300 Sección tipo Shell (mm): 0.33

Ubicación de Airbag en el Vehículo Tipo SUV

Se posiciona el airbag frontal sobre el volante para el conductor (*Dummy* HIII 50 percentil) y para el pasajero delantero (*Dummy* HIII 05 percentil) cerca de la guantera, así mismo el airbag lateral de forma paralela a las costillas como se muestra en la figura 61, para sujetar los airbags se realizan uniones rígidas al volante, guantera y estructura de la puerta.

Figura 61

Ubicación de airbags frontales y airbag lateral



Procesamiento de la Simulación

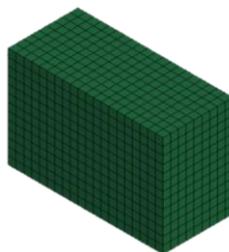
El procesamiento consiste en determinar las condiciones necesarias para el desarrollo de cada ensayo referenciado en los reglamentos internacionales de la CEPE/ONU y Protocolo de Latin NCAP mediante la interfaz de *LS PrePost* con uso de las cartas de control.

Colisión Frontal

Bloque Impactador. En la colisión frontal se considera el reglamento N°94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas, en la indica las características del bloque principal de impacto como se muestra en la figura 62, donde las dimensiones son 650 x 1000 x 450 (mm) con una tolerancia de $\pm 2,5$ mm.

Figura 62

Bloque principal de impacto



Nota. La figura muestra el bloque principal de impacto con una sección tipo superficie de 0,076 mm.

El material del bloque principal de impacto es Aluminio 3003 referido al reglamento, a continuación, en la figura 63 se muestra la carta de control con la asignación de las propiedades mecánicas.

Figura 63

Propiedades del material aluminio 3003

TITLE								
Barrera Aluminio 3003								
MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL	
1	84019497	2.860e-08	80.000000	0.3300000	125.00000	0.0	1.000e+21	
C	P	LCSS	LCSR	VP	EPSTHN	EPSMAJ	NUMINT	
2	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	
EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Plot Raise New Padd

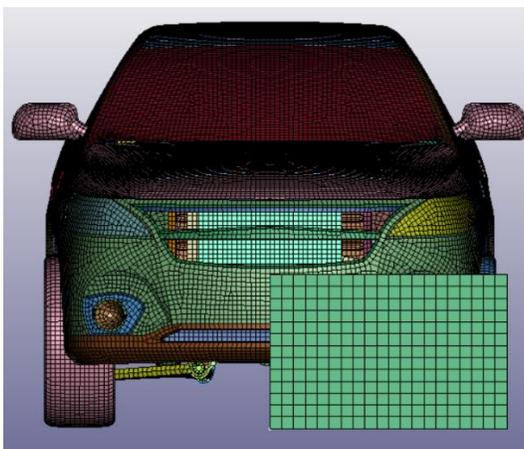
Nota. La figura muestra propiedades del aluminio 3003 como: densidad RO (2,86 e-08 kg/mm³), módulo de Young E (80 GPa), radio de Poisson PR (0,3) y el límite de fluencia SIGY (125 GPa).

Posición para el Ensayo. Para la alineación del vehículo frente al bloque principal de impacto se considera que el primer contacto del vehículo se produzca por la zona donde se ubica la columna de dirección como se observa en la figura 64, en cuanto a la alineación del

vehículo respecto al bloque se encubre un $40\% \pm 20$ mm, esto en base a las consideraciones del reglamento N°94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas.

Figura 64

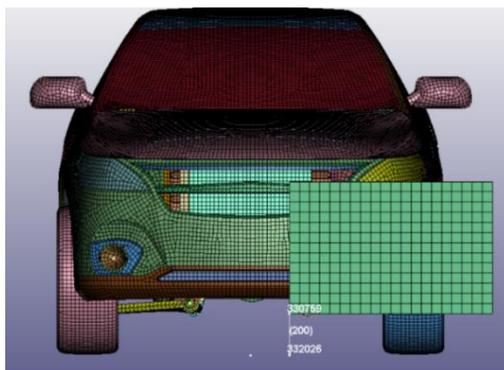
Alineación del vehículo respecto al bloque principal de impacto



Finalmente, el bloque principal de impacto se ubica a 200 mm del suelo como se observa en la figura 65.

Figura 65

Ubicación del bloque principal de impacto respecto al piso



Condiciones del Protocolo. En referencia al reglamento a continuación, en la tabla 31 se detalla las condiciones necesarias para ejecutar la colisión frontal con 40% de traslape.

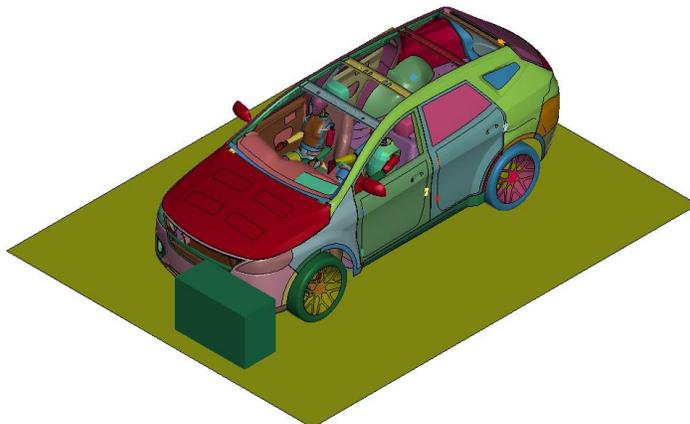
Tabla 31*Condiciones para colisión frontal*

Parámetro	Detalle	Observaciones
Velocidad del vehículo	64 km/h	
Bloque principal de impacto	Encubierto 40% ± 20 mm	Aplicación de estado de fijación de un solo punto SPC.
Piso	Libre ejecución (5570 x 4400 mm)	Aplicación de una sección tipo superficie de 10 mm y material MAT 024. Aplicación de estado de fijación de un solo punto SPC.
Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre	Modelo ficticio <i>fast</i> para <i>LS DYNA</i> . Peso de 78.987 kg.
Pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer	Modelo ficticio <i>fast</i> para <i>LS DYNA</i> . eso de 50.5639 kg.
Gravedad	9.806 e-3 mm/ms ²	Generada para todo el conjunto de colisión en el eje Z.
Peso del vehículo	Inferior a 2500 kg.	Peso neto vehicular de 2 166.92 kg.
Tiempo de simulación	200 ms	
Condición 1 sin seguridad pasiva		No se aplica elementos de seguridad pasiva del vehículo. Contactos simples con factores de fricción FS y FD de 0.74 y 0.57 respectivamente, valores que se atribuye al acero.
Condición 2 con seguridad pasiva	Cinturones de 3 puntos para conductor y pasajero delantero. Airbag frontal y lateral para conductor. Airbag frontal para pasajero delantero.	Contactos simples. Contactos entre superficies. Factores de fricción FS y FD de 0.74 y 0.57 respectivamente.

Finalmente, en la figura 66 y figura 67, se muestra el modelo preparado en base al protocolo de evaluación para ejecutar la colisión frontal con las dos condiciones de seguridad.

Figura 66

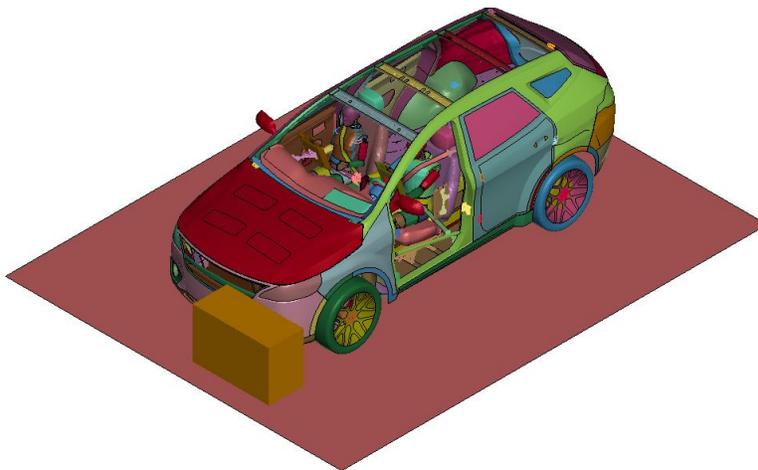
Vehículo tipo SUV sin elementos de seguridad pasiva-colisión frontal



Nota. La figura muestra el vehículo tipo SUV con los dummies sobre una plataforma y delante del bloque impactador.

Figura 67

Vehículo tipo SUV con elementos de seguridad pasiva-colisión frontal



Nota. La figura muestra el vehículo tipo SUV con los dummies y la incorporación de cinturones de seguridad con airbags sobre una plataforma y delante del bloque impactador.

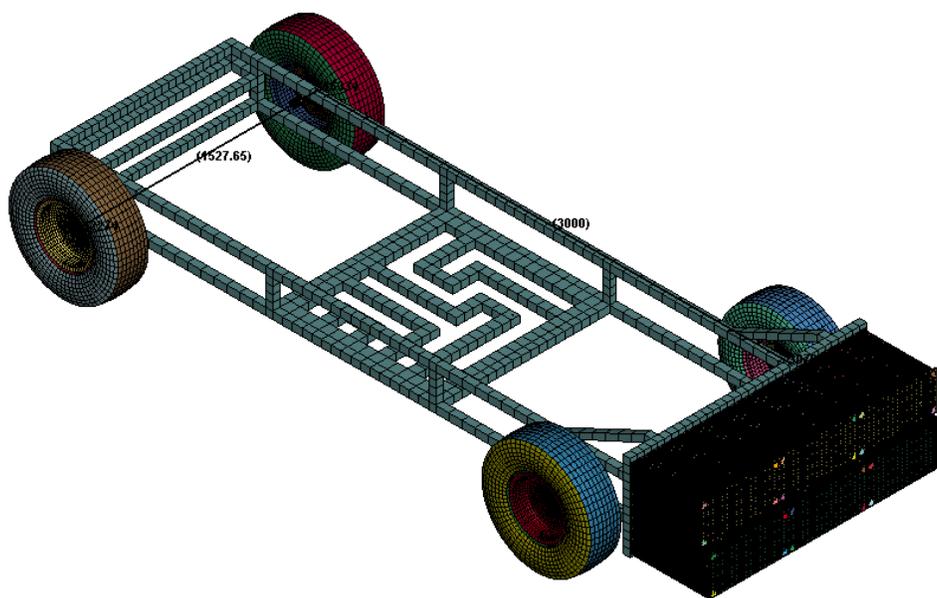
Colisión Lateral

Se considera el reglamento N°95 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas, donde se detalla las características específicas relativo a la protección de los ocupantes en caso de colisión lateral.

Barrera Móvil Deformable. Para el ensayo de colisión es necesario de una barrera deformable móvil, la cual consiste en un carro con un impactador frontal de una masa de 950 ± 20 kg, así como también un ancho de eje delantero y posterior de 1500 ± 10 mm y una distancia entre ejes de 3000 ± 10 mm como se muestra en la figura 68.

Figura 68

Barrera deformable móvil según norma N°95 de la CEPE

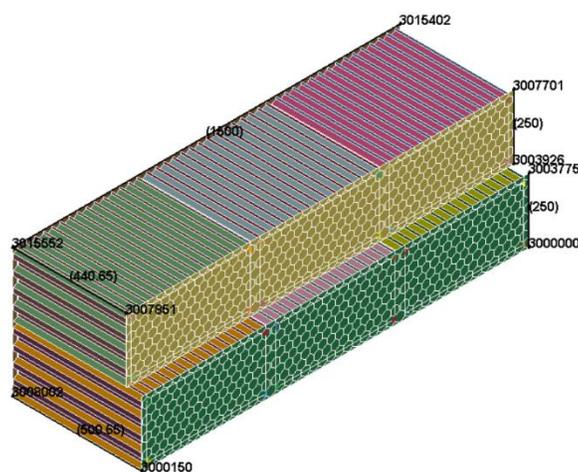


Nota. La figura muestra la barrera deformable móvil obtenida de la *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC) por lo cual garantiza el cumplimiento de las consideraciones señaladas en la norma N°95 de la CEPE.

El impactador tiene 6 bloques de aluminio alveolares centrados con una configuración en la que permite incrementar la fuerza progresivamente, también se compone de dos filas de bloques como se muestra en la figura 69, con sus respectivas dimensiones de 1500 ± 2.5 mm de ancho y 500 ± 2.5 mm en altura y profundidad. La primera fila tiene 60 ± 2 mm menos en profundidad respecto a la segunda.

Figura 69

Impactador de acuerdo a las especificaciones del reglamento N° 95 CEPE

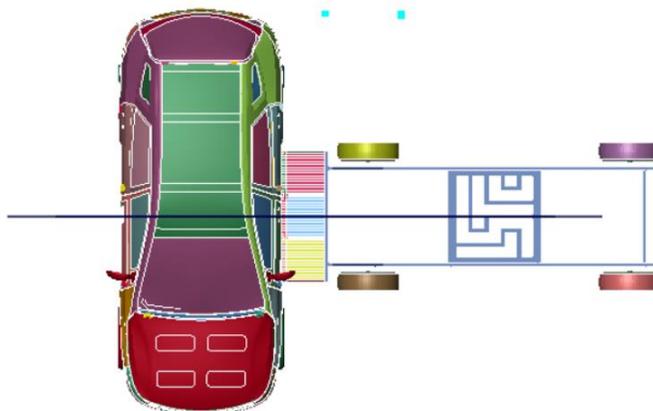


Nota. La figura muestra el bloque impactador donde uno dispone de celdillas con $19 \text{ mm} \pm 10\%$ en ancho, el material utilizado es el aluminio 3003 y 5052 para la fila superior e inferior respectivamente.

Posición para el Ensayo. El auto impactador debe estar situado perpendicular a la vista lateral izquierda del vehículo SUV, teóricamente en el mismo plano del punto R del asiento en caso de ser homologado. En este ensayo, al ser un componente empírico, se estima como posición ideal un plano medio entre los ejes de los dos vehículos como se muestra en la figura 70.

Figura 70

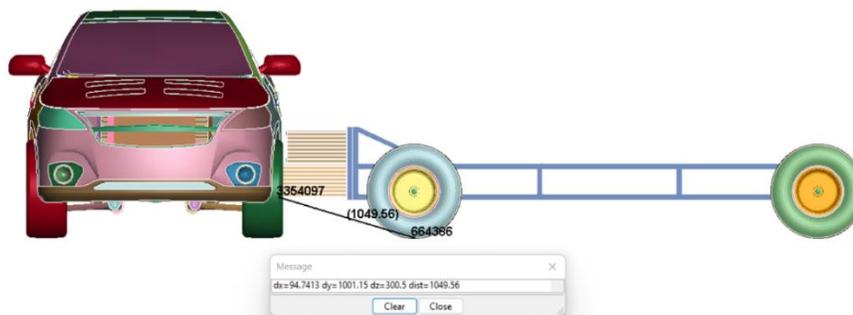
Posición del auto impactador en el plano medio



De la misma manera, debe atender a una posición vertical con una distancia de 300 ± 5 mm del suelo al impactador, así como se muestra en la figura 71.

Figura 71

Posición vertical del carro impactador



Nota. La figura muestra las dimensiones en las coordenadas de estudio, donde dz es la distancia vertical del suelo al bloque impactador inferior.

Condiciones del Protocolo. Referido a las condiciones del ensayo a continuación, en la tabla 32 se indica los detalles del protocolo para colisión lateral con barrera móvil deformable.

Tabla 32

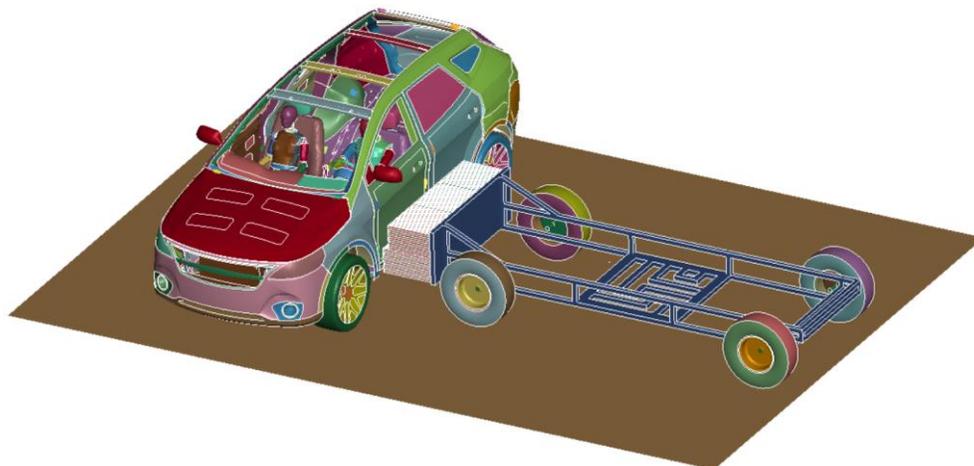
Condiciones para colisión lateral

Parámetro	Detalle	Observaciones
Velocidad del impactador	50 km/h Masa de 950 kg \pm 20 kg	Masa del vehículo impactador para simulación de 955.056 kg.
Bloque principal alveolar	Distancia de 300 \pm 5 mm del suelo al bloque impactador inferior	305 mm del punto más bajo hasta el punto inicial del bloque inferior.
Piso	Libre ejecución 5300 mm de ancho 7500 mm de largo	Aplicación de una sección tipo superficie de 10 mm y material MAT 024. Aplicación de estado de fijación de un solo punto SPC.
Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre	Modelo ficticio <i>fast</i> para <i>LS DYNA</i> . Peso de 78.987 kg.
Pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer	Modelo ficticio <i>fast</i> para <i>LS DYNA</i> . Peso de 50.5639 kg.
Gravedad	9.806 e-3 mm/ms ²	Generada para todo el conjunto de colisión en eje Z.
Peso del vehículo	Inferior a 2500 kg.	Peso neto vehicular de 2 166.92 kg.
Tiempo de simulación	200 ms	
Condición 1 sin seguridad pasiva		Sin elementos de seguridad pasiva del vehículo. Contactos simples con factores de fricción FS y FD de 0.74 y 0.57 respectivamente, valores que se atribuye al acero.
Condición 2 con seguridad pasiva	Cinturones de 3 puntos para conductor y pasajero delantero. Airbag frontal y lateral para conductor. Airbag frontal para pasajero delantero.	Contactos simples. Contactos entre superficies. Factores de fricción FS y FD de 0.74 y 0.57 respectivamente.

Con la incorporación de todas las condiciones del protocolo para colisión lateral, en la figura 72 y figura 73 se muestra el modelo preparado para la ejecución del ensayo sin seguridad pasiva y con la misma, respectivamente.

Figura 72

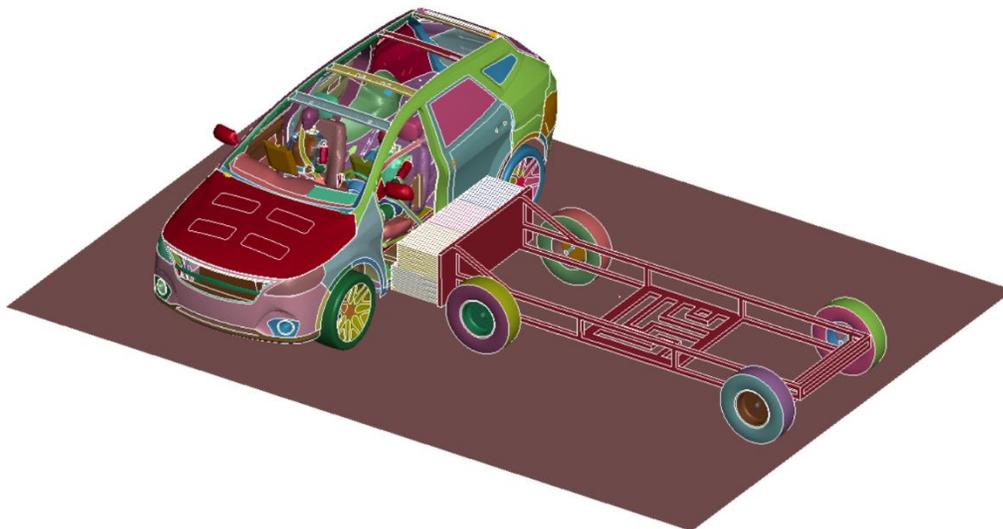
Vehículo tipo SUV sin elementos de seguridad pasiva-colisión lateral



Nota. La figura muestra el modelo tipo SUV con los maniqués HIII de 50 y 05 percentil sin elementos de seguridad pasiva en posición de impacto con la barrera móvil deformable.

Figura 73

Vehículo tipo SUV con elementos de seguridad pasiva-colisión lateral



Nota. La figura muestra el modelo tipo SUV con los maniqués HIII de 50 y 05 percentil con elementos de seguridad pasiva en posición de impacto con la barrera móvil deformable.

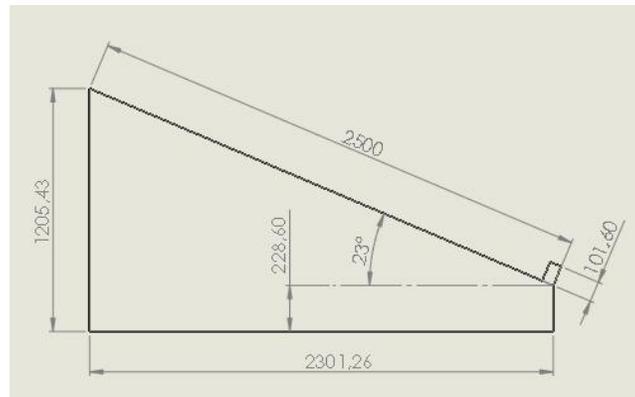
Vuelco

El ensayo se basa en el protocolo de la FMVSS 208 SAE J2114, el mismo que evalúa el vuelco del vehículo en base a un trineo de impulso.

Trineo de Impulso. El trineo característico dispone de medidas principales como el ángulo de la plataforma de 23° , altura desde el suelo al punto más bajo de 228.60 mm (9 pulgadas) y borde retenedor de 101,60 mm (4 pulgadas) en sentido perpendicular a la base del trineo, como se muestra en la figura 74.

Figura 74

Dimensiones principales del trineo

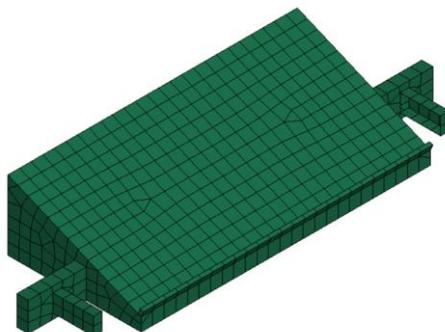


Nota. La figura muestra las dimensiones reglamentarias y los ajustes necesarios para abarcar el tamaño del vehículo tipo SUV, específicamente en el lado transversal. La longitud es de 5 000 mm.

En la figura 75, se muestra el trineo en vista isométrica, la misma que dispone de dos soportes laterales para detener la estructura en un bloque fijo, y proporcionar las características del vuelco.

Figura 75

Representación del trineo para el ensayo de vuelco

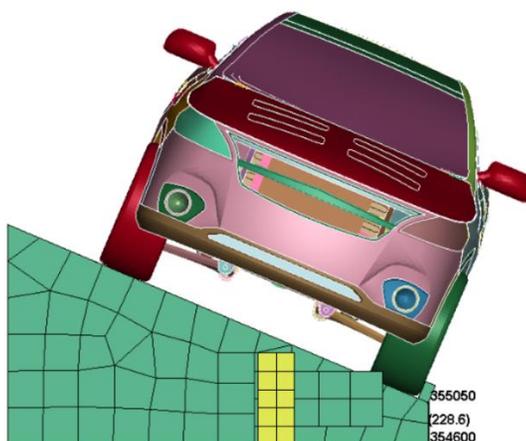


Nota. La figura muestra el trineo con los soportes laterales establecidos de forma empírica.

Posición para el Ensayo. El vehículo tipo SUV, debe posicionarse sobre el trineo, atendiendo las características de la misma, lo más cerca al borde de retención, como se muestra en la figura 76.

Figura 76

Posicionamiento del vehículo tipo SUV en el trineo



Nota. La figura muestra el vehículo tipo SUV sobre el trineo. La distancia del suelo al punto más bajo de la estructura es de 228.6 mm (9 pulgadas).

Condiciones del Protocolo. En referencia al reglamento de vuelco y en relación a las necesidades empíricas, se establece las condiciones que definen la aplicación de ensayo como se muestra en la tabla 33.

Tabla 33

Condiciones para vuelco

Parámetro	Detalle	Observaciones
Velocidad del Trineo	48 km/h	
Bloque principal	Base con ángulo de 23°. Altura delantera de 9 pulgadas. Borde perpendicular a la base de 4 pulgadas	Soportes laterales. Aplicación de una sección tipo superficie de 7 mm y material MAT 024.
Piso	Libre ejecución 5300 mm de ancho 27500 mm de largo.	Aplicación de una sección tipo superficie de 10 mm y material MAT 024. Aplicación de estado de fijación de un solo punto SPC con translación en el eje Y.
Conductor	Maniquí Híbrido III 50% hombre	Modelo ficticio <i>fast</i> para <i>LS DYNA</i> . Peso de 78.987 kg.
Pasajero delantero	Maniquí Híbrido III 5% mujer	Modelo ficticio <i>fast</i> para <i>LS DYNA</i> . Peso de 50.5639 kg.
Gravedad	9.806 e-3 mm/ms ²	Generada para todo el conjunto de partes mediante un set general para el eje Z.
Peso del automóvil	Inferior a 2500 kg.	Peso neto vehicular de 2 166.92 kg.
Tiempo de simulación	1500 ms	
Condición 1 sin seguridad pasiva		Sin elementos de seguridad pasiva del vehículo. Contactos simples. Factor de fricción FS y FD de 0.74 y 0.57 respectivamente, valores que se atribuye al acero. Contacto entre trineo y piso de FS y FD igual a 0.
Condición 2 con seguridad pasiva	Cinturones de 3 puntos para conductor y pasajero delantero. Airbag lateral para conductor.	Contactos simples. Contactos entre superficies. Factor de fricción FS y FD de 0.74 y 0.57 respectivamente. Contacto entre trineo y piso de FS y FD igual a 0.

Con la asignación de las condiciones del protocolo para vuelco, en la figura 77 y figura 78 se muestra el modelo preparado para la ejecución del ensayo sin seguridad pasiva y con la misma, respectivamente.

Figura 77

Vehículo tipo SUV sin elementos de seguridad pasiva



Nota. La figura muestra el modelo tipo SUV con los maniquíes HIII de 50 y 05 percentil sin elementos de seguridad pasiva en posición de vuelco.

Figura 78

Vehículo tipo SUV con elementos de seguridad pasiva



Nota. La figura muestra el modelo tipo SUV con los maniquíes HIII de 50 y 05 percentil con elementos de seguridad pasiva en posición de vuelco.

Capítulo IV

Análisis de Resultados de la Biomecánica de Maniqués

Criterios de Evaluación

Los criterios básicos de evaluación al mínimo rendimiento de seguridad según valores de patrón o referencia están definidos en los reglamentos de la CEPE/ONU y protocolo de Latin NCAP para ocupantes adultos, se estima la consideración de puntos críticos en la cabeza, cuello, tórax, fémur, tibia, rodillas, pelvis y abdomen, tal como se detalló en la tabla 6.

Partes Biomecánicas de Análisis

Los modelos ficticios de la familia HIII están compuesto en su estructura mediante acelerómetros, células de carga y potenciómetros, los cuales permiten medir aceleración, fuerza-momento y desplazamiento de cada parte del cuerpo, estos parámetros pueden ser determinados mediante nodos y juntas como se muestra en la tabla 34 para el Dummy 50 y 05 percentil.

Tabla 34

Nodos y juntas para medición

Criterios de evaluación	Resultado (Load)	Identificación Dummy	
		50%	05%
Lesión de la cabeza	nodout	1	23309
Lesión del cuello NIC	Tracción (z)	Jt-39	Jt-83
	Cizalladura (x)		
	Momento de flexión	StR-44	StR-82
Compresión de tórax ThCC	deforc	10-R	20840-R
Fuerza del fémur FFC	jntforc	Jt-24 (I)	Jt-68 (I)
		Jt-25 (D)	Jt-69 (D)
Comportamiento de la tibia	Fuerza de compresión	Jt-41, Jt-42 (I)	Jt-85, Jt-86 (I)
		Jt-43, Jt-44 (D)	Jt-87, Jt-88 (D)
	Momento de flexión	StR-18, StR-19 (I)	StR-74, StR-75 (I)
		StR-20, StR-21 (D)	StR-76, StR-77 (D)
Índice de lesión TI		-	-

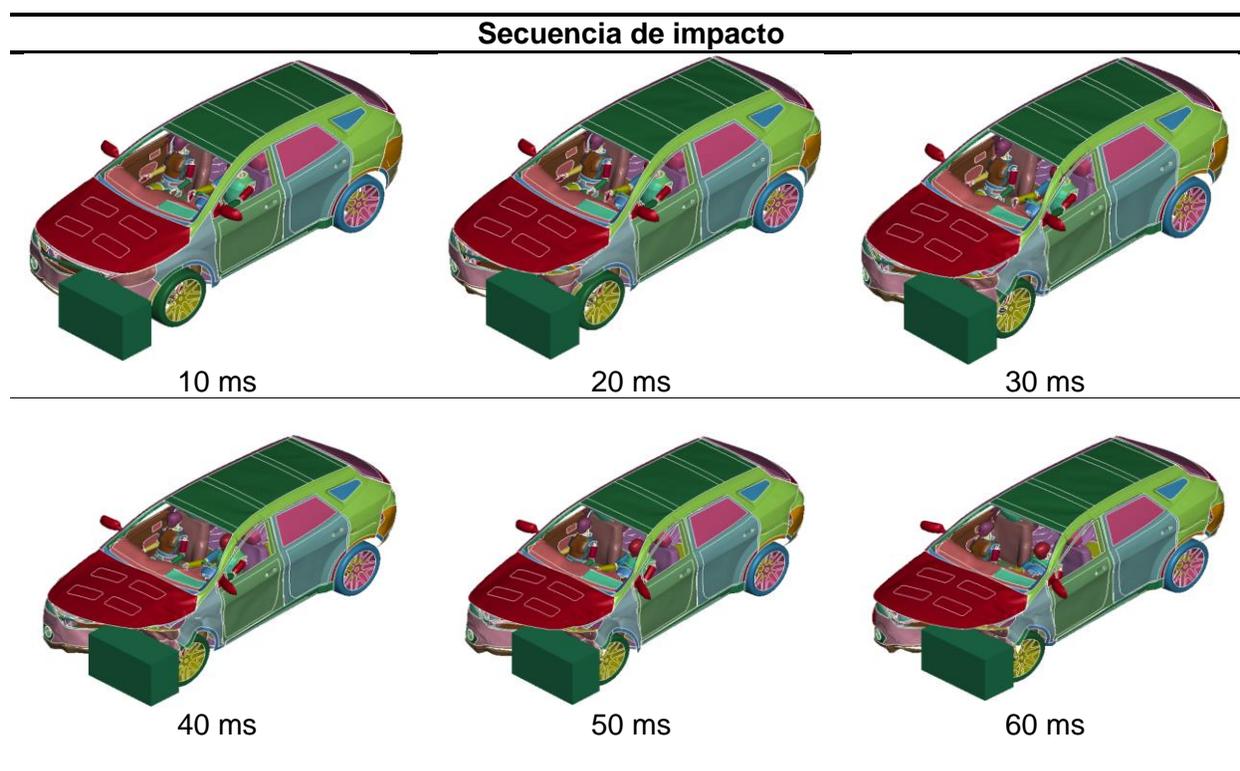
Criterios de evaluación	Resultado (Load)	Identificación Dummy	
		50%	05%
Desplazamiento de las articulaciones en rodillas	jntforc	StT-45 (I)	StT-83 (I)
		StT-46 (D)	StT-84 (D)
Fuerza sobre la pelvis PSPF	jntforc	Jt-22 (I)	Jt-66 (I)
		Jt-23 (D)	Jt-67 (D)
Fuerza sobre el abdomen APF	jntforc	Jt-32	Jt-76

Colisión Frontal con 40% de Traslape

Los resultados de posprocesamiento están agrupados en la tabla 35 y 36 donde se muestra los distintos estados obtenidos en *LS Pre Post* para el ensayo de colisión sin la implementación de la seguridad pasiva como con la implementación de la misma (cinturones de seguridad de tres puntos, airbag frontal para piloto – copiloto y airbag lateral para piloto), del mismo modo bajo el reglamento N°94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas.

Tabla 35

Simulación de colisión frontal sin seguridad pasiva



Secuencia de impacto



70 ms



80 ms



90 ms



100 ms



110 ms



120 ms



130 ms



140 ms



150 ms

Secuencia de impacto



160 ms



170 ms



180 ms



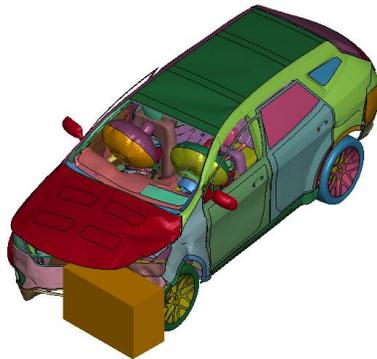
190 ms



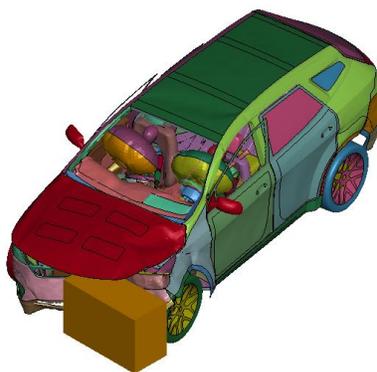
200 ms

Nota. La tabla muestra la sucesión del impacto frontal sin seguridad pasiva, donde a partir de 50 ms aproximadamente se produce el contacto entre cada uno de los dummies y la estructura del vehículo.

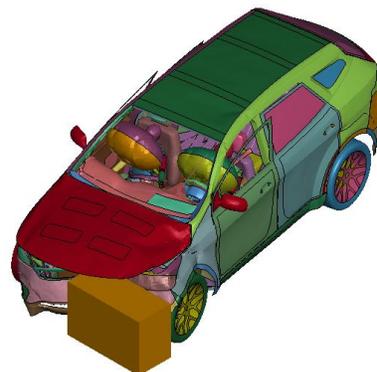
Secuencia de impacto



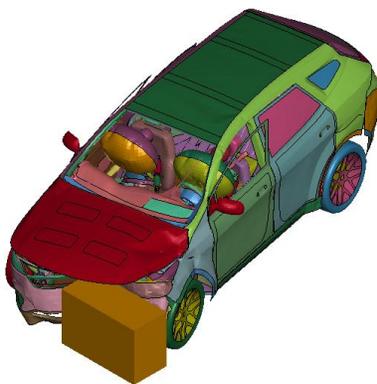
100 ms



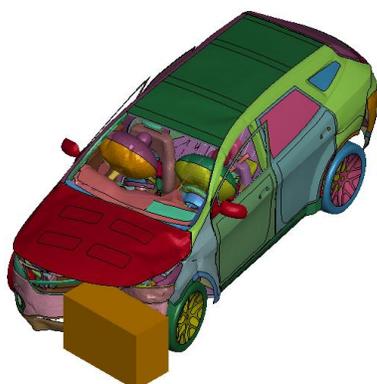
110 ms



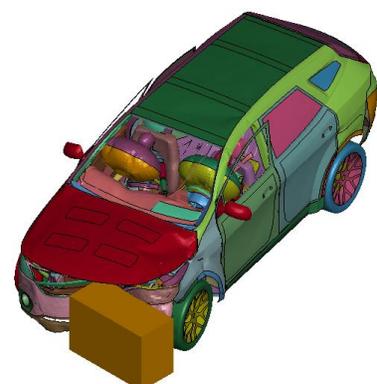
120 ms



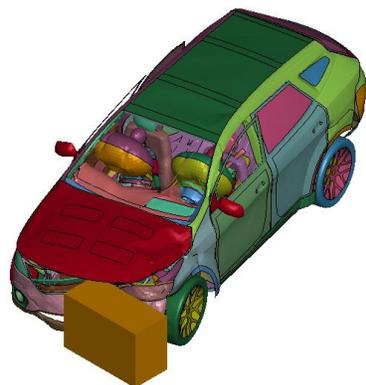
130 ms



140 ms



150 ms



160 ms

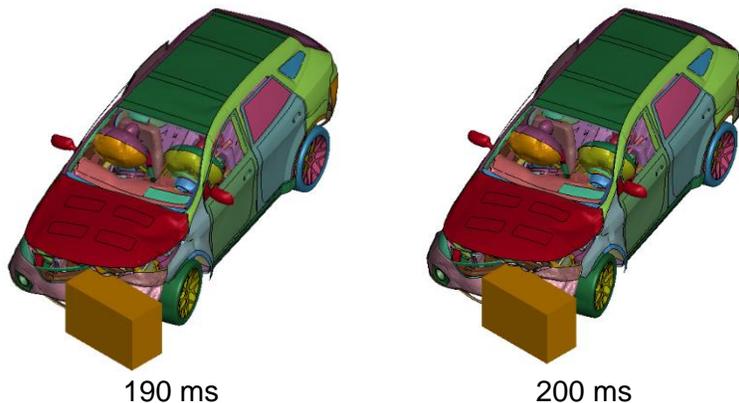


170 ms



180 ms

Secuencia de impacto



Nota. La tabla muestra la sucesión del impacto frontal con seguridad pasiva, donde a partir de 30 ms aproximadamente se produce el contacto entre el dummy HIII 50 percentil y el airbag frontal, mientras que entre el dummy HIII 05 percentil y el airbag frontal el contacto se genera a partir de los 40 ms aproximadamente.

Criterio de Lesión en la Cabeza HIC

El criterio evalúa si se produce contacto de la cabeza con algún componente del vehículo durante el ensayo. Se considera satisfactorio si no se produce ninguno, caso contrario, se analiza en función de la ecuación 4, en base a la aceleración ($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$) y tiempo de contacto ($t_1 - t_2$).

De acuerdo a las normas y protocolos de evaluación, según la CEPE N°94, el valor de HPC o HIC36 no deber ser superior a 1 000, ni exceder la aceleración a 80g por más de 3ms, en cambio, según Latin NCAP el valor de HIC15 debe ser menor a 700 y no exceder la aceleración en 80 g.

Ecuación 4

Criterio de lesión de la cabeza

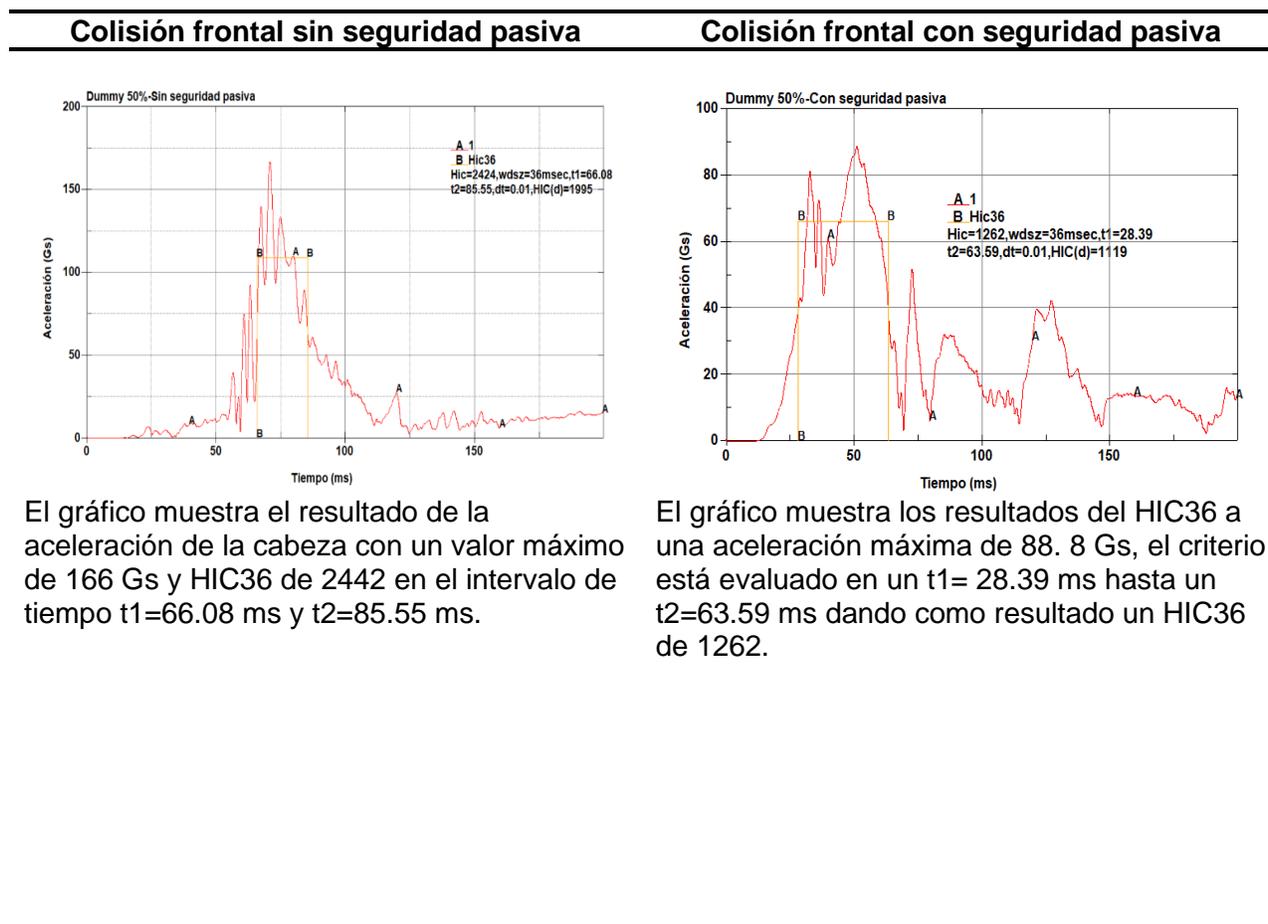
$$HPC = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5}$$

En los modelos *Fast Hill* 50 y 05 percentil al resultado obtenido se aplica un filtro SAE, tiempo en milisegundos, frecuencia de 108 Hz y gravedad de 0.00981 mm/ms².

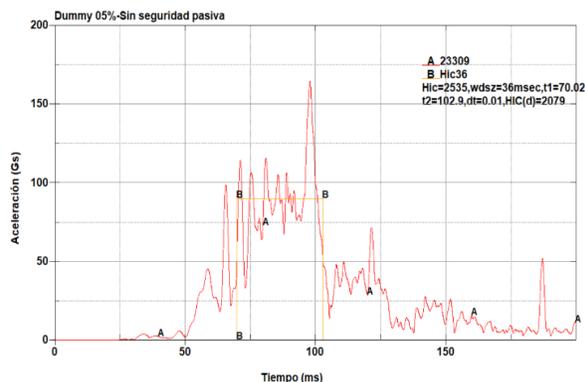
En la tabla 37, se muestra las gráficas resultantes del HIC36 para el Dummy *Fast Hill* 50 y 05 percentil en el ensayo de colisión frontal para los dos casos.

Tabla 37

Criterio HIC36-colisión frontal

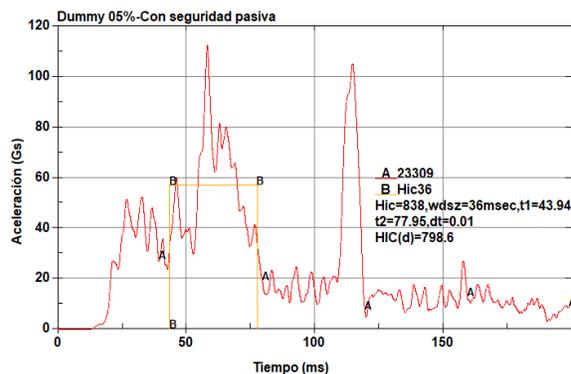


Colisión frontal sin seguridad pasiva



El gráfico muestra el resultado de la aceleración de la cabeza con un valor máximo de 164 Gs, y HIC36 de 2535 en el intervalo de tiempo $t_1=70.02$ ms y $t_2=102.9$ ms.

Colisión frontal con seguridad pasiva



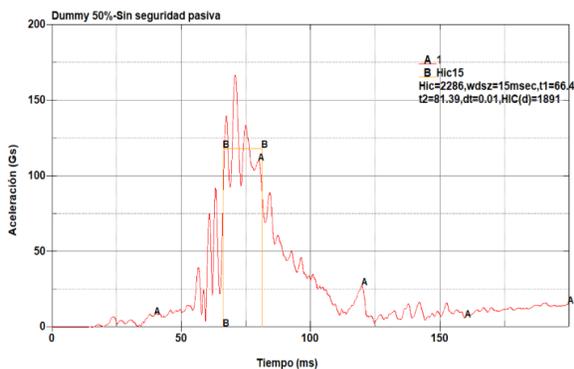
El gráfico muestra los resultados del HIC36 a una aceleración máxima de 113 Gs, el criterio está evaluado en un $t_1=43.94$ ms hasta un $t_2=77.95$ ms dando como resultado un HIC36 de 838.

En la tabla 38, se muestra las gráficas resultantes del HIC15 para el Dummy *Fast* Híbrido 50 y 05 percentil en el ensayo de colisión frontal para los dos casos.

Tabla 38

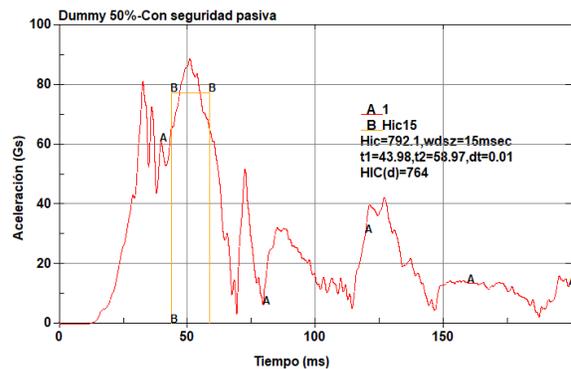
Criterio HIC15-colisión frontal

Colisión frontal sin seguridad pasiva

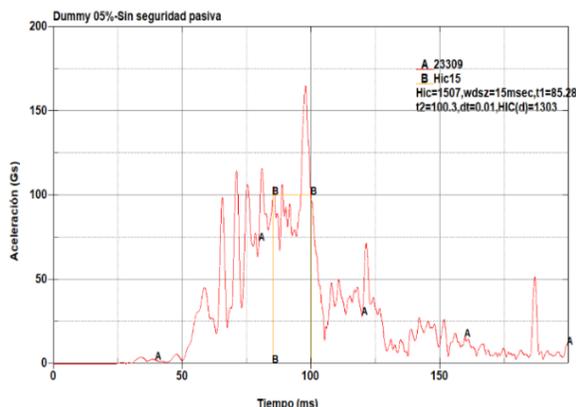


El gráfico muestra el resultado de la aceleración de la cabeza, el mismo que alcanza un valor máximo de 166 Gs, y HIC15 de 2286 en el intervalo de tiempo $t_1=66.4$ ms y $t_2=81.39$ ms.

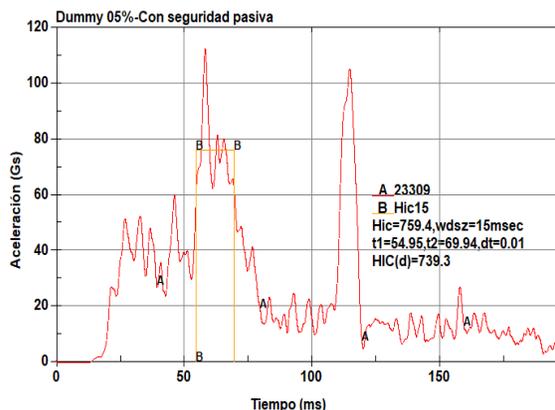
Colisión frontal con seguridad pasiva



El gráfico muestra los resultados del HIC36 a una aceleración máxima de 88.8 Gs, el criterio está evaluado desde un $t_1=43.98$ ms hasta un $t_2=58.97$ ms dando como resultado un HIC15 de 792.1.

Colisión frontal sin seguridad pasiva


El gráfico muestra el resultado de la aceleración de la cabeza con un valor máximo de 164 Gs, y HIC15 de 1507 en el intervalo de tiempo $t_1=85.28$ ms y $t_2=100.3$ ms.

Colisión frontal con seguridad pasiva


El gráfico muestra los resultados del HIC36 a una aceleración máxima de 113 Gs, el criterio está evaluado desde un $t_1= 54.95$ ms hasta un $t_2= 69.94$ ms dando como resultado un HIC15 de 759.4.

Criterio de Lesión del Cuello NIC

El criterio está determinado por la fuerza de compresión axial, fuerza de tracción axial y fuerza de cizalladura anterior y posterior en la zona de unión de la cabeza y el cuello, dado en kN de acuerdo a la norma N°94 de la CEPE y protocolos de Latin NCAP.

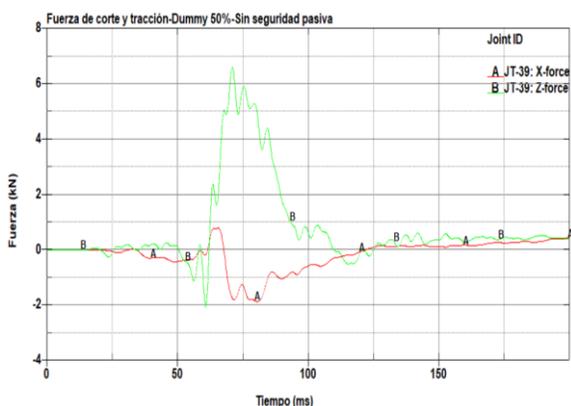
El criterio de momento de flexión se mide en Nm, en torno a un eje lateral de unión del cuello y la cabeza, el cual no debe superar los 57 Nm en extensión.

Fuerza de Corte y Tracción. La fuerza sobre el cuello en la transición de la colisión puede tener efecto de compresión o tracción axial debido a la reacción entre el vehículo y el bloque impactador, así como también el ambiente del habitáculo. De la misma manera la fuerza de corte puede tener sentido positivo o negativo. En la tabla 39 se muestra las gráficas resultantes.

Tabla 39

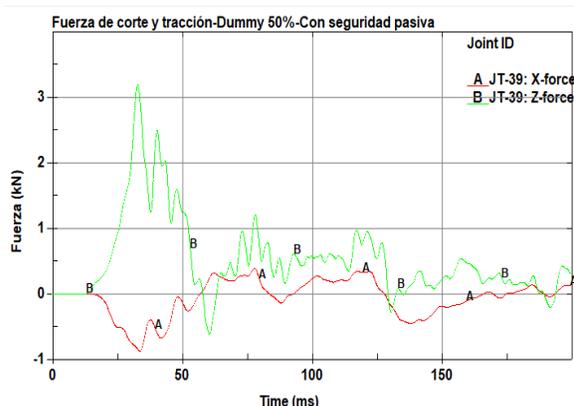
Criterio NIC, fuerza de corte y tracción-colisión frontal

Colisión frontal sin seguridad pasiva

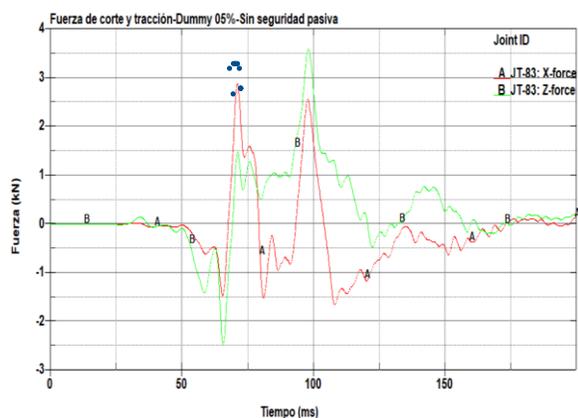


El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de -1.89 kN y 6.61 kN en cada una. El signo negativo señala la dirección contraria de la fuerza de corte en el eje "X".

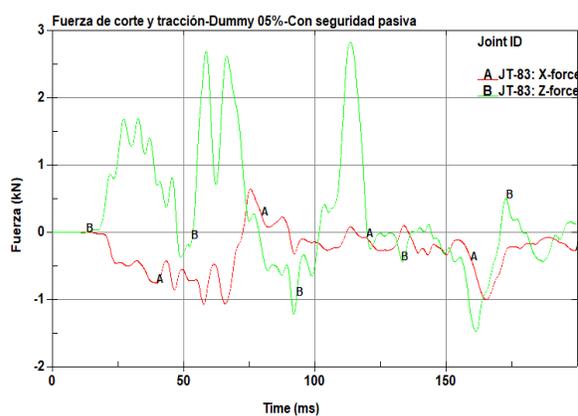
Colisión frontal con seguridad pasiva



El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de - 0.876 kN y 3.20 kN en cada una. El signo negativo señala la dirección contraria de la fuerza de corte en el eje "X".



El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de 2.89 kN y 3.59 kN en cada una.



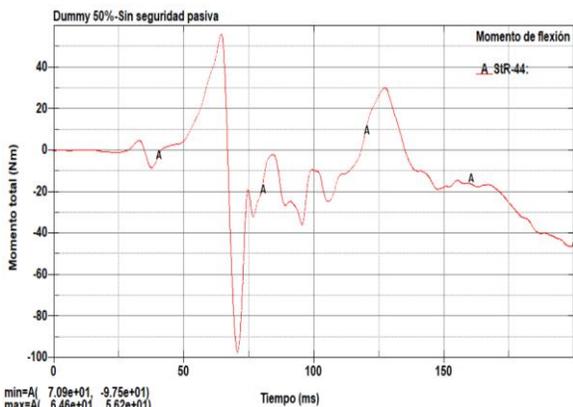
El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de -1.48 kN y 2.83 kN en cada una. El signo negativo señala la dirección contraria de la fuerza de corte en el eje "X".

Momento de Flexión. Debido a la dirección de la carga puede tener efecto negativo o positivo, las gráficas resultantes se muestran en la tabla 40.

Tabla 40

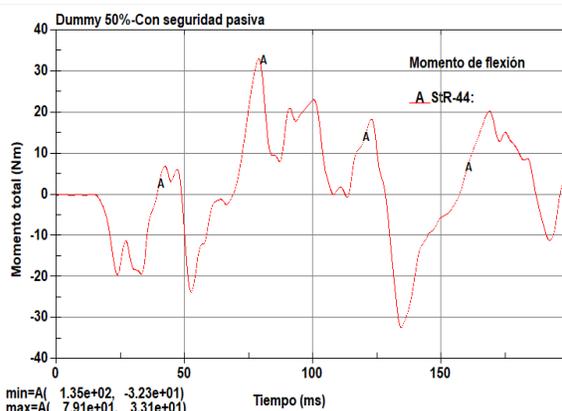
Criterio NIC, momento de flexión-colisión frontal

Colisión frontal sin seguridad pasiva

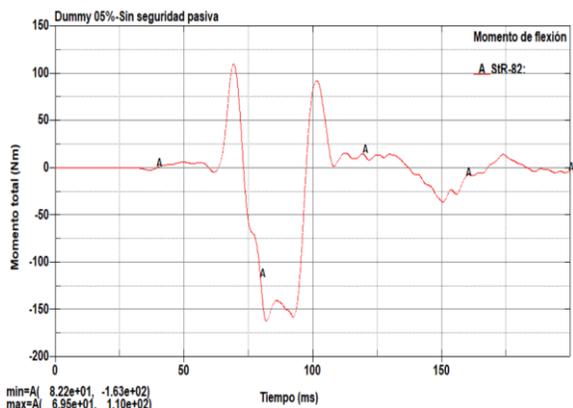


El gráfico indica el momento de flexión generado en el cuello, con un valor máximo de 97.5 Nm con efecto negativo.

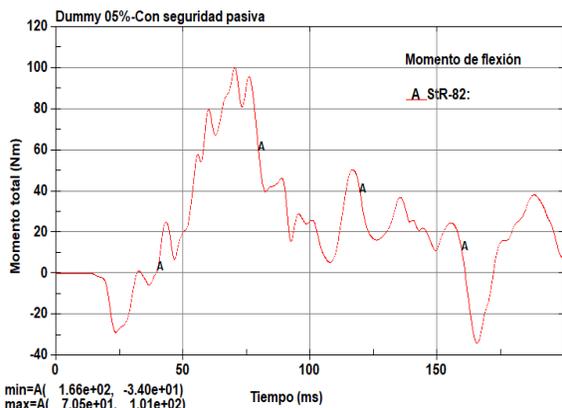
Colisión frontal con seguridad pasiva



El gráfico muestra el momento de flexión generado en el cuello, donde se obtiene un valor máximo de 33.1 Nm con efecto positivo.



El gráfico indica el momento de flexión generado en el cuello donde se obtiene un valor máximo de 163 Nm con un efecto negativo.



El gráfico muestra el momento de flexión generado en el cuello, donde se obtiene un valor máximo de 101 Nm con efecto positivo.

Compresión del Tórax ThCC

El criterio está determinado en base a la compresión que se produce en el tórax y viene a ser el valor absoluto de deformación presentada en el mismo. En la tabla 41, se muestra las gráficas resultantes del THCC para el Dummy *Fast* Híbrido 50 y 05 percentil en el ensayo de colisión frontal.

Tabla 41

Criterio ThCC-colisión frontal

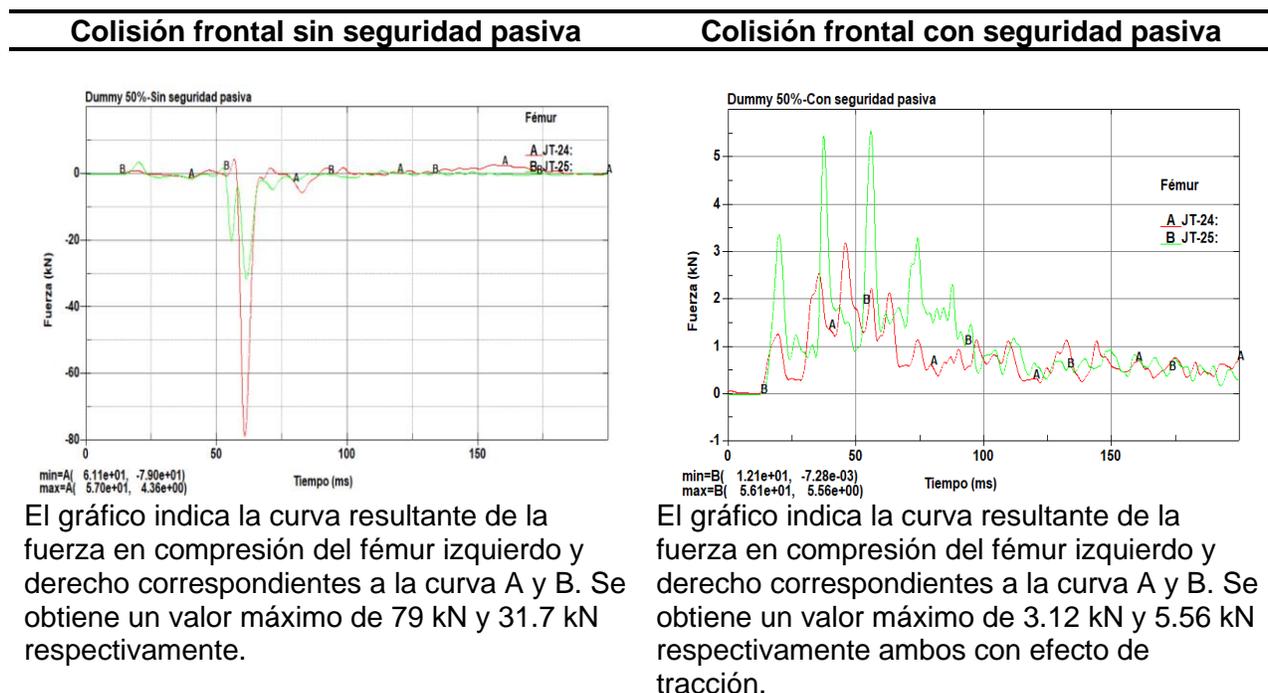
Colisión frontal sin seguridad pasiva	Colisión frontal con seguridad pasiva
<p>Dummy 50%-Sin seguridad pasiva</p> <p>Criterio ThCC</p> <p>A_10-R</p> <p>Deflexión del tórax (mm)</p> <p>Tiempo (ms)</p> <p>min=A(7.43e+01, -1.36e+02) max=A(3.87e+01, 2.30e+00)</p>	<p>Dummy 50%-Con seguridad pasiva</p> <p>Criterio THC</p> <p>A_10-R</p> <p>Deflexión de torax (mm)</p> <p>Tiempo (ms)</p> <p>min=A(3.60e+01, -5.47e+01) max=A(5.60e+00, 2.43e-03)</p>
<p>El gráfico indica la deflexión de tórax donde se obtiene un valor máximo de 136 mm, producto de una carga en compresión.</p>	<p>El gráfico muestra la deflexión del tórax donde se obtiene un valor máximo de 54.7 mm, producto de una carga en compresión.</p>
<p>Dummy 05%-Sin seguridad pasiva</p> <p>Criterio ThCC</p> <p>A_20840-R</p> <p>Deflexión del tórax (mm)</p> <p>Tiempo (ms)</p> <p>min=A(0.14e+01, -2.99e+01) max=A(7.26e+01, 1.97e+01)</p>	<p>Dummy 05%-Con seguridad pasiva</p> <p>Criterio THC</p> <p>A_20840-R</p> <p>Deflexión del tórax (mm)</p> <p>Tiempo (ms)</p> <p>min=A(7.53e+01, -3.48e+01) max=A(1.34e+01, 7.53e-02)</p>
<p>El gráfico indica la deflexión del tórax donde se obtiene un valor máximo de 29.9 mm, producto de una carga en compresión.</p>	<p>El gráfico muestra la deflexión del tórax donde se obtiene un valor máximo de 34.8 mm, producto de una carga en compresión.</p>

Fuerza del Fémur FFC

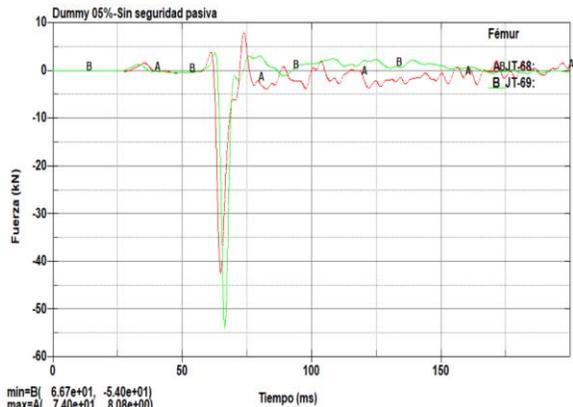
El criterio viene determinado por la carga de compresión ejercida axialmente en cada fémur de los maniqués. En la tabla 42, se muestra las gráficas resultantes de la fuerza del fémur (FFC) para el Dummy *Fast HIII* 50 y 05 percentil en el ensayo de colisión frontal.

Tabla 42

Criterio FFC-colisión frontal

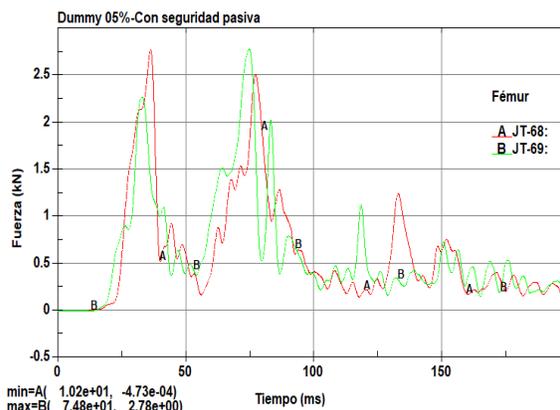


Colisión frontal sin seguridad pasiva



El gráfico indica la curva resultante de la fuerza en compresión del fémur izquierdo y derecho correspondientes a la curva A y B. Se obtiene un valor máximo de 42.3 kN y 54 kN respectivamente.

Colisión frontal con seguridad pasiva



El gráfico indica la curva resultante de la fuerza en compresión del fémur izquierdo y derecho correspondientes a la curva A y B. Se obtiene un valor máximo de 2.78 kN tanto para A y B con un efecto de tracción.

Comportamiento de la Tibia

El criterio viene determinado mediante la fuerza de compresión axial (F_Z) ejercida sobre cada tibia de los maniqués, la cual no debe superar los 8 kN.

Para determinar el índice, se calcula mediante los momentos de flexión (M_X y M_Z), como se muestra en la ecuación 5, valor que no debe ser superior a 1.3, esto en base a lo establecido en la norma N°94 de la CEPE.

Ecuación 5

Índice de la tibia

$$TI = \left| \frac{M_R}{(M_C)_R} \right| + \left| \frac{F_Z}{(F_C)_Z} \right|$$

Donde:

M_R = Momento de flexión resultante

(M_C) = Momento crítico de flexión, valor sugerido de 225 Nm y 115 Nm para el HIII 50 y 05 percentil (ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH & DEVELOPMENT, 1996).

F_Z = Fuerza de compresión axial en dirección z.

$(F_C)_Z$ = Fuerza crítica de compresión en la dirección z, valor sugerido de 35.9 kN y 22.9 kN para el HIII 50 y 05 percentil (ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH & DEVELOPMENT, 1996).

El Momento de flexión resultante se obtiene mediante la ecuación 6, la cual relaciona el momento M_X y M_Y producido en la tibia.

Ecuación 6

Momento de flexión resultante

$$M_R = \sqrt{(M_X)^2 + (M_Y)^2}$$

Donde:

M_X = Momento de flexión en torno al eje x.

M_Y = Momento de flexión en torno al eje y.

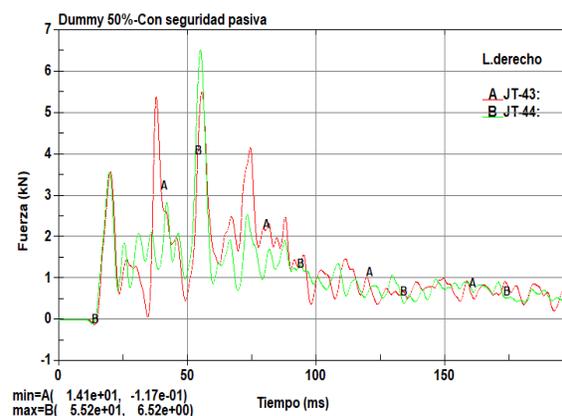
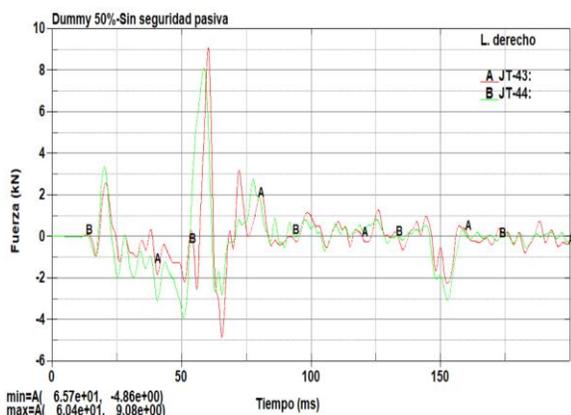
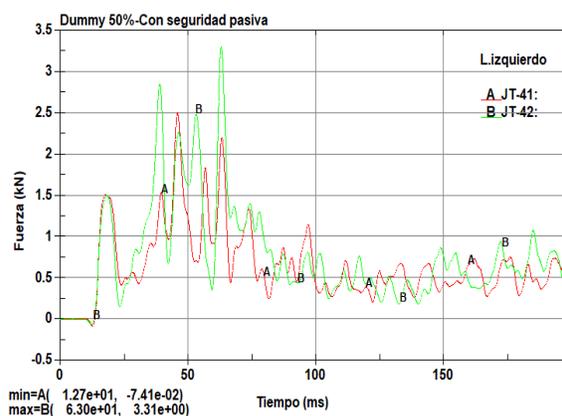
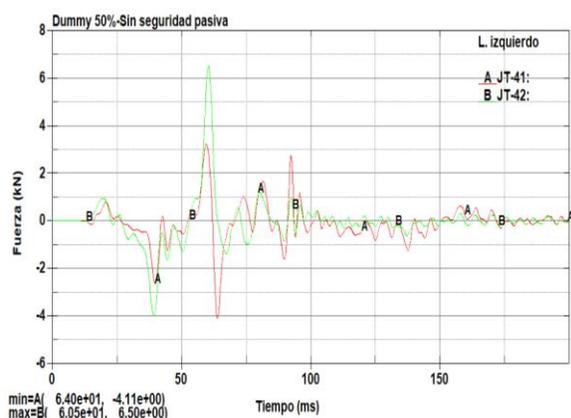
Fuerza de Compresión. Las cargas que provocan la fractura de la tibia producen fuerzas medibles en los extremos superior e inferior de la tibia, las cuales permiten determinar el riesgo de la misma. En la tabla 43 se muestra las gráficas resultantes para cada punto de análisis.

Tabla 43

Criterio TCFC, fuerza de compresión axial-colisión frontal

Colisión frontal sin seguridad pasiva

Colisión frontal con seguridad pasiva

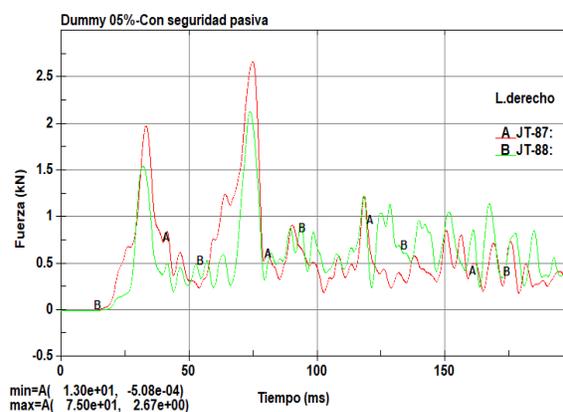
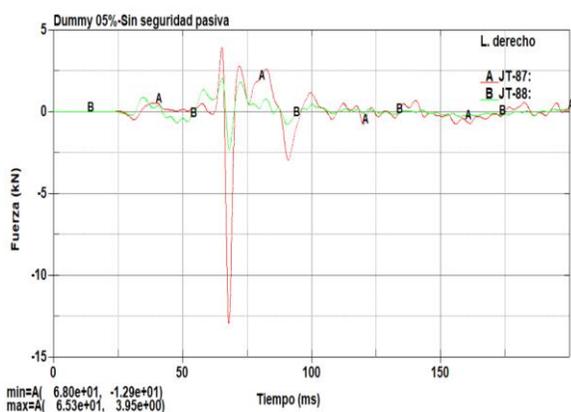
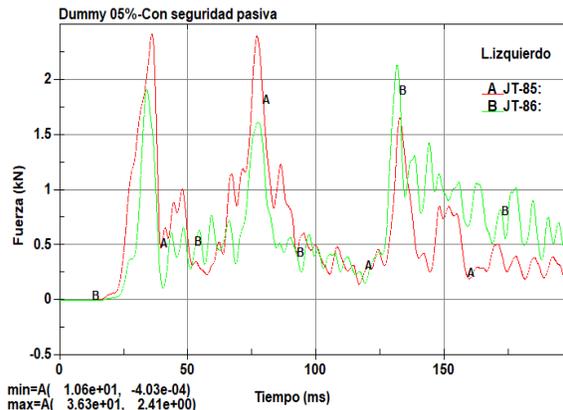
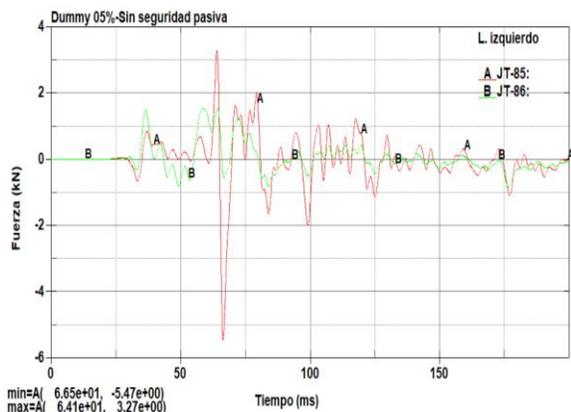


En las figuras se muestra la fuerza de compresión axial mediante las curvas A y B, las cuales representan un punto superior e inferior de la tibia para cada lado, respectivamente. Se obtiene un valor máximo de 9.08 kN en el lado derecho y parte superior de la tibia con efecto en tracción. Se considera el punto más sensible para determinar el TI.

En las figuras se muestra la fuerza de compresión axial mediante las curvas A y B, las cuales representan un punto superior e inferior de la tibia para cada lado, respectivamente. Se obtiene un valor máximo de 6.52 kN en el lado derecho y parte inferior de la tibia con efecto en tracción. Se considera el punto más sensible para determinar el TI.

Colisión frontal sin seguridad pasiva

Colisión frontal con seguridad pasiva



En las figuras se muestra la fuerza de compresión axial mediante las curvas A y B, las cuales representan un punto superior e inferior de la tibia para cada lado, respectivamente. Se obtiene un valor máximo de 12.9 kN en el lado derecho y parte superior de la tibia. Se considera el punto más sensible para determinar el TI.

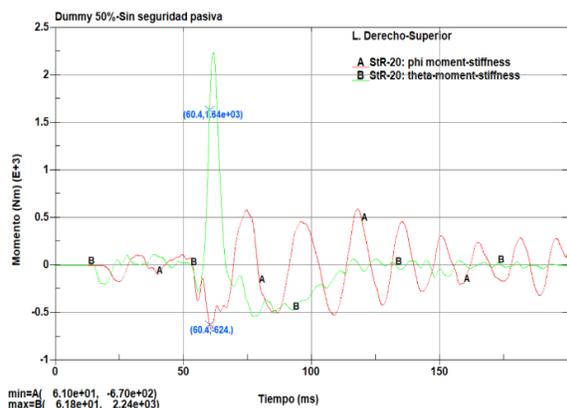
En las figuras se muestra la fuerza de compresión axial mediante las curvas A y B, las cuales representan un punto superior e inferior de la tibia para cada lado con efecto de tracción, respectivamente. Se obtiene un valor máximo de 2.67 kN en el lado derecho y parte superior de la tibia. Se considera el punto más sensible para determinar el TI.

Momento de Flexión. De la misma manera, el momento de flexión se produce por cargas en los extremos superior e inferior de la tibia, la cual se hace susceptible a fracturas. En la tabla 44 se muestra las gráficas resultantes para cada punto de análisis.

Tabla 44

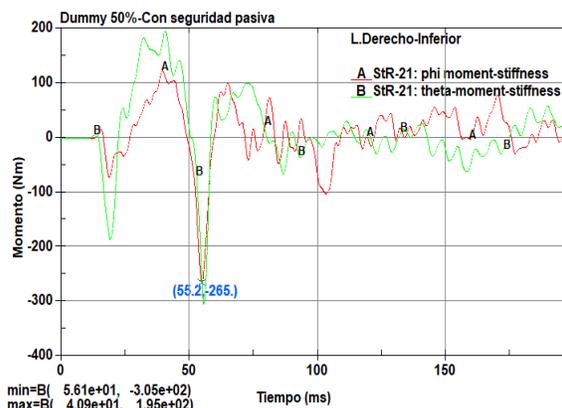
Criterio TCFC, momento de flexión-colisión frontal

Colisión frontal sin seguridad pasiva

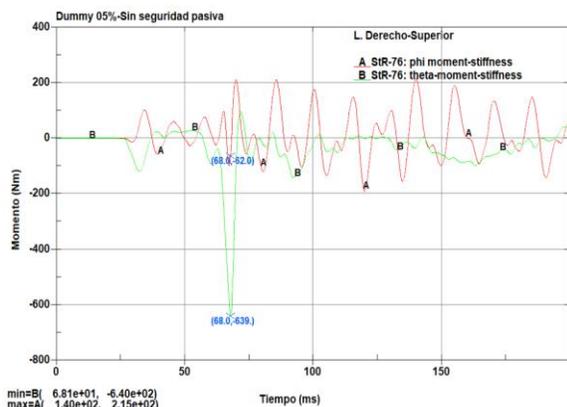


La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia derecha. Para 60.4 ms, correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de -624 Nm y My de 1640 Nm.

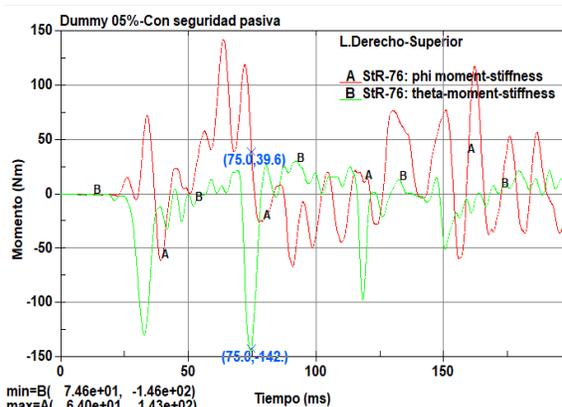
Colisión frontal con seguridad pasiva



La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte inferior de la tibia derecha. Para 55.2 ms, correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx y My es de -265 Nm.



La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia derecha. Para 68 ms, correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de -62 Nm y My de -639 Nm.



La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia derecha. Para 75 ms, correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de 39.6 Nm y My de -142 Nm.

Índice de Lesión TI. Al considerar la fuerza máxima ejercida sobre un punto específico de la tibia, y el momento de flexión producido al mismo tiempo, se determina el índice TI para cada Dummy como se muestra en la tabla 45.

Tabla 45

Índice de lesión TI para colisión frontal

Estudio	Fuerza axial [kN]	Mx [Nm]	My [Nm]	M. Resultante [Nm]	TI
Ensayo sin seguridad pasiva					
Dummy 50%	9,08	-625	1640	1755,057	8,053
Dummy 05%	-12,9	-62	-639	642,001	6.146
Ensayo con seguridad pasiva					
Dummy 50%	6.52	-265	-265	374.767	1.847
Dummy 05%	2.67	39.6	-142	147.418	1.398

Nota. En la tabla se observa que el índice TI del Dummy 05 percentil es el único que se encuentra admisible para el rendimiento de seguridad.

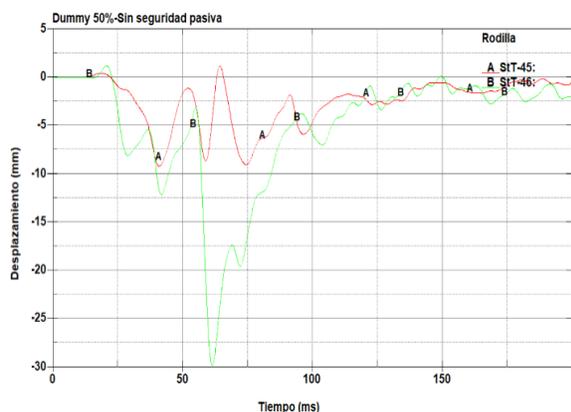
Movimiento de las Articulaciones en las Rodillas

El criterio hace referencia al movimiento generado en las articulaciones de la rodilla por fuerzas axiales de impacto, es importante evitar cargas concentradas para evitar daños localizados. En la tabla 46 se muestra las gráficas resultantes al criterio de estudio.

Tabla 46

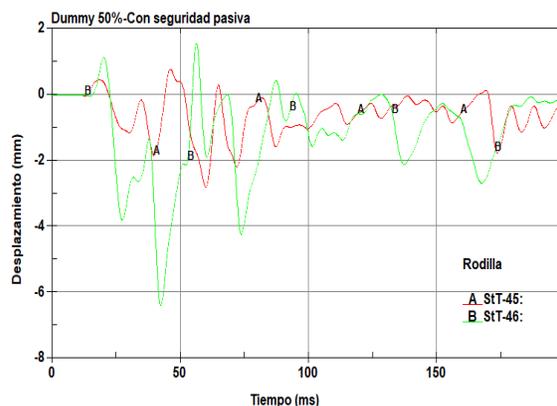
Criterio del movimiento de las articulaciones en la rodilla

Colisión frontal sin seguridad pasiva

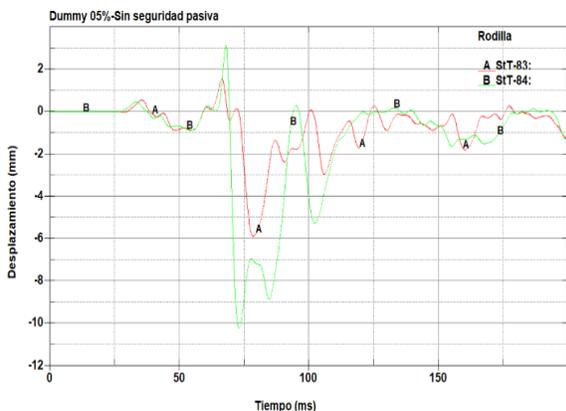


El gráfico muestra el desplazamiento de la rodilla izquierda y derecha representado en las curvas A y B, con un valor máximo de 9.14 mm y 29.4 mm respectivamente con una carga en compresión.

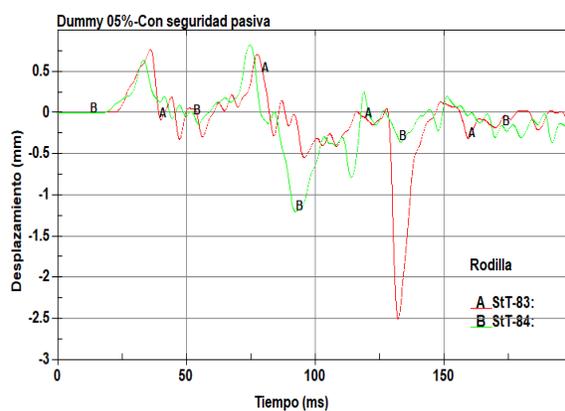
Colisión frontal con seguridad pasiva



El gráfico muestra el desplazamiento de la rodilla izquierda (StT- 45), con un valor máximo de 2.80 mm, mientras que en la rodilla derecha (StT- 46) se tiene un desplazamiento máximo de 6.40 mm, ambas con una carga en compresión.



El gráfico muestra el desplazamiento de la rodilla izquierda y derecha representado en las curvas A y B, con un valor máximo de 5.87 mm y 9.89 mm respectivamente con una carga en compresión.



El gráfico muestra el desplazamiento de la rodilla izquierda (StT- 83), con un valor máximo de 2.50 mm, mientras que en la rodilla derecha (StT- 84) se tiene un desplazamiento máximo de 1.20 mm, ambas con una carga en compresión.

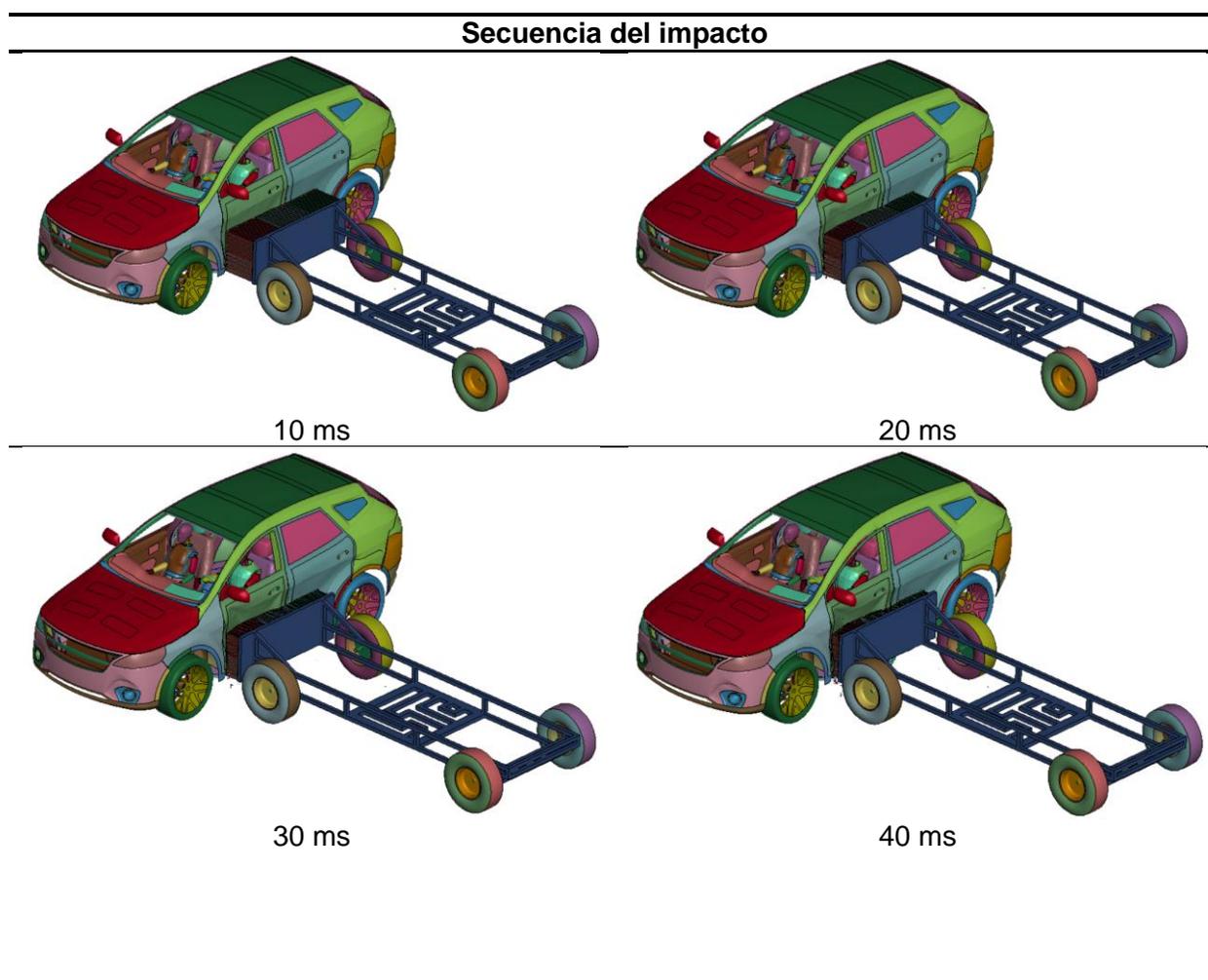
Colisión Lateral con Barrera Deformable Móvil

El ensayo corresponde al impacto lateral con un carro impactador de barrera deformable móvil sobre el vehículo tipo SUV en dos condiciones específicas, sin seguridad pasiva y con elementos de seguridad pasiva de acuerdo a las consideraciones del reglamento N° 95 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de la Naciones Unidas.

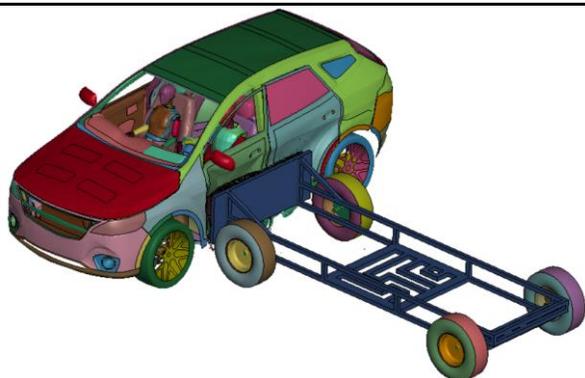
En la tabla 47 y tabla 48 se muestra la sucesión de impacto en base a los resultados de posprocesamiento.

Tabla 47

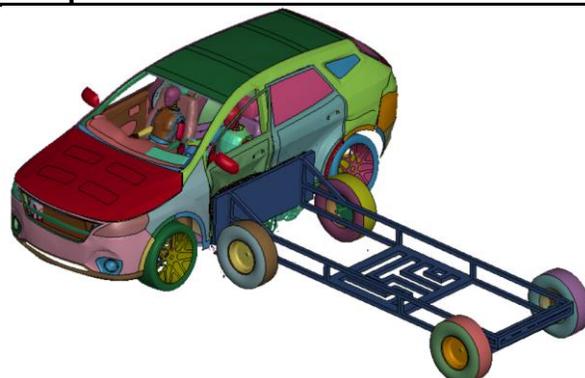
Simulación de colisión lateral sin seguridad pasiva



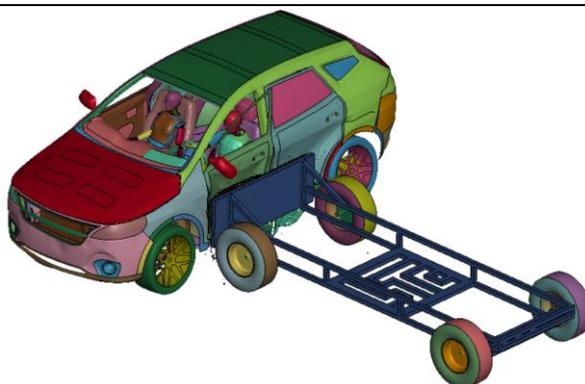
Secuencia del impacto



50 ms



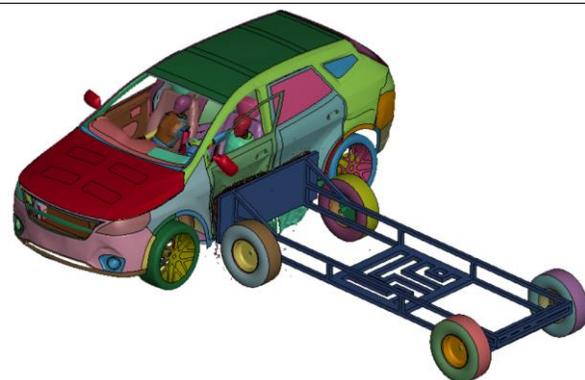
60 ms



70 ms



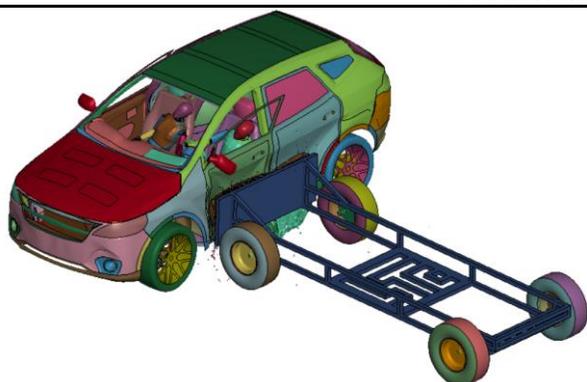
80 ms



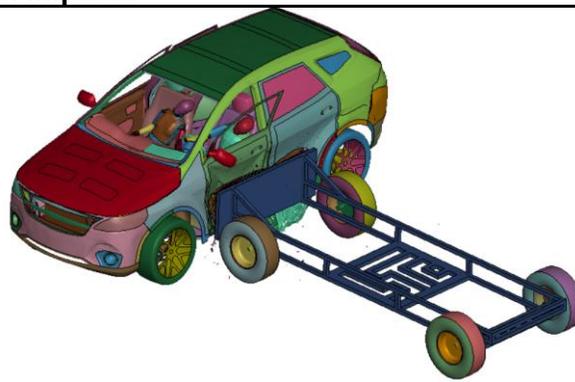
90 ms

100 ms

Secuencia del impacto



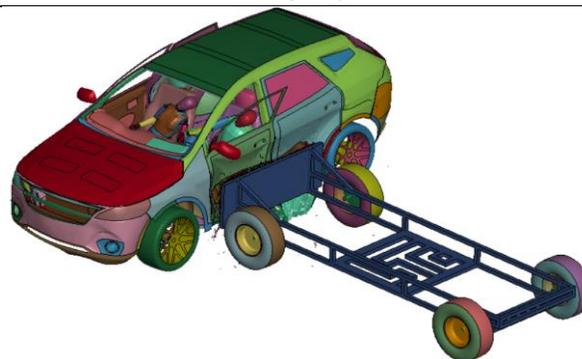
110 ms



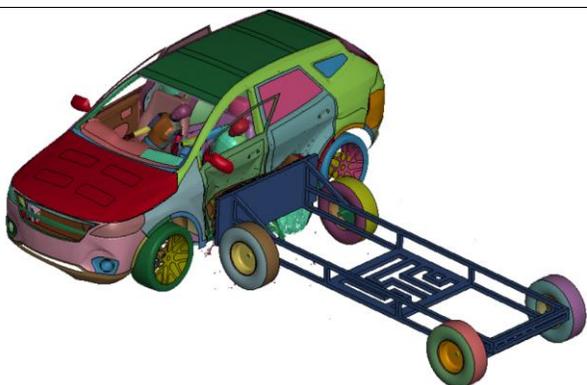
120 ms



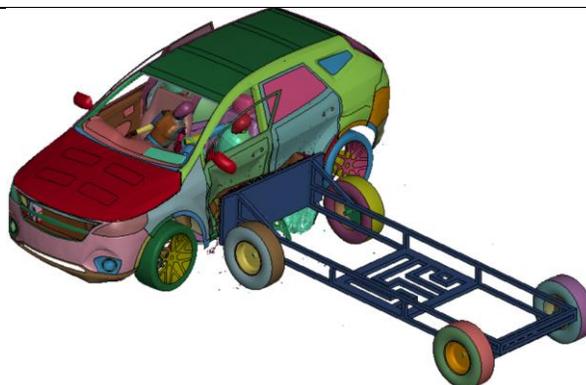
130 ms



140 ms

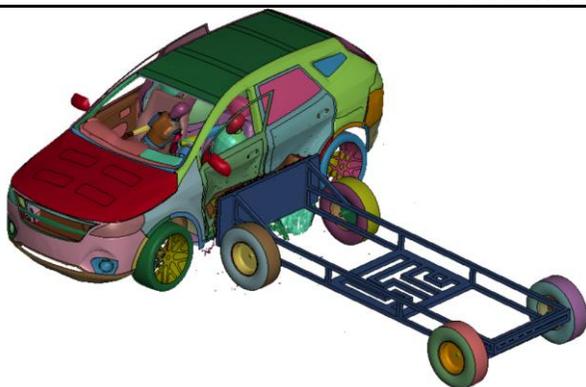


150 ms

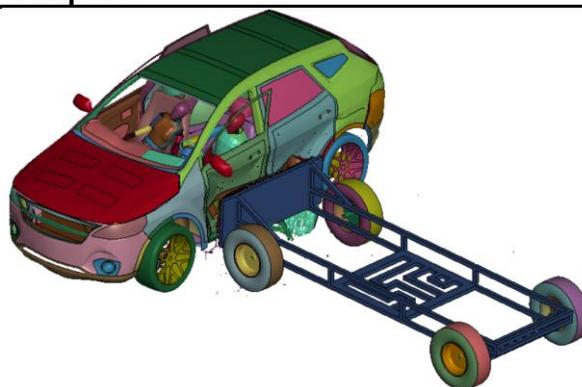


160 ms

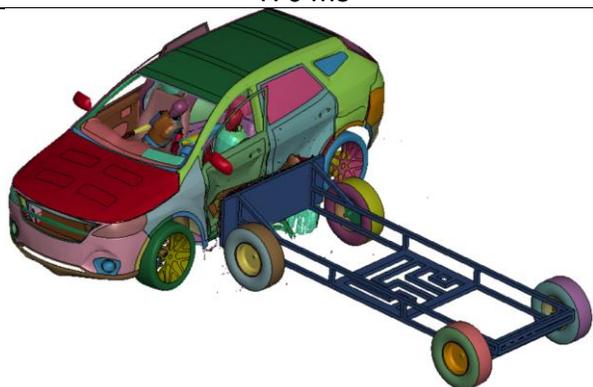
Secuencia del impacto



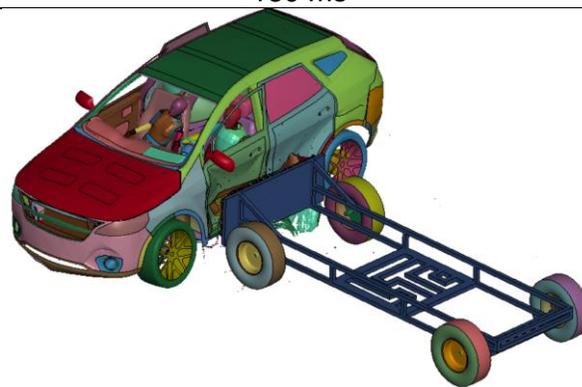
170 ms



180 ms



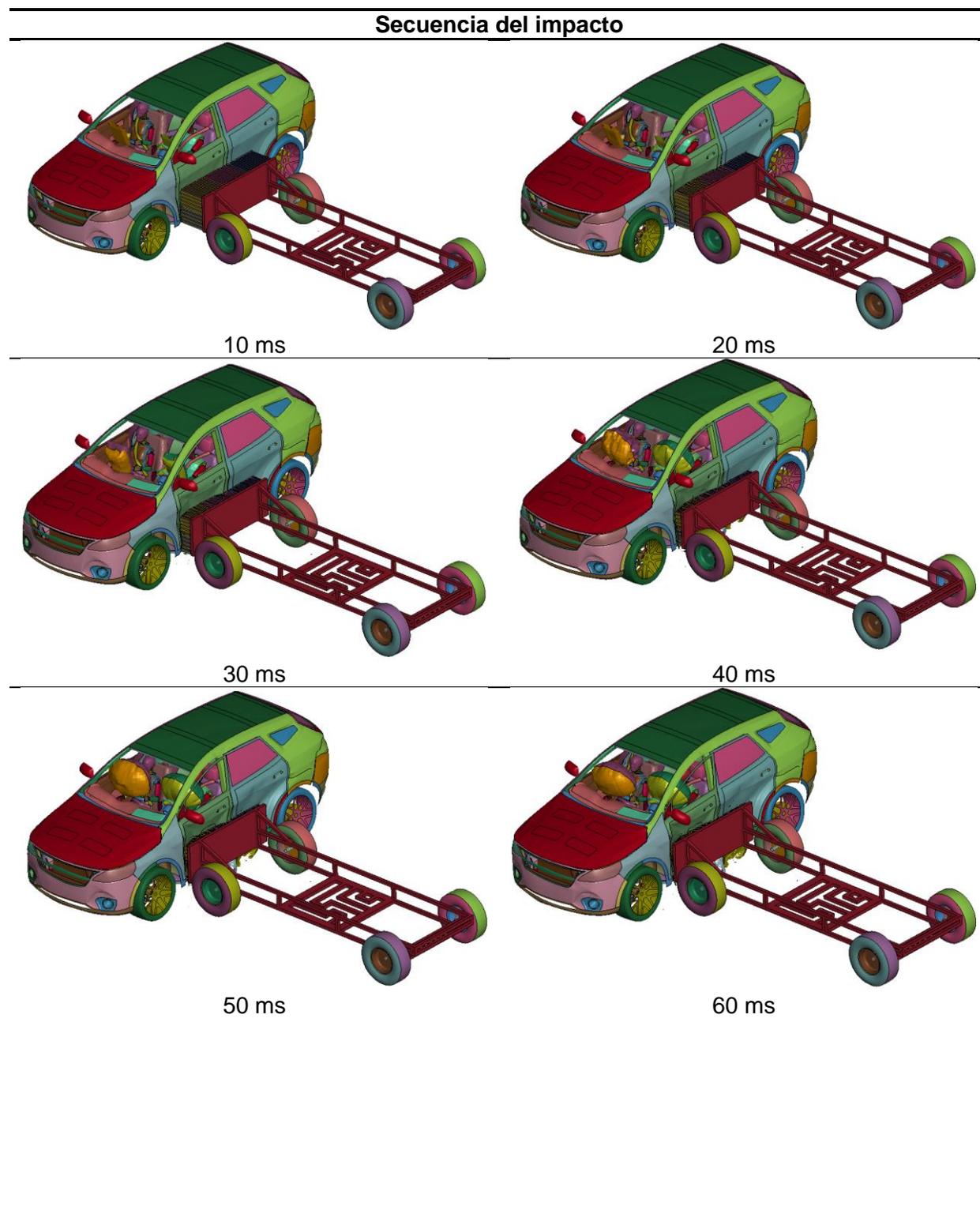
190 ms



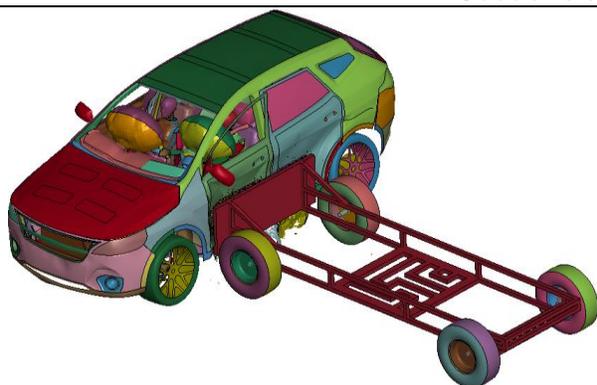
200 ms

Nota. La tabla muestra la sucesión del impacto lateral sin seguridad pasiva, donde a partir de 50 ms aproximadamente se produce el contacto entre las extremidades de los dummies y la estructura del vehículo. De la misma manera la cabeza del Dummy 50 percentil tiene contacto fuerte con la ventana a partir de los 75 ms.

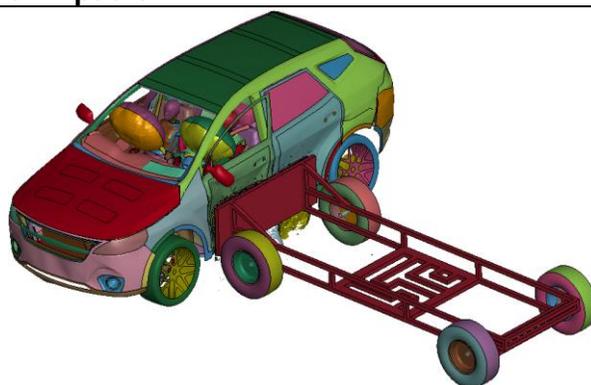
Tabla 48

Simulación de colisión lateral con seguridad pasiva

Secuencia del impacto



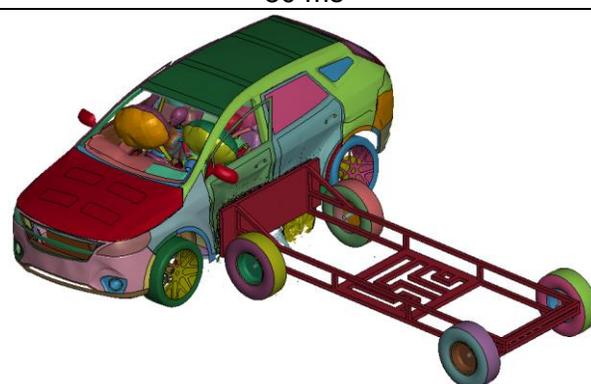
70 ms



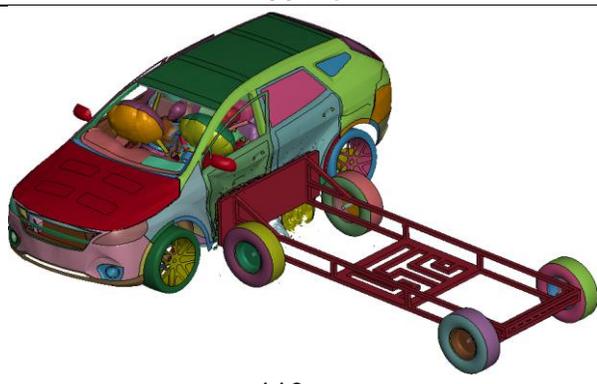
80 ms



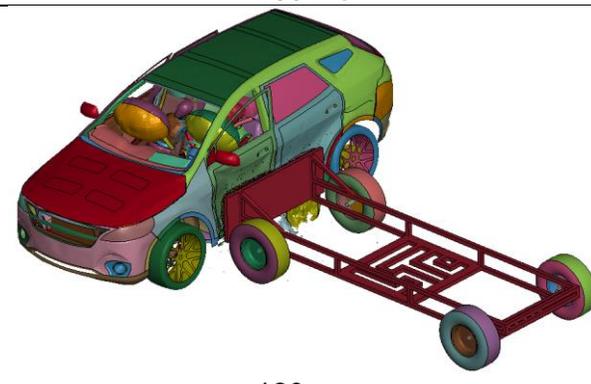
90 ms



100 ms

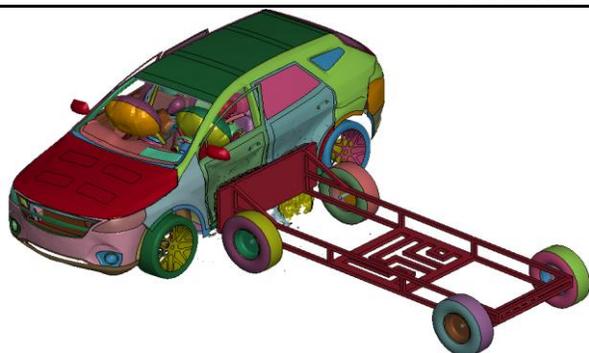


110 ms

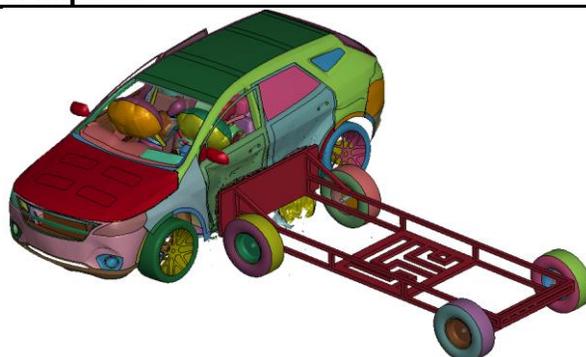


120 ms

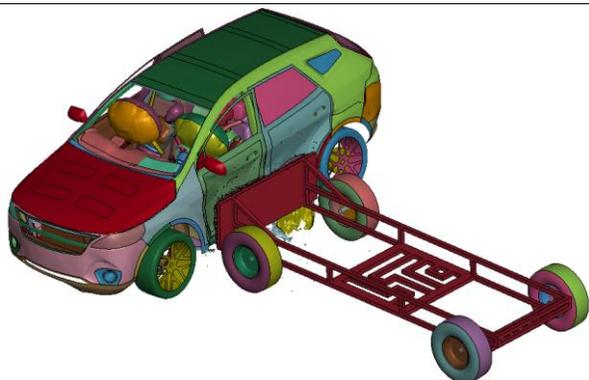
Secuencia del impacto



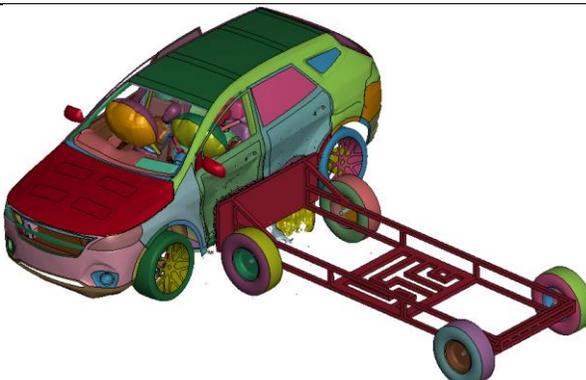
130 ms



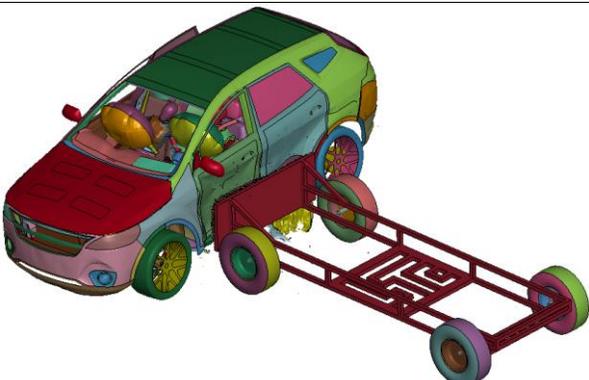
140 ms



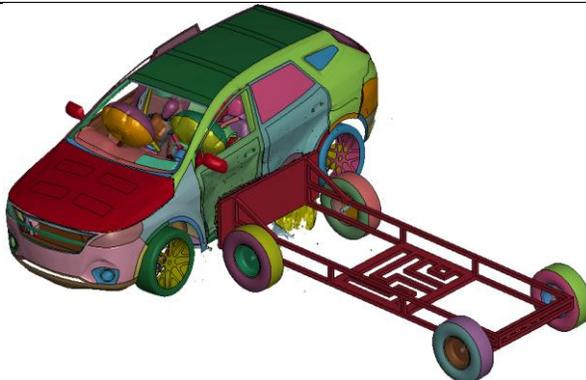
150 ms



160 ms

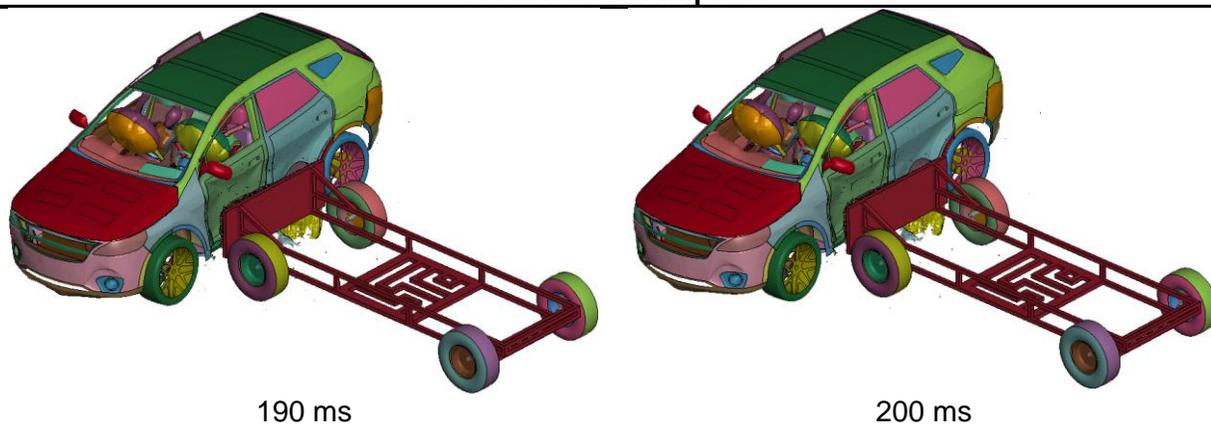


170 ms



180 ms

Secuencia del impacto



Nota. La tabla muestra la sucesión del impacto lateral con seguridad pasiva, donde a partir de 50 ms aproximadamente se produce el contacto entre las extremidades de los dummies y la estructura del vehículo. Mientras que por lo contrario de la tabla 47, la cabeza del Dummy HIII 50 percentil no llega a tener contacto con la ventana esto debido al uso del cinturón de seguridad de tres puntos.

Criterio de Lesión en la Cabeza HIC

En la tabla 49, se muestra las gráficas resultantes del HIC36 para el Dummy *Fast* Híbrido 50 y 05 percentil en el ensayo de colisión lateral en las dos condiciones establecidas.

Tabla 49

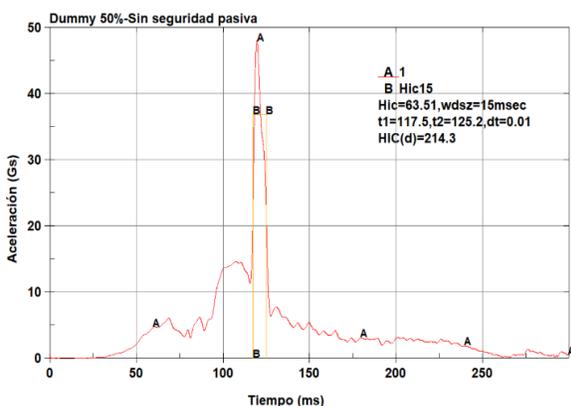
Criterio HIC36-colisión lateral

Colisión lateral sin seguridad pasiva	Colisión lateral con seguridad pasiva
<p>Node Ids A_1 B Hic36 Hic=63.51,wsz=36msec t1=117.5,t2=125.2,dt=0.01 HIC(d)=214.3</p>	<p>Node Ids A_1 B Hic36 Hic=10.29,wsz=36msec t1=36.93,t2=72.92,dt=0.01 HIC(d)=174.2</p>
<p>El gráfico muestra la aceleración de la cabeza con un valor máximo de 48.1 Gs, y como resultado un HIC36 de 63.51 en el intervalo de tiempo $t_1=117.5$ ms y $t_2=125.2$ ms.</p>	<p>El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza, con una aceleración máxima de 13.3 Gs, evaluado desde un $t_1=36.93$ ms hasta un $t_2=72.92$ ms dando como resultado un HIC36 de 10.29.</p>
<p>Node Ids A_23309 B Hic36 Hic=12.22,wsz=36msec t1=96.88,t2=132.9,dt=0.01 HIC(d)=175.6</p>	<p>Node Ids A_23309 B Hic36 Hic=4.34,wsz=36msec t1=95.51,t2=131.6,dt=0.01 HIC(d)=169.7</p>
<p>El gráfico muestra la aceleración de la cabeza con valor máximo de 13.6 Gs, y como resultado un HIC36 de 12.22 en el intervalo de tiempo $t_1=96.88$ ms y $t_2=132.9$ ms.</p>	<p>El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza con una aceleración máxima de 9.61 Gs, evaluado desde un $t_1=95.51$ ms hasta un $t_2=131.6$ ms dando como resultado un HIC 36 = 4.34.</p>

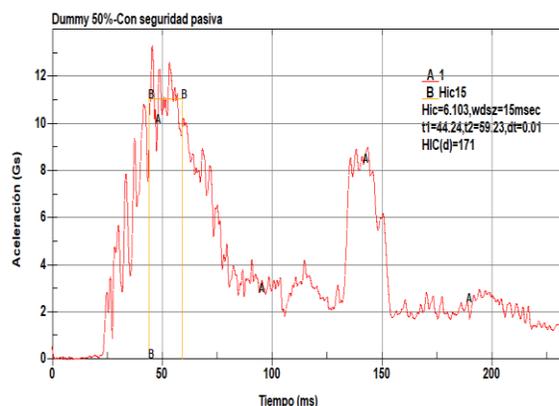
En la tabla 50, se muestra las gráficas resultantes del HIC15 para el Dummy *Fast HII 50* y 05 percentil en el ensayo de colisión lateral en las dos condiciones establecidas.

Tabla 50

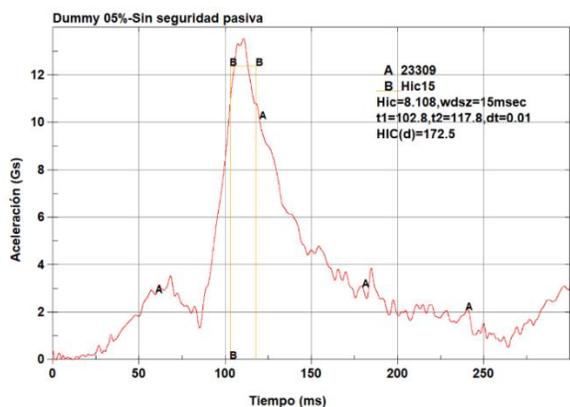
Criterio Hic15-colisión lateral

Colisión lateral sin seguridad pasiva

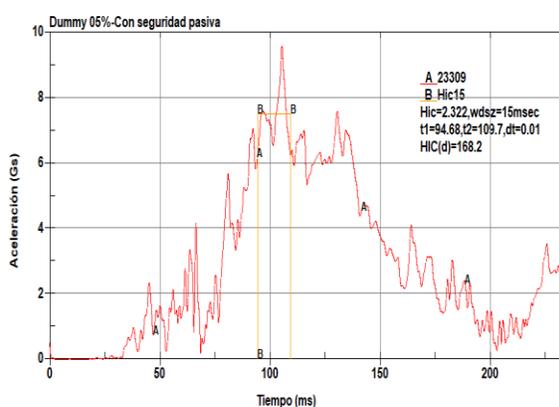
El gráfico muestra la aceleración de la cabeza con un valor máximo 48.1 Gs, y como resultado un HIC15 de 63.51 en el intervalo de tiempo $t_1=117.5$ ms y $t_2=125.2$ ms.

Colisión lateral con seguridad pasiva

El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza con aceleración máxima de 9.61 Gs, evaluado desde un $t_1= 44.24$ ms hasta un $t_2= 59.23$ ms dando como resultado un HIC 15 = 6.10.



El gráfico muestra la aceleración de la cabeza con un valor máximo de 13.6 Gs, y como resultado un HIC15 de 8.108 en el intervalo de tiempo $t_1=102.8$ ms y $t_2=117.8$ ms.



El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza con aceleración máxima de 9.61 Gs, evaluado desde un $t_1= 94.68$ ms hasta un $t_2= 109.7$ ms dando como resultado un HIC 15 = 2.32.

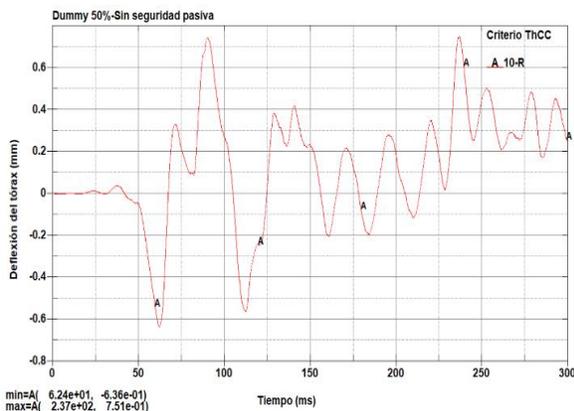
Compresión del Tórax ThCC

La deflexión del tórax producto de la compresión producida en los dummies HIII 50 y 05 percentil durante la colisión lateral se muestra en la tabla 51.

Tabla 51

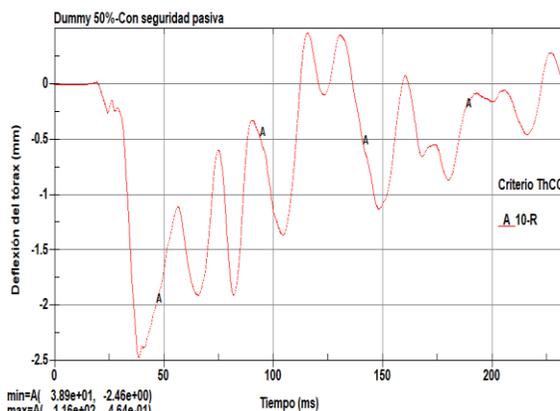
Criterio ThCC-colisión lateral

Colisión lateral sin seguridad pasiva

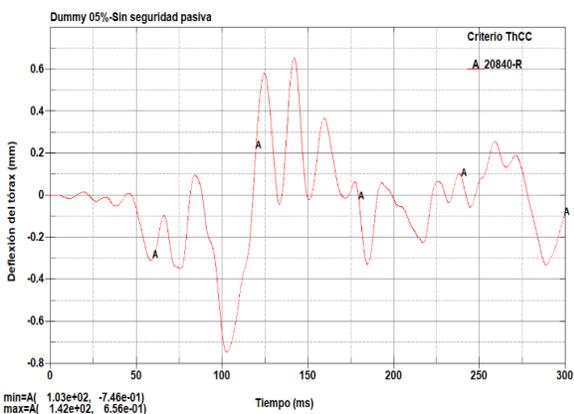


El gráfico indica el valor máximo del desplazamiento de 0.751 mm, producto de una carga en tracción.

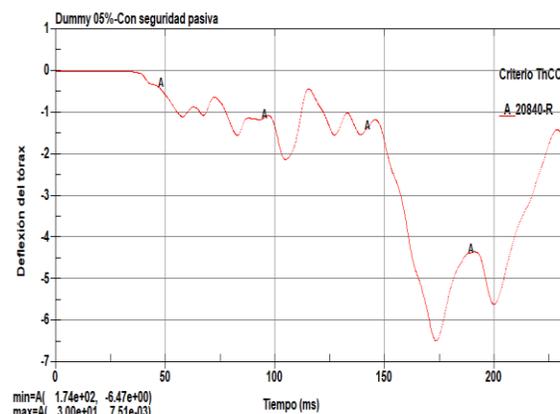
Colisión lateral con seguridad pasiva



El gráfico muestra la deflexión del tórax en mm, donde se obtiene un valor máximo de 2.46 mm, producto de una carga en compresión.



El gráfico indica el valor máximo de la deflexión del tórax de 0.746 mm, producto de una carga en compresión.



El gráfico muestra la deflexión del tórax en mm, donde se obtiene un valor máximo de 6.47 mm, producto de una carga en compresión.

Fuerza sobre la Pelvis PSPF

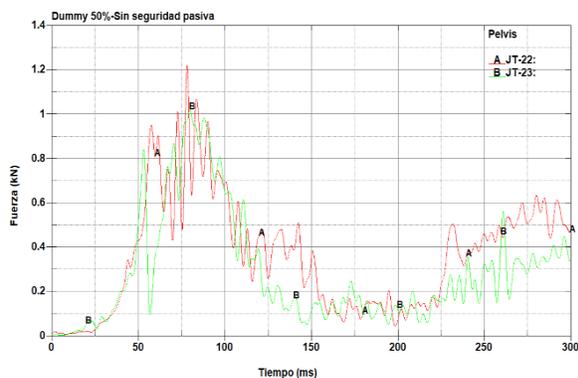
El criterio se determina mediante la resistencia que presenta la pelvis específicamente en la zona de la sínfisis púbica, donde la fuerza máxima ejercida no debe superar los 6 kN esto

en base a la norma N°95 de la CEPE y protocolo de Latin NCAP. El parámetro medible se basa en la fuerza resultante para cada lado de la pelvis los mismos que se detallan en la tabla 52.

Tabla 52

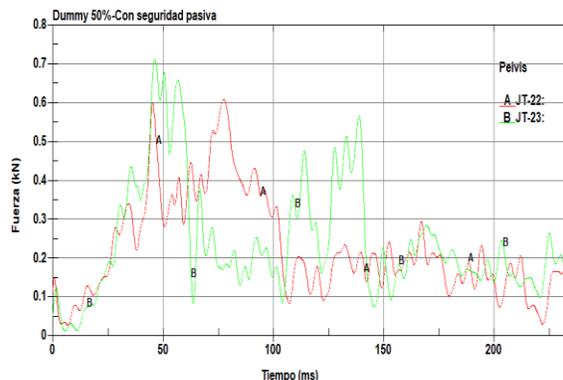
Criterio de fuerzas sobre la pelvis-colisión lateral

Colisión lateral sin seguridad pasiva

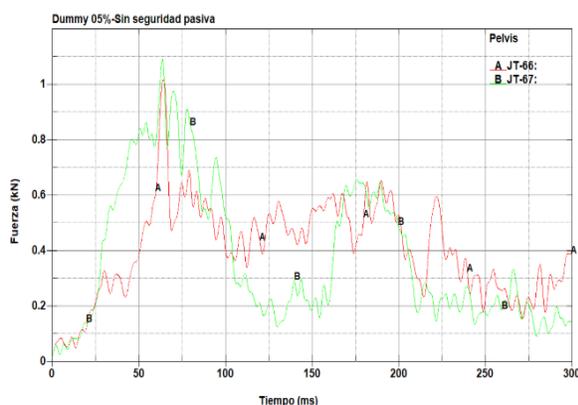


La gráfica indica la fuerza resultante en la pelvis parte izquierda y derecha mediante las curvas A y B respectivamente, los valores obtenidos son 1.22 kN y 1.02 kN para cada una.

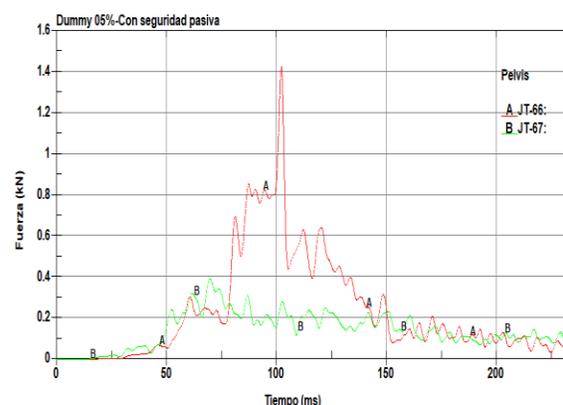
Colisión lateral con seguridad pasiva



La gráfica muestra la fuerza resultante sobre la pelvis en la parte izquierda (JT-22), donde se tiene una fuerza máxima de 0.610 kN, mientras que en la parte derecha de la pelvis (JT-23) actúa una fuerza máxima de 0.714 kN.



La gráfica indica la fuerza resultante en la pelvis parte izquierda y derecha mediante las curvas A y B respectivamente, los valores obtenidos son 1.02 kN y 1.09 kN para cada una.



La gráfica muestra la fuerza resultante sobre la pelvis en la parte izquierda (JT-66), donde se tiene una fuerza máxima de 1.43 kN, mientras que en la parte derecha de la pelvis (JT-67) actúa una fuerza máxima de 0.393 kN.

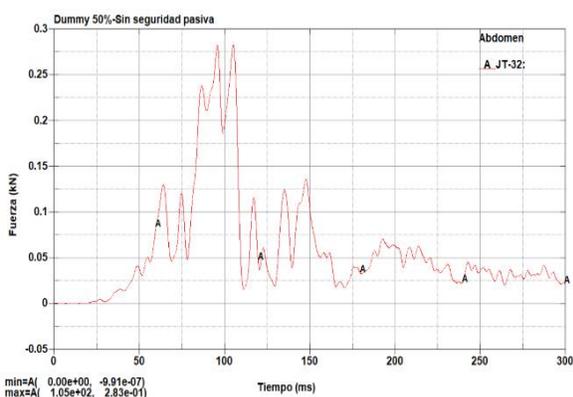
Fuerza sobre el Abdomen APF

El criterio se determina mediante la resistencia que presenta el abdomen, donde la fuerza soportada deberá ser inferior o igual a 2,5 kN, esto en base a la norma N°95 de la CEPE y protocolo de evaluación Latin NCAP, correspondientes a ensayos de colisión lateral. Los gráficos de la fuerza resultante para cada uno de los dummies se muestran en la tabla 53.

Tabla 53

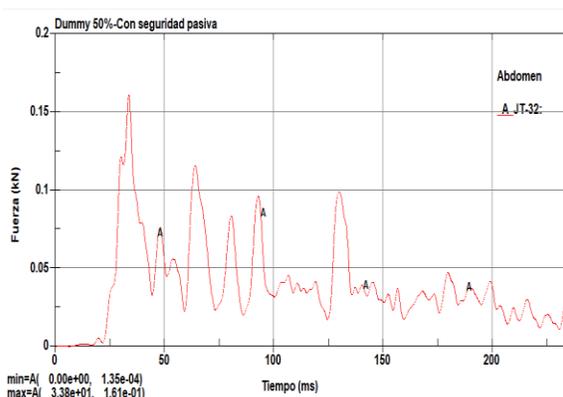
Criterio de fuerzas sobre el abdomen-colisión lateral

Colisión lateral sin seguridad pasiva

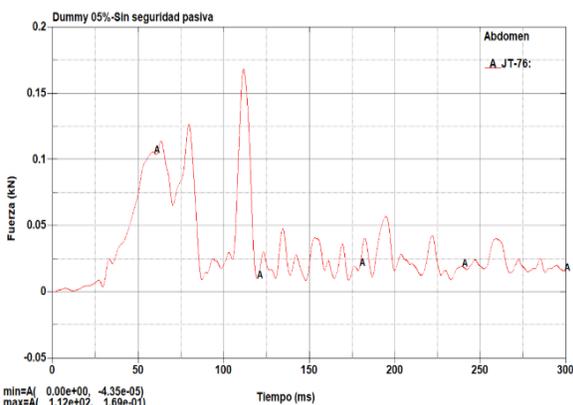


La gráfica muestra la fuerza resultante ejercida sobre el abdomen, con un valor máximo de 0.283 kN.

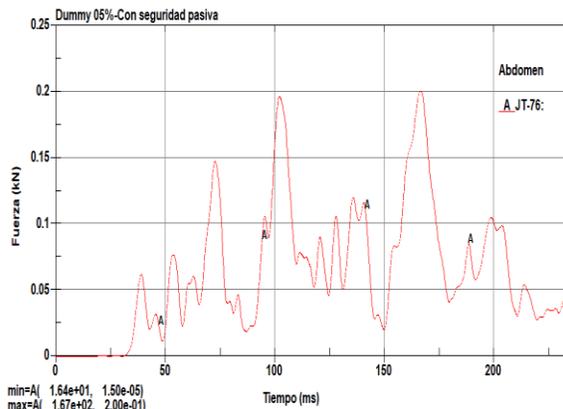
Colisión lateral con seguridad pasiva



La gráfica muestra la fuerza resultante en la zona del abdomen (JT-32), donde se obtiene una fuerza máxima ejercida de 0.161 kN.



La gráfica muestra la fuerza resultante ejercida sobre el abdomen, con un valor máximo de 0.169 kN.



La gráfica muestra la fuerza resultante en la zona del abdomen (JT-76), donde se obtiene una fuerza máxima ejercida de 0.2 kN.

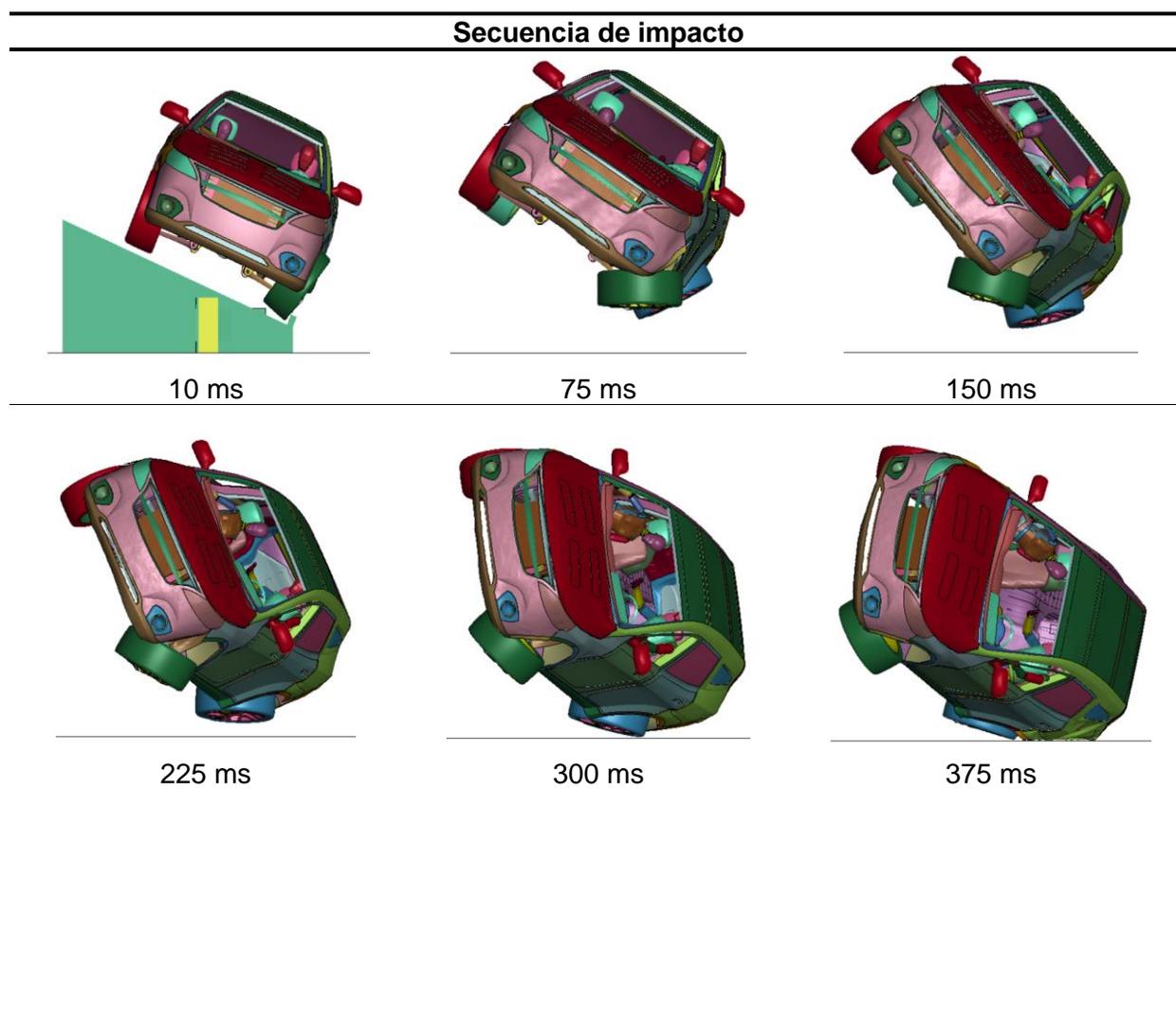
Vuelco

El ensayo corresponde a la aplicación del reglamento FMVSS208 y la combinación con el protocolo Latin NCAP para la comparación en los criterios de lesión.

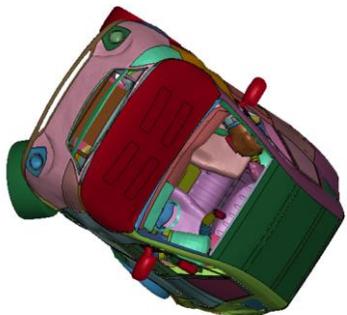
El vuelco del vehículo tipo SUV mediante la simulación y el posprocesamiento de los resultados se muestra en la tabla 54 y tabla 55 correspondiente a la secuencia del vuelco en las dos condiciones de seguridad.

Tabla 54

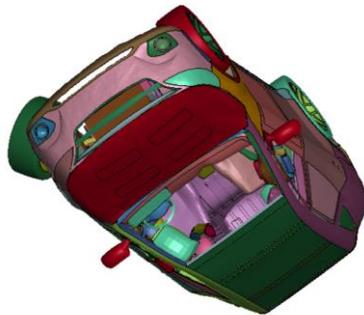
Simulación de vuelco sin seguridad pasiva



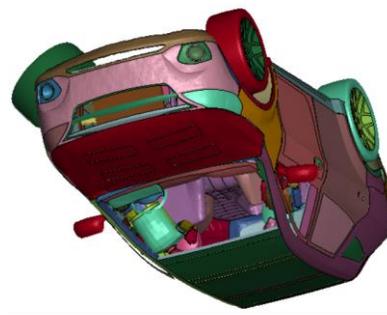
Secuencia de impacto



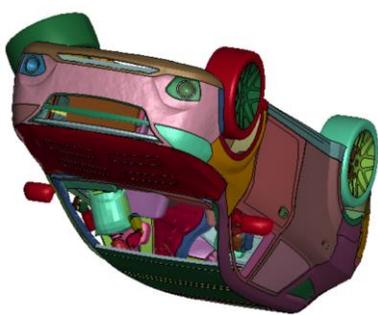
450 ms



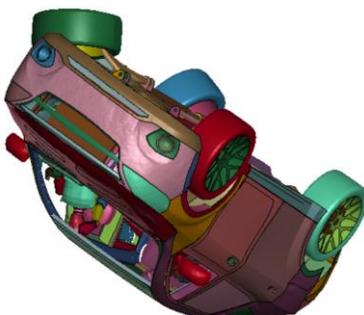
525 ms



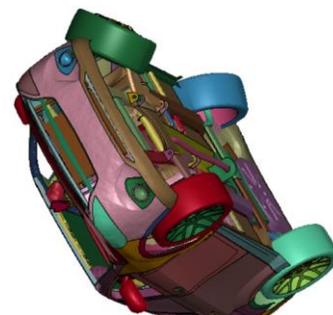
600 ms



675 ms



750 ms



825 ms



900 ms



975 ms



1050 ms



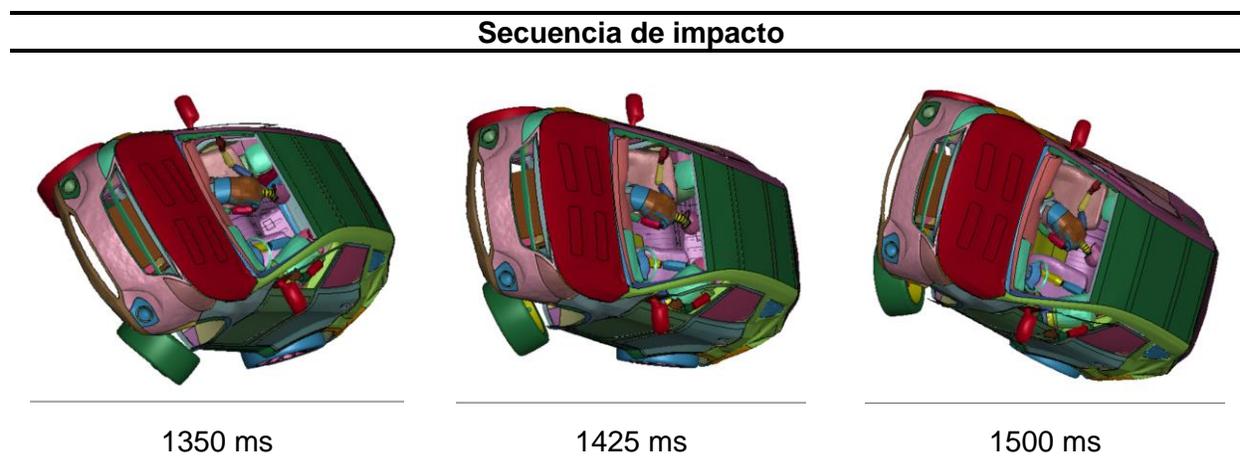
1125 ms



1200 ms



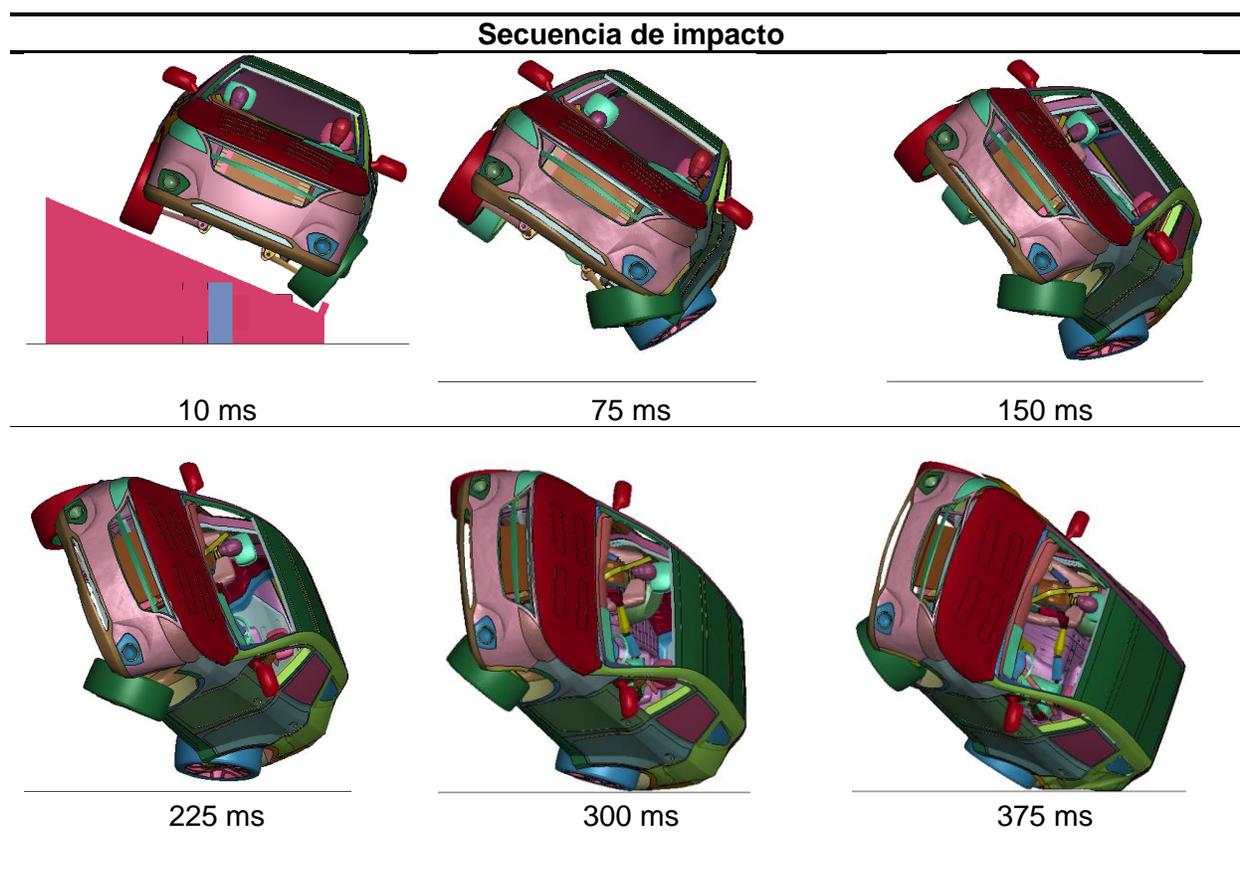
1275 ms



Nota. La tabla muestra la secuencia de vuelco del vehículo tipo SUV, donde el contacto entre la estructura y el suelo surge a partir de 300 ms hasta 1100 ms el cual completa la primera vuelta.

Tabla 55

Simulación de vuelco con seguridad pasiva



Secuencia de impacto



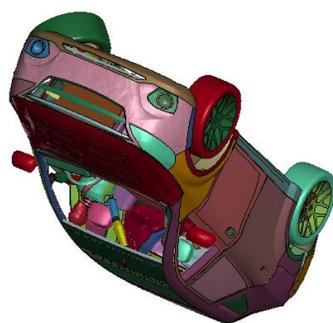
450 ms



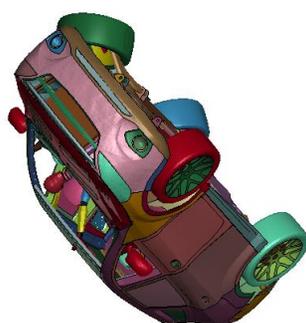
525 ms



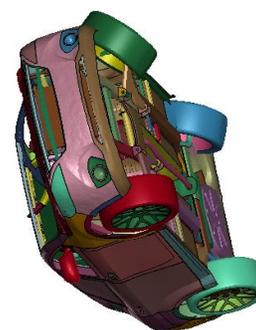
600 ms



675 ms



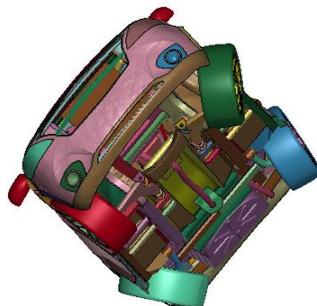
750 ms



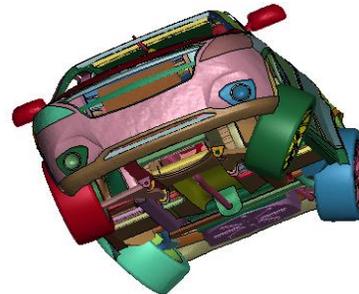
825 ms



900 ms



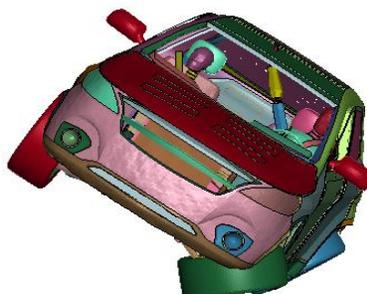
975 ms



1050 ms



1125 ms

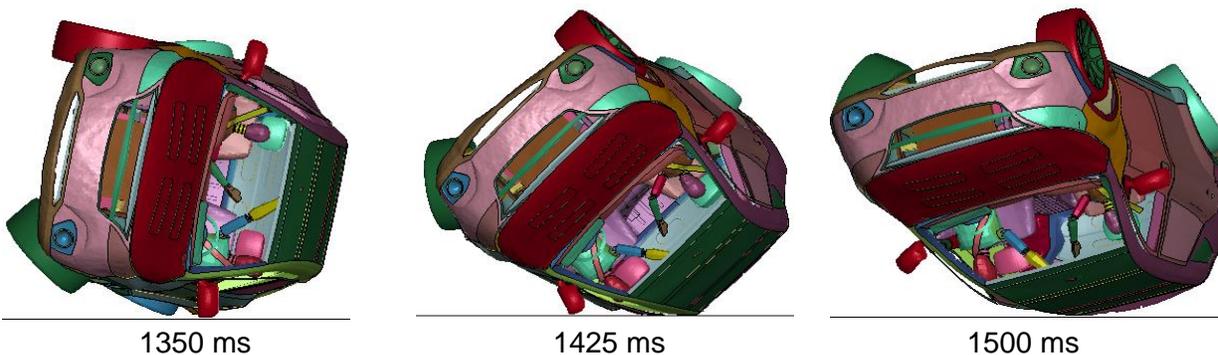


1200 ms



1275 ms

Secuencia de impacto



Nota. La tabla muestra la secuencia de vuelco del vehículo tipo SUV, donde el contacto entre la estructura y el suelo surge a partir de 315 ms hasta 110 ms, el cual completa la primera vuelta.

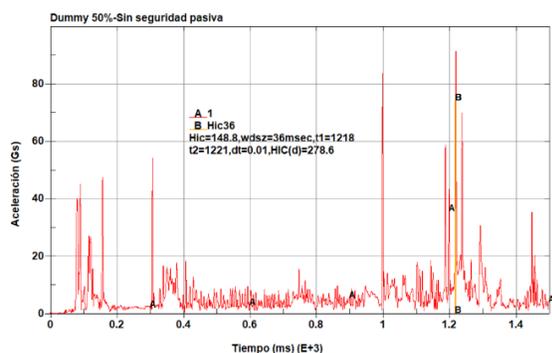
Criterio de Lesión en la Cabeza HIC

El criterio de lesión de la cabeza HIC36 y HIC15 para los dummies HIII 50 y 05 percentil se obtiene del posprocesamiento de la simulación de vuelco, los mismos se detallan en la tabla 56 y 57 respectivamente.

Tabla 56

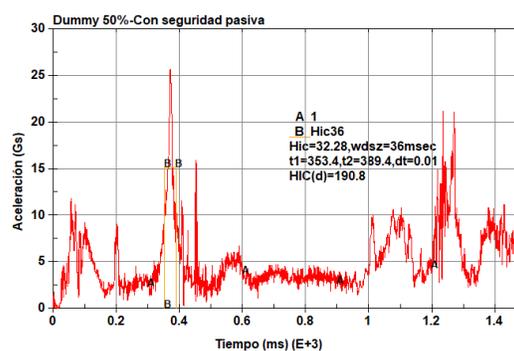
Criterio HIC36-vuelco

Vuelco sin seguridad pasiva



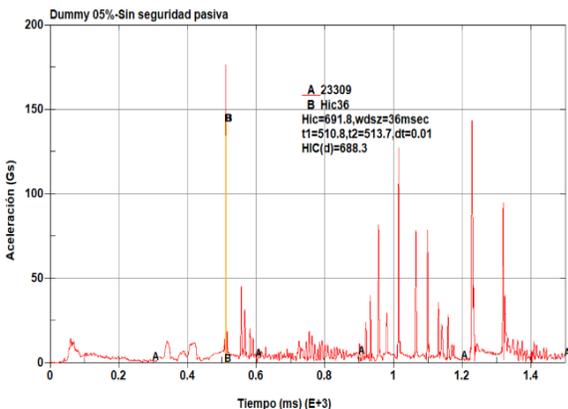
El gráfico muestra la aceleración de la cabeza, la cual alcanza un valor máximo de 91.5 Gs, y como resultado un HIC36 de 148.8 en el intervalo de tiempo $t_1=1218$ ms y $t_2=1221$ ms.

Vuelco con seguridad pasiva



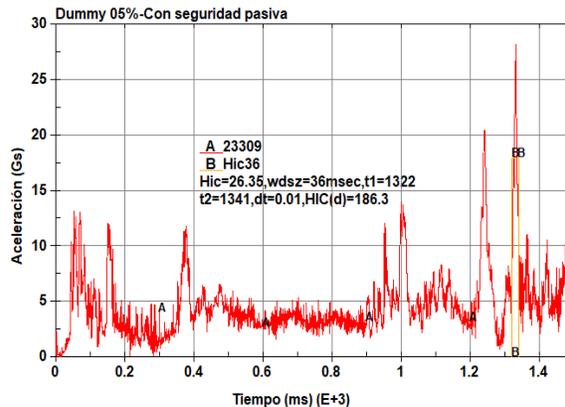
El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza, donde la aceleración máxima alcanzada es de 25.7 Gs, así también el criterio HIC36 evaluado desde un $t_1=353.4$ ms hasta un $t_2=389.4$ ms da como resultado 32.28.

Vuelco sin seguridad pasiva



El gráfico muestra la aceleración de la cabeza, la cual alcanza un valor máximo de 176 Gs, y como resultado un HIC36 de 691.8 en el intervalo de tiempo $t_1=510.8$ ms y $t_2=513.7$ ms.

Vuelco con seguridad pasiva

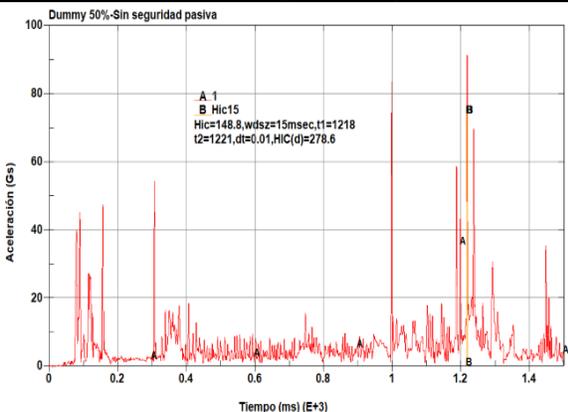


El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza, donde la aceleración máxima alcanzada es de 28.3 Gs, así también el criterio HIC36 evaluado desde un $t_1=1322$ ms hasta un $t_2=1341$ ms da como resultado un HIC 36 = 26.35.

Tabla 57

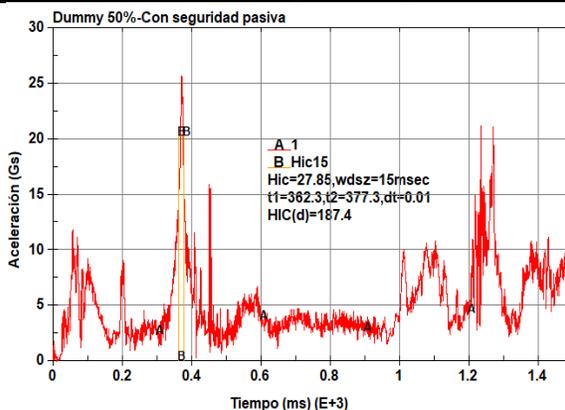
Criterio HIC15-vuelco

Vuelco sin seguridad pasiva

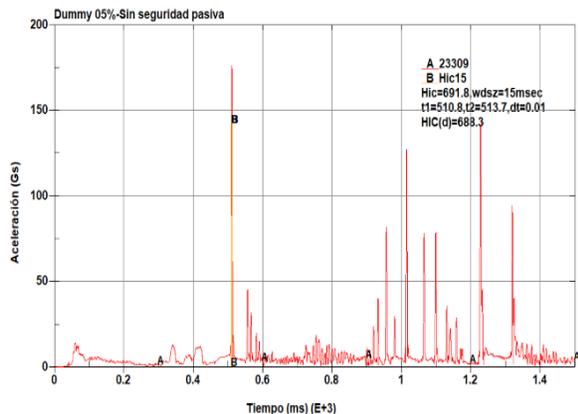


El gráfico muestra la aceleración de la cabeza, la cual alcanza un valor máximo de 91.5 Gs, y como resultado un HIC15 de 148.8 en el intervalo de tiempo $t_1=1218$ ms y $t_2=1221$ ms.

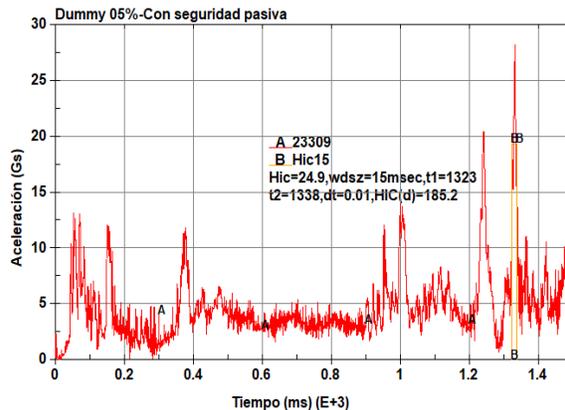
Vuelco con seguridad pasiva



El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza (HIC 15), donde la aceleración máxima alcanzada con la implementación de seguridad pasiva es de 26 Gs, así también el criterio HIC 15 evaluado desde un $t_1=362.3$ ms hasta un $t_2=377.3$ ms da como resultado un HIC = 27.85.

Vuelco sin seguridad pasiva


El gráfico muestra la aceleración de la cabeza, la cual alcanza un valor máximo de 176 Gs, y como resultado un HIC15 de 691.8 en el intervalo de tiempo $t_1=510.8$ ms y $t_2=513.7$ ms.

Vuelco con seguridad pasiva


El gráfico muestra los resultados del criterio de la lesión en la cabeza (HIC 15), donde la aceleración máxima alcanzada con la implementación de seguridad pasiva es de 27.7 Gs, así también el criterio HIC 15 evaluado desde un $t_1= 1323$ ms hasta un $t_2= 1338$ ms da como resultado un HIC = 24.9.

Criterio de Lesión del Cuello NIC

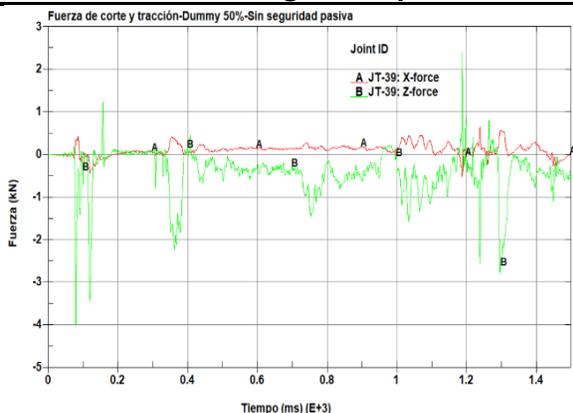
El criterio se basa en el análisis de la fuerza de compresión, fuerza de tracción, fuerza de corte y momento de flexión generado sobre el cuello.

Fuerza de Tracción y Corte. La fuerza de tracción se debe a una carga axial sobre el cuello, la misma puede adoptar efecto de compresión. De la misma manera la fuerza de corte o cizalladura puede tener efecto negativo o positivo dependiendo de la dirección, estos fenómenos suceden por las condiciones y el ambiente producido durante la colisión lateral. Las gráficas resultantes se muestran en la tabla 58 de acuerdo al posprocesamiento del ensayo.

Tabla 58

Criterio NIC, fuerza de corte y tracción-vuelco

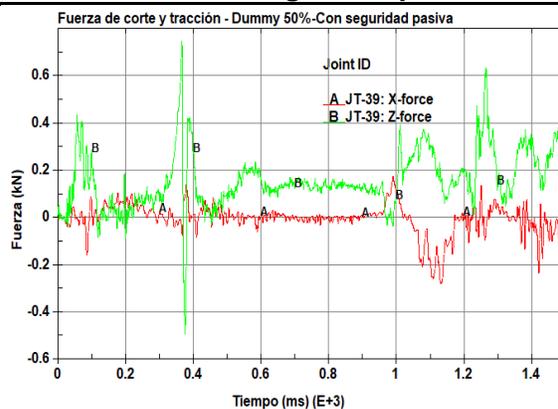
Vuelco sin seguridad pasiva



El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de 0.657 kN y -4.02 kN en cada una.

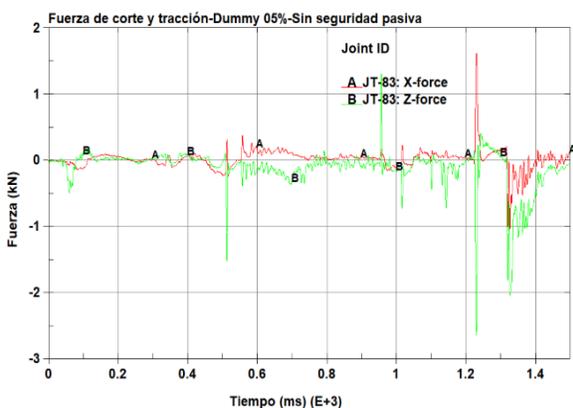
El signo negativo indica efecto de compresión.

Vuelco con seguridad pasiva



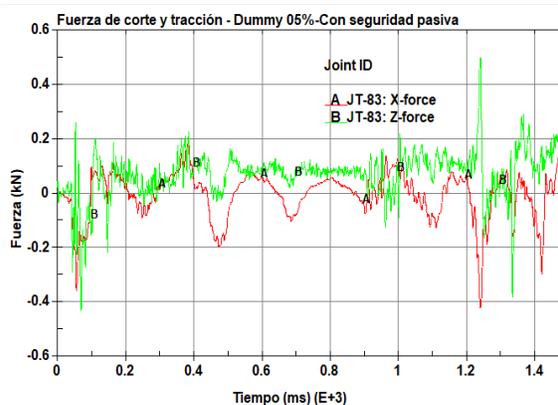
El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de -0.276 kN y 0.748 kN en cada una.

El signo negativo indica efecto de compresión.



El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de 1.63 kN y -2.65 kN en cada una.

El signo negativo indica efecto de compresión.



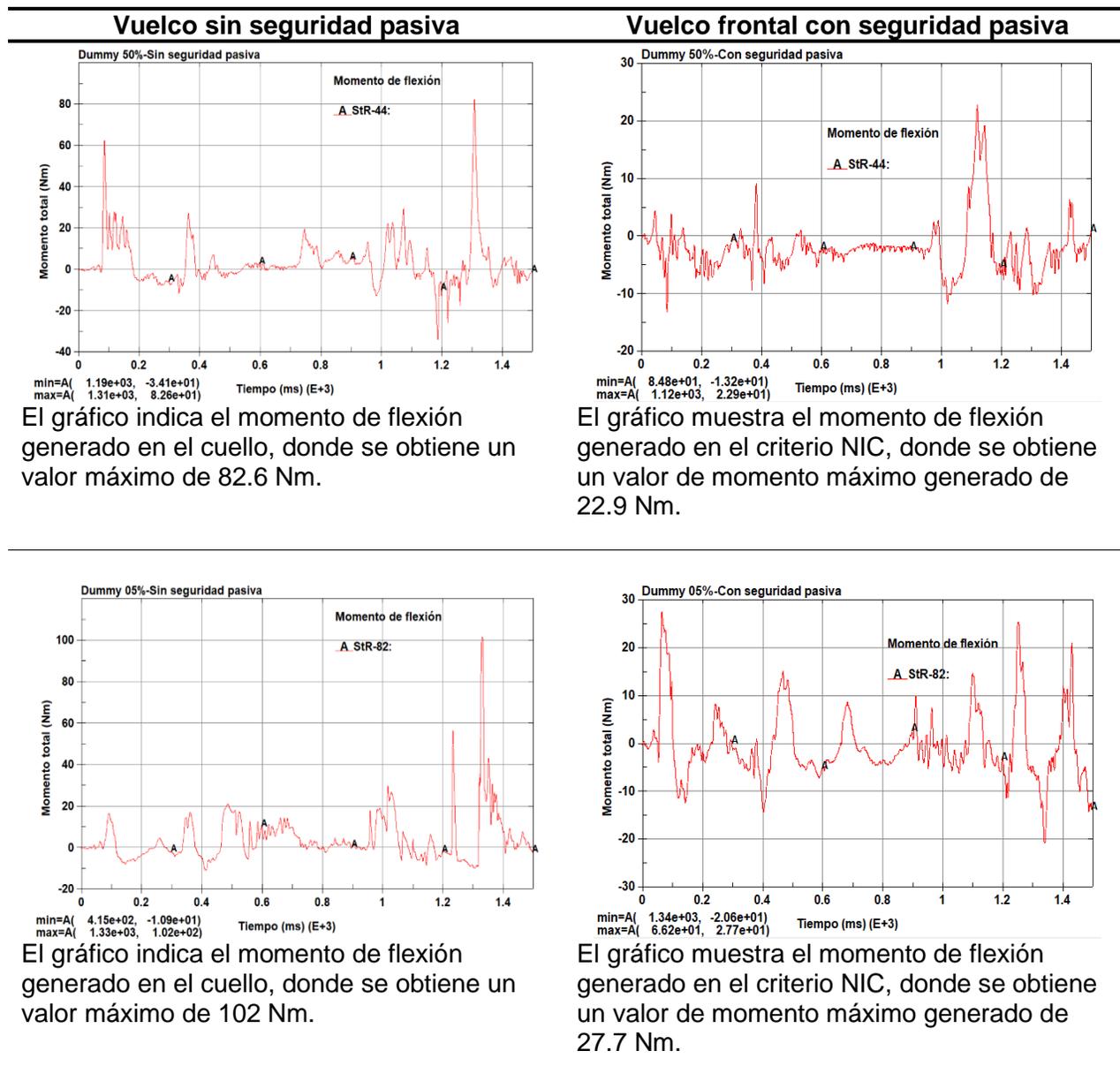
El gráfico indica la fuerza de corte y fuerza de tracción mediante las curvas A y B respectivamente, donde se obtiene valores máximos de -0.429 kN y 0.501 kN en cada una.

El signo negativo indica efecto de compresión.

Momento de Flexión. Este parámetro puede disponer efecto negativo o positivo, dependiendo de la dirección y aplicación de las cargas sobre los puntos extremos del cuello, las gráficas resultantes se muestran en la tabla 59.

Tabla 59

Criterio NIC, momento de flexión-vuelco

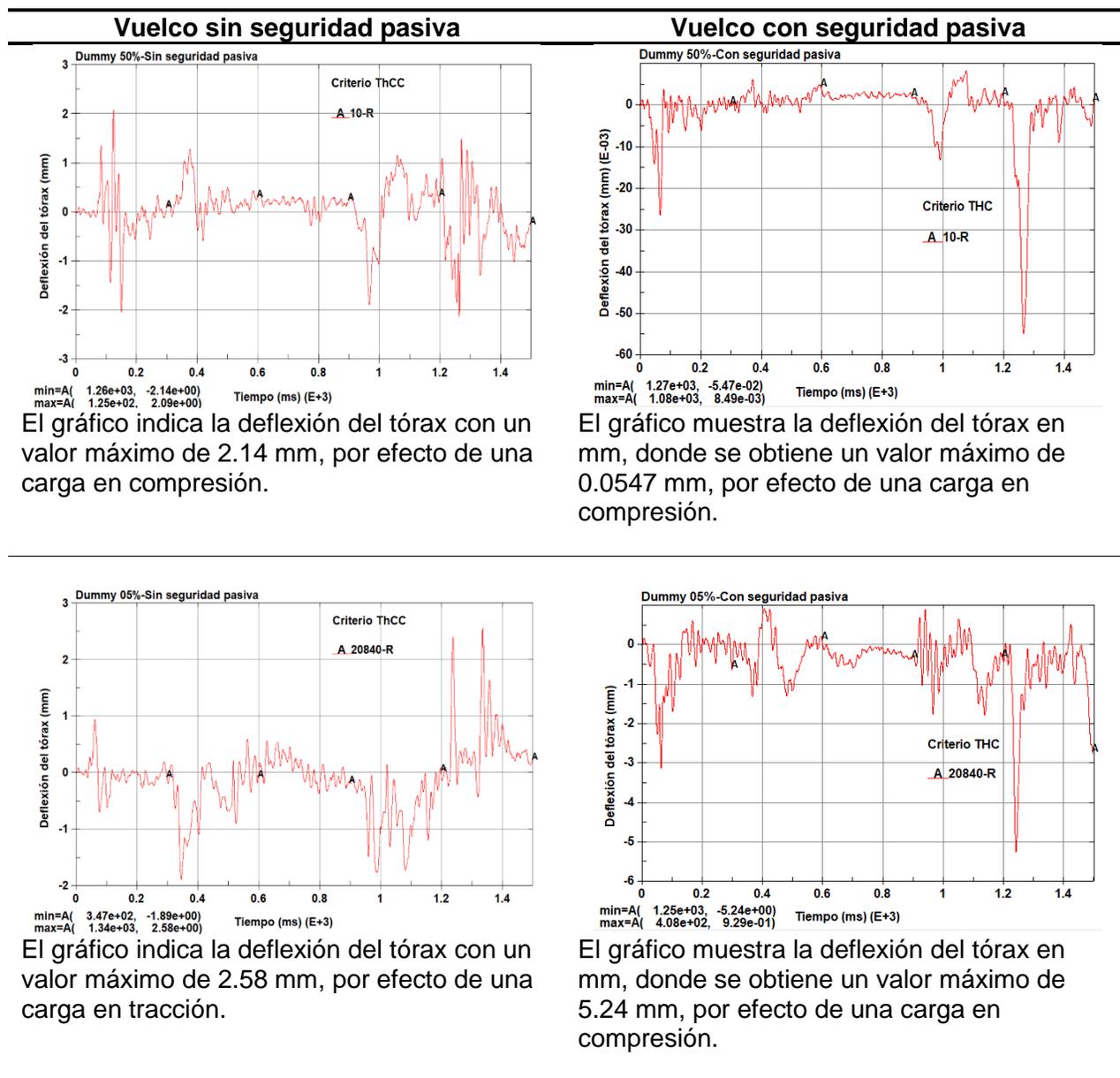


Compresión del Tórax ThCC

La deflexión del tórax producto de la de la compresión causada sobre el mismo, se determina mediante el desplazamiento de acuerdo a las gráficas de la tabla 60 para cada uno de los dummies.

Tabla 60

Criterio ThCC-vuelco

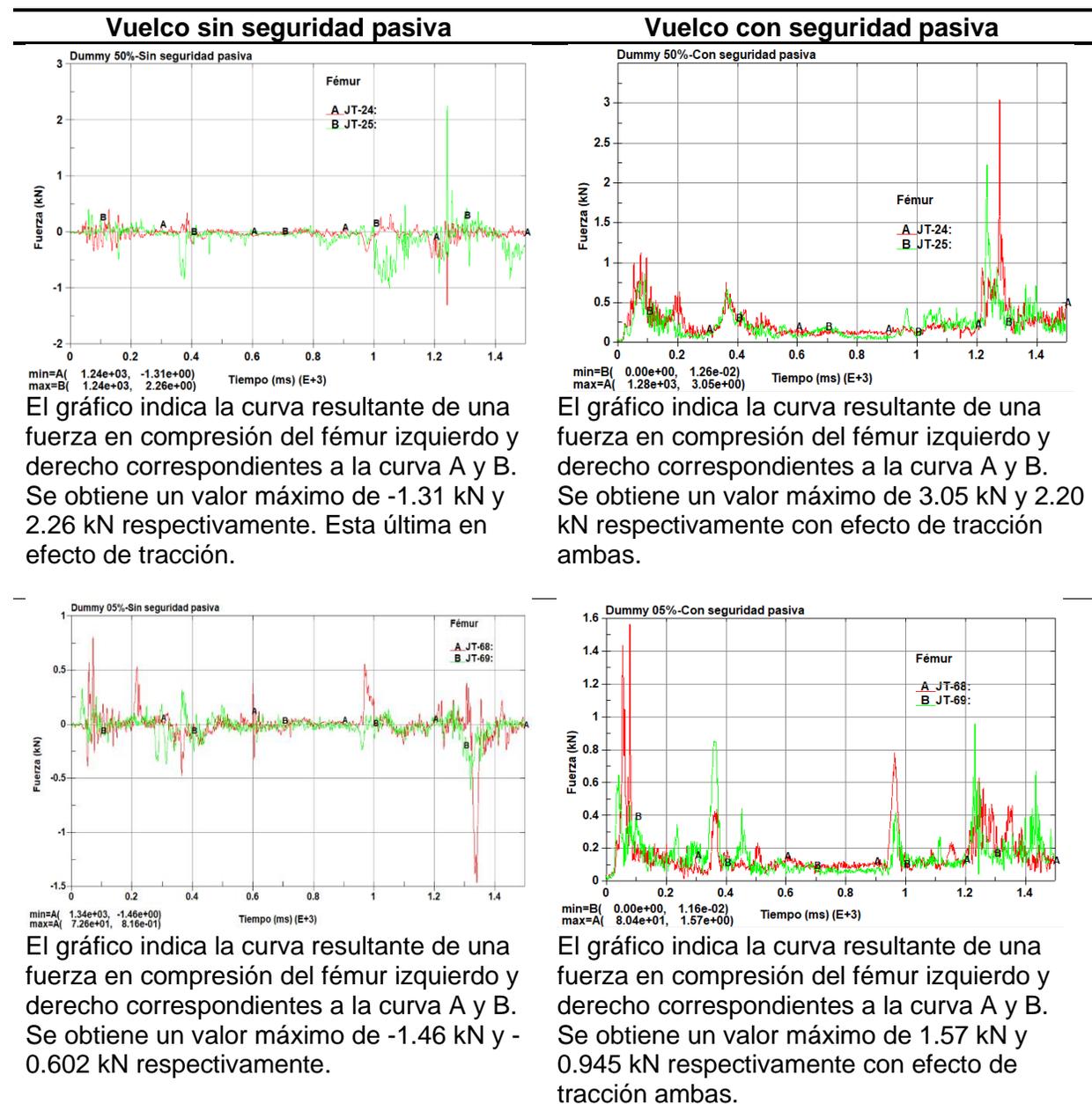


Fuerza del Fémur FFC

El criterio se determina por la carga de compresión ejercida axialmente en cada fémur de los maniqués. En la tabla 61, se muestra las gráficas resultantes para el Dummy *Fast HIII 50* y 05 percentil en el ensayo de vuelco.

Tabla 61

Criterio FFC-vuelco



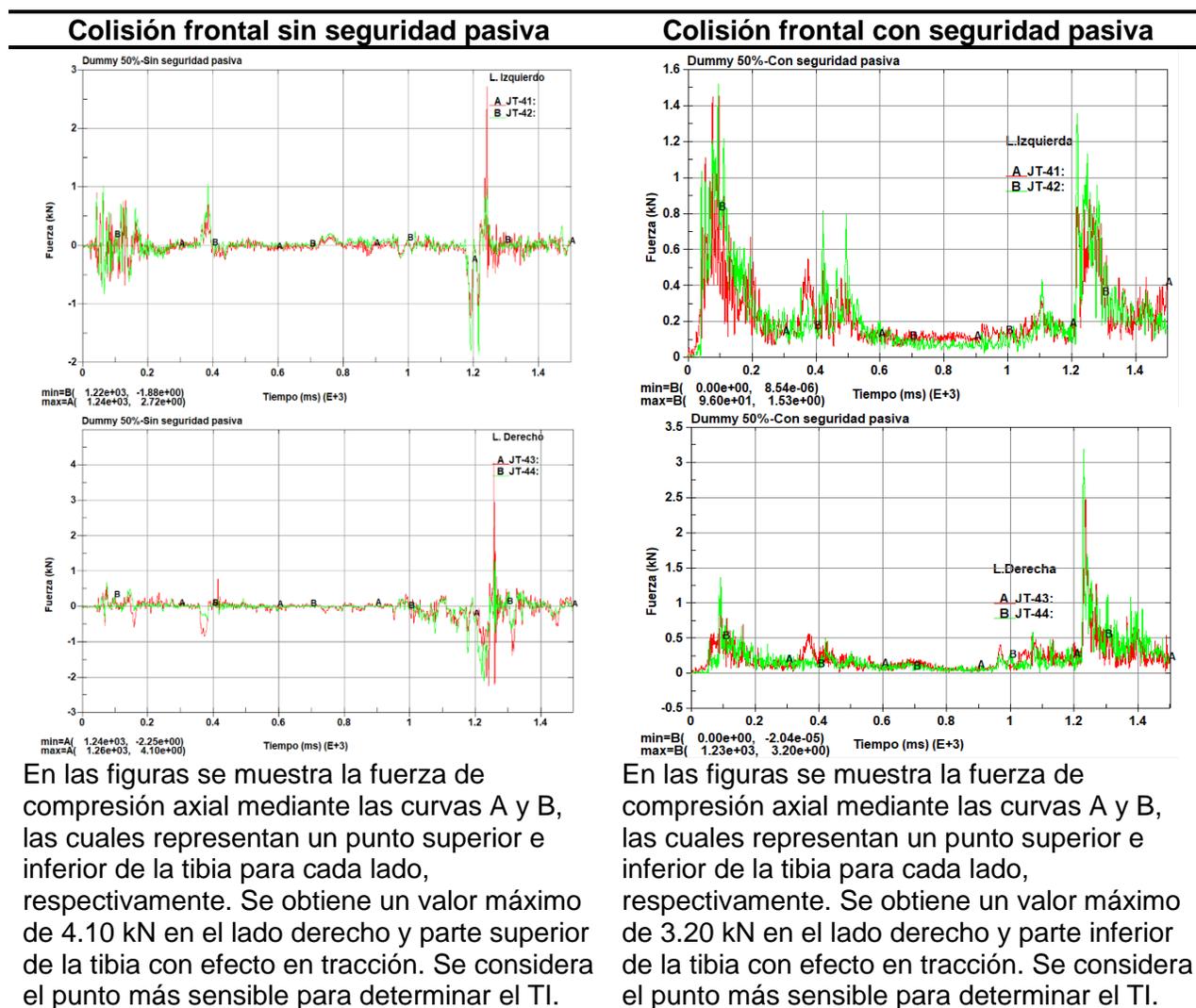
Comportamiento de la Tibia

El criterio de lesión de la tibia se determina mediante la fuerza resultante de compresión y su relación con el momento de flexión.

Fuerza de Compresión. Se determina mediante el análisis de las cargas generadas en los puntos críticos superior e inferior de la tibia, en la tabla 62 se detallan las gráficas resultantes para cada uno de los dummies.

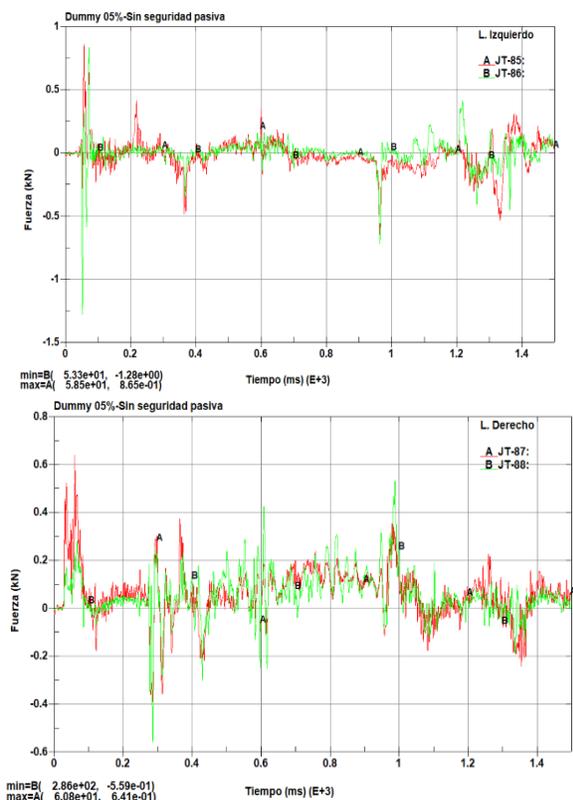
Tabla 62

Criterio TCFC, fuerza de compresión axial-vuelco

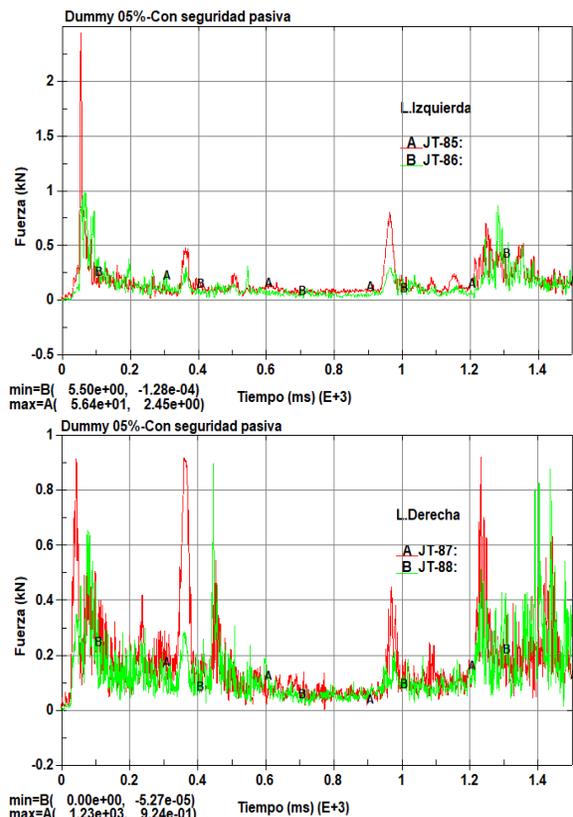


Colisión frontal sin seguridad pasiva

Colisión frontal con seguridad pasiva



En las figuras se muestra la fuerza de compresión axial mediante las curvas A y B, las cuales representan un punto superior e inferior de la tibia para cada lado, respectivamente. Se obtiene un valor máximo de -1.28 kN en el lado izquierdo y parte inferior de la tibia. Se considera el punto más sensible para determinar el TI.



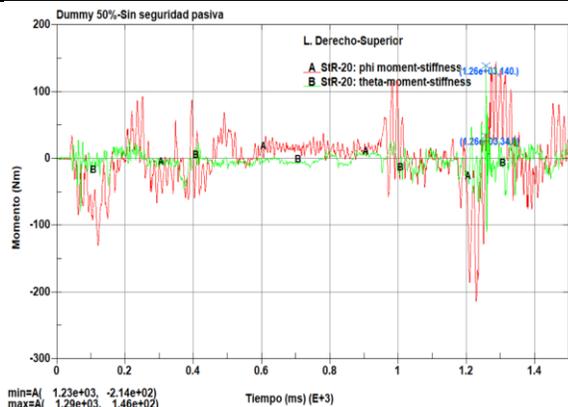
En las figuras se muestra la fuerza de compresión axial mediante las curvas A y B, las cuales representan un punto superior e inferior de la tibia para cada lado, respectivamente. Se obtiene un valor máximo de 2.45 kN en el lado izquierdo y parte superior de la tibia con efecto de tracción. Se considera el punto más sensible para determinar el TI.

Momento de Flexión. Se determina en el tiempo específico donde se obtiene el punto crítico con mayor fuerza en dirección “x” y “y”, en la tabla 63 se detallan las gráficas del momento de flexión resultante.

Tabla 63

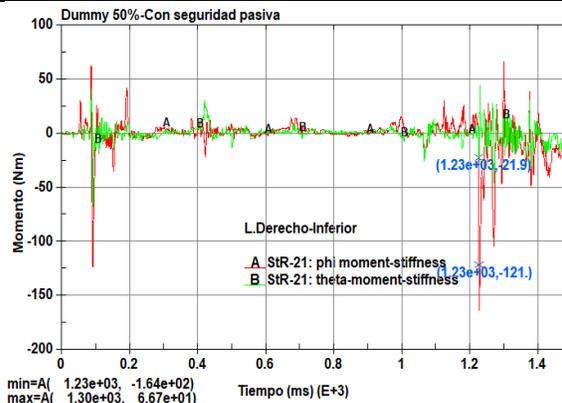
Criterio TCFC, momento de flexión-vuelco

Colisión frontal sin seguridad pasiva

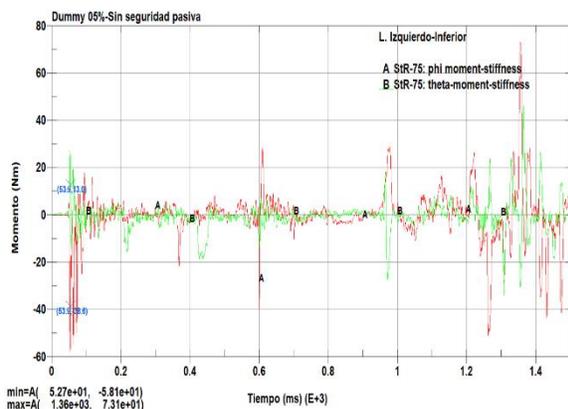


La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia derecha. Para 1260 ms correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de 34.8 Nm y My de 140 Nm.

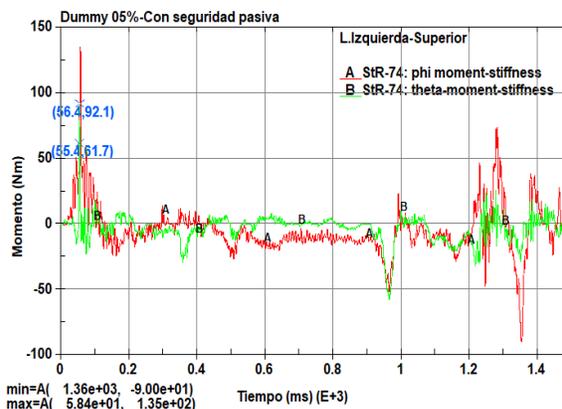
Colisión frontal con seguridad pasiva



La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia derecha. Para 1230 ms, correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de -121 Nm y My de -21.9 Nm.



La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia izquierda. Para 53.3 ms (aprox.), correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de -38.6 Nm y My de 13 Nm.



La gráfica muestra las curvas A y B del momento de flexión “x” e “y” en la parte superior de la tibia izquierda. Para 56.4 ms (aprox.), correspondiente a la fuerza máxima de compresión axial, los momentos resultantes para Mx es de 92.1 Nm y My de 61.7 Nm.

Índice de Lesión TI. Relaciona la fuerza de compresión y el momento de flexión en un punto crítico de la tibia, en la tabla 64 se detalla el índice TI.

Tabla 64

Índice TI para vuelco

Estudio	Fuerza axial [kN]	Mx [Nm]	My [Nm]	M. Resultante [Nm]	TI
Ensayo sin seguridad pasiva					
Dummy 50%	4.1	34.8	140	144.260	0.755
Dummy 05%	1.28	-38.6	13	40.730	0.410
Ensayo con seguridad pasiva					
Dummy 50%	3.2	-121	-21.9	122.996	0.636
Dummy 05%	2.45	92.1	61.7	110.857	1.071

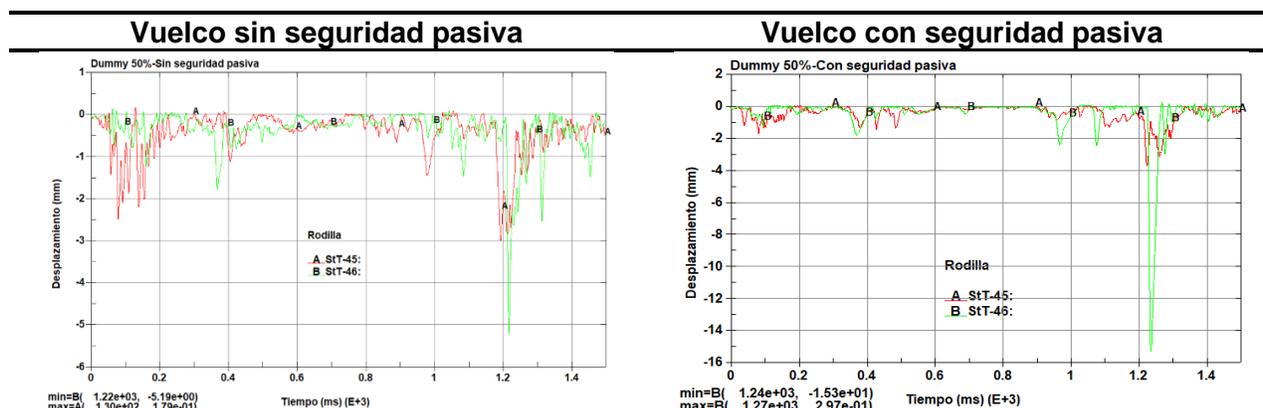
Nota. En la tabla se indica que el índice TI es admisible en los dos dummies, inferior a 1.3.

Movimiento de las Articulaciones en las Rodillas

El movimiento generado en las articulaciones de la rodilla por fuerzas axiales de impacto se muestra en la tabla 65 para cada uno de los dummies.

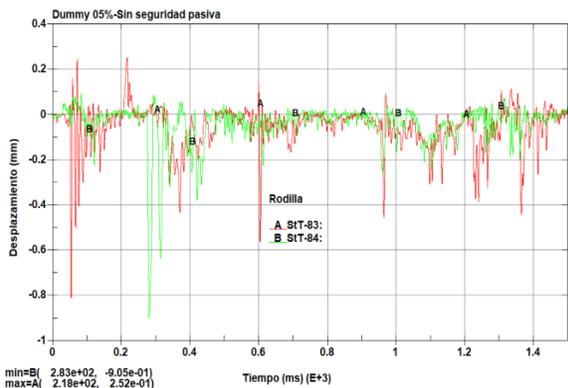
Tabla 65

Criterio del movimiento de las articulaciones en la rodilla

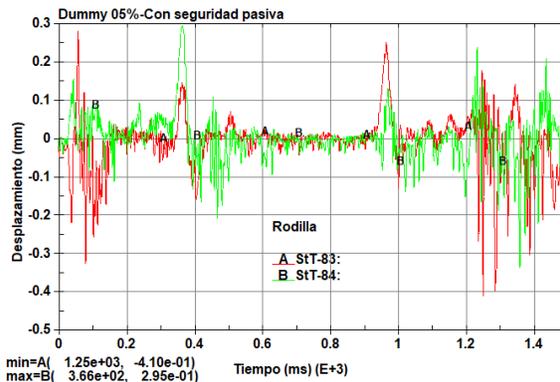


El gráfico muestra el desplazamiento en la rodilla izquierda y derecha representado en las curvas A y B respectivamente, se obtiene un valor máximo de 3 mm y 5.19 mm en cada una, bajo una carga de compresión.

El gráfico muestra el desplazamiento de la rodilla izquierda (StT-45), con un valor máximo de 3.73 mm, mientras que en la rodilla derecha (StT-46) se tiene un desplazamiento máximo de 15.3 mm, ambas sobre una carga de compresión.

Vuelco sin seguridad pasiva


El gráfico muestra el desplazamiento en la rodilla izquierda y derecha representado en las curvas A y B respectivamente, se obtiene un valor máximo de 0.812 mm y 0.9 mm en cada una, bajo una carga de compresión.

Vuelco con seguridad pasiva


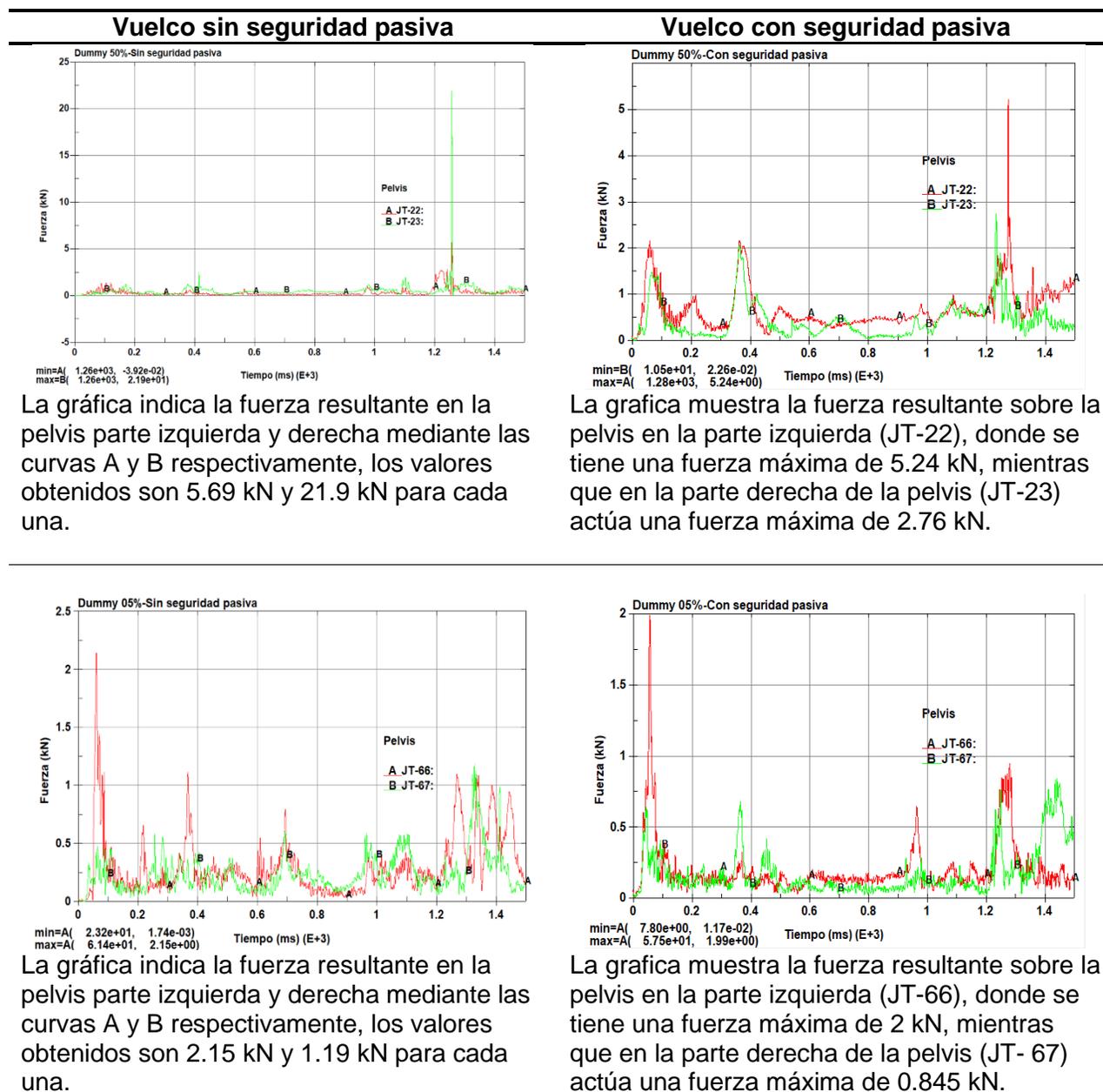
El gráfico muestra el desplazamiento de la rodilla izquierda (StT-83), con un valor máximo de 0.410 mm, mientras que en la rodilla derecha (StT-84) se tiene un desplazamiento máximo de 0.347 mm, ambas sobre una carga de compresión.

Fuerza sobre la Pelvis PSPF

La fuerza resultante se determina en cada lado de la pelvis, en la tabla 66 se muestran las gráficas obtenidas para cada dummies.

Tabla 66

Criterio de la fuerza sobre la pelvis-vuelco

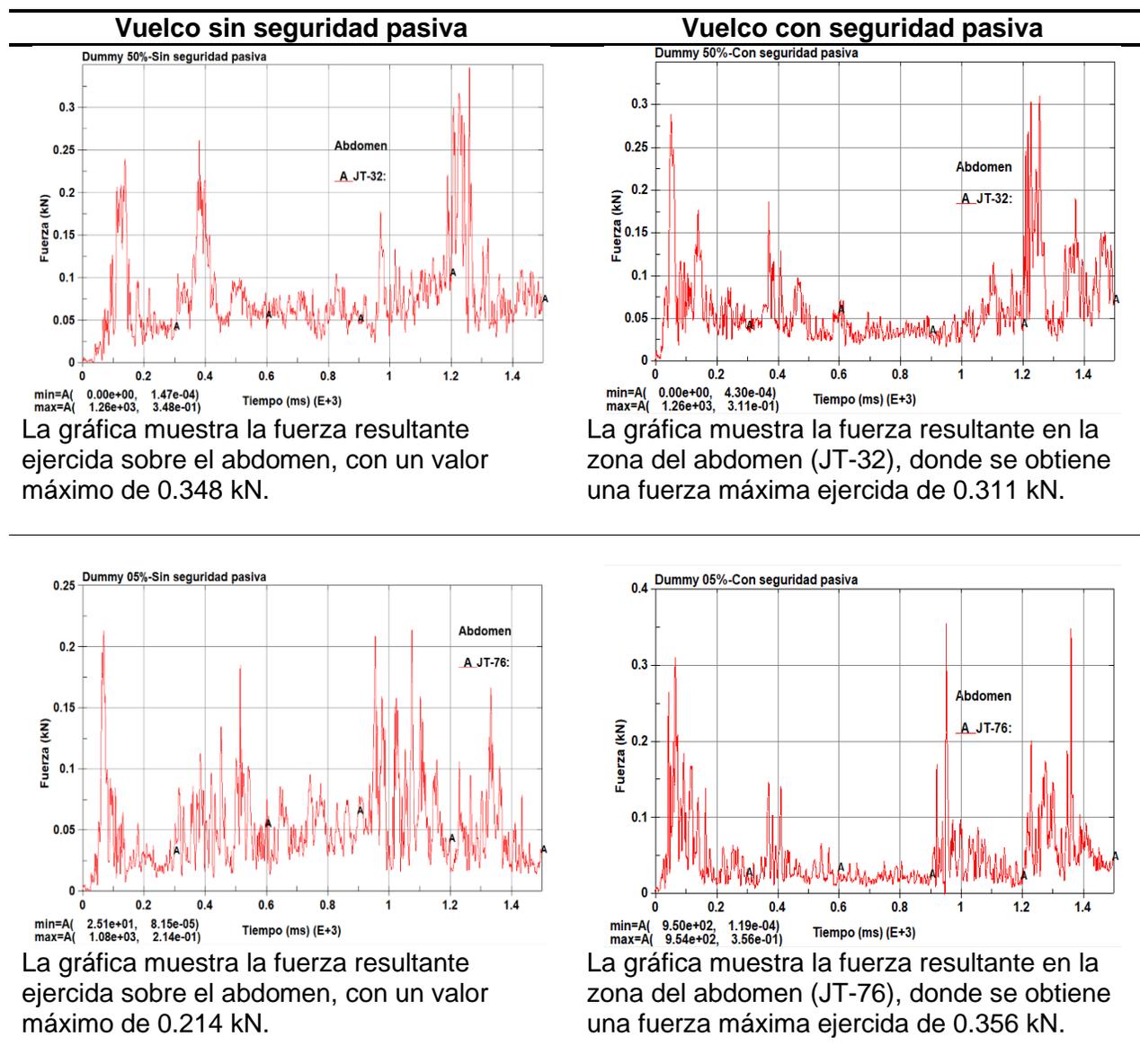


Fuerza sobre el Abdomen APF

En la tabla 67 se muestra las gráficas de la fuerza resultante generada sobre el abdomen para cada uno de los dummies.

Tabla 67

Criterio de la fuerza sobre el abdomen-vuelco



Comparación de los Criterios según la Regulación y Tipo de Colisión.

Los criterios del riesgo de lesión están evaluados bajo las consideraciones del manual técnico de ensayo para cada uno de los dummies en la colisión frontal, lateral y vuelco atendiendo el protocolo de evaluación correspondiente de la CEPE/ONU y Latin NCAP.

Colisión Frontal con 40% de Traslape

En función del reglamento N° 94 de la Comisión Económica para Europa de la Naciones Unidas y Protocolo de Latin NCAP, la evaluación se argumenta en 6 criterios de importancia basados en la anatomía corporal, los valores obtenidos en cada condición se detallan en la tabla 68.

Tabla 68

Valores obtenidos en los criterios de lesión-colisión frontal

Criterio de lesión		U.	Sin seguridad		Con seguridad	
			HIII 50%	HIII 05%	HIII 50%	HIII 05%
HIC	HIC36	-	2442	2535	1262	838
	HIC15	-	2286	1507	792.1	759.4
NIC-Tracción		kN	6.61	3.59	3.20	2.83
NIC-Cizalladura		kN	-1.89	2.89	-0.876	-1.48
NIC-Momento de flexión “y”		Nm	-97.5	-163	33.1	101
ThCC		mm	-136	-29.9	-54.7	-34.8
FFC-Izquierda		kN	79	42.3	3.12	2.78
FFC-Derecha			31.7	54	5.56	2.78
Tibia	Fuerza de compresión	kN	9.08	12.9	6.52	2.67
	Índice TI	-	8.053	3.213	1.847	0.730
Movimiento de las articulaciones en rodillas	Izquierda	mm	-9.14	-5.87	-2.80	-2.50
	Derecha		-29.4	-9.89	-6.40	-1.20

Nota. La tabla contiene los valores resultantes de los criterios, los signos negativos indican efecto contrario a la carga de aplicación sea compresión, tracción, corte, momento de flexión o desplazamiento.

Colisión Lateral con Barrera Deformable Móvil

En relación al reglamento N° 95 de la Comisión Económica para Europa de la Naciones Unidas y Protocolo de Latin NCAP, la evaluación se argumenta en 4 criterios de importancia basados en la anatomía corporal, los valores obtenidos en cada condición se detallan en la tabla 69.

Tabla 69

Valores obtenidos en los criterios de lesión-colisión lateral

Criterio de evaluación	U.	Sin seguridad		Con seguridad		
		HIII 50%	HIII 05%	HIII 50%	HIII 05%	
HIC	HIC36	-	63.51	12.22	10.29	4.34
	HIC15	-	63.51	8.108	6.10	2.32
ThCC	mm		0.751	-0.746	-2.46	-6.47
PSPF	Izquierda	kN	1.22	1.02	0.610	1.43
	Derecha		1.02	1.09	0.714	0.393
APF	kN		0.283	0.169	0.161	0.2

Nota. En la tabla el signo negativo en el ThCC indica desplazamiento del tórax en compresión.

Vuelco

En función del reglamento de ensayo FMVSS 208 SAEJ2114 y los criterios de lesión adoptado del Protocolo Latin NCAP, la evaluación se argumenta en 8 criterios de importancia basados en la anatomía corporal, los valores obtenidos se detallan en la tabla 70.

Tabla 70

Valores obtenidos en los criterios de lesión-vuelco

Criterio de evaluación	U.	Sin seguridad		Con seguridad		
		HIII 50%	HIII 05%	HIII 50%	HIII 05%	
HIC	HIC36	-	148.8	691.8	32.28	26.35
	HIC15	-	148.8	691.8	27.85	24.9
NIC-Tracción	kN		-4.02	-2.65	0.748	0.501
NIC-Cizalladura	kN		0.657	1.63	-0.276	-0.429
NIC-Momento de flexión "y"	Nm		82.6	102	22.9	27.7
ThCC	mm		-2.14	2.58	-0.0547	-5.24
FFC-Izquierda	kN		-1.31	-1.46	3.05	1.57
FFC-Derecha			2.26	-0.602	2.20	0.945
Tibia	Fuerza de compresión	kN	4.10	-1.28	3.20	2.45
	Índice TI	-	0.755	0.217	0.636	0.561
Movimiento de las articulaciones en rodillas	Izquierda	mm	-3	-0.812	-3.73	-0.410
	Derecha		-5.19	-0.9	-15.3	-0.347
PSPF	Izquierda	kN	5.69	2.15	5.24	2
	Derecha		21.9	1.19	2.76	0.845
APF	kN		0.348	0.214	0.311	0.356

Nota. La tabla contiene los valores resultantes de cada uno de los criterios, los signos negativos indican efecto contrario a la carga de aplicación sea compresión, tracción, corte, momento de flexión, y desplazamiento.

Gravedad de lesión

La probabilidad y la gravedad de lesión se determinan en base al AIS (*The Abbreviated Injury Scale*) de la Asociación para el Avance de la Medicina de Tráfico (AAAM), para lo cual se considera lesiones comunes de origen anatómico y gráficas de la probabilidad AIS para determinados criterios como se muestra en la tabla 71. Para algunas partes corporales se relaciona con el valor máximo admisible como una fractura.

Tabla 71

Lesiones comunes de la anatomía corporal

Criterio de evaluación	Descripción de lesión	AIS	Referencia
HIC36	Nivel de conmoción cerebral y daño en el cráneo.		Anexo 11.
HIC15	Daño cerebral.	AIS≥4.	Anexo 12 (Nahum & Melvin, 2002, p. 90).
	Riesgo de fractura del cráneo.	AIS≥4.	Anexo 13 (Nahum & Melvin, 2002, p. 91).
NIC-Tracción	Riesgo de traumas en el cuello.	AIS ≥3.	Anexo 14 (Nahum & Melvin, 2002, p. 94).
NIC-Cizalladura	Fracturas de lesiones y ligamentos.	AIS≥2.	Referencia Valores máximos.
NIC-Momento de flexión	Riesgo de estrés en el ligamento cabeza-cuello.	AIS≥3.	Anexo 15 (Nahum & Melvin, 2002, p. 95).
ThCC	Fractura de costillas y esternón.	AIS≥3.	Anexo 16 (Nahum & Melvin, 2002, p. 98).
	Lesión del tórax móvil.	AIS≥4.	
FFC	Fractura del fémur.	AIS≥2. AIS≥3.	Anexo 17 (Shashi Kuppa & Mark Haffner, 1999, p. 5).
Tibia	Fractura de la tibia.	AIS≥2.	Anexo 18 (Shashi Kuppa & Mark Haffner, 1999, p. 6-7).
Índice TI	Mayor a 1.3	AIS≥2.	Referencia valor máximo.
Movimiento de la articulación en la rodilla	Fracturas de lesiones y ligamentos. Límite de falla del ligamento cruzado.	AIS≥2.	Referencia del Fémur.

Criterio de evaluación	Descripción de lesión	AIS	Referencia
PSPF	Fractura cerrada de pelvis	AIS \geq 2.	Anexo 19 (Lubbe et al., 2011, p. 9).
APF	Contusión o abrasión abdominal	AIS \geq 2.	Referencia valor máximo.

Nota. La tabla indica estudios referenciales de la gravedad de lesiones de acuerdo a los criterios de evaluación. Para partes anatómicas del cuerpo como fémur, rodilla y tibia se considera factores de escala basados en curvas para dummies de la familia HIII 50 y 05 percentil como se indica en el anexo 20.

Colisión Frontal con 40% de Traslape

En la tabla 72 se indica los valores de los criterios de lesión y el cumplimiento con los valores máximos establecidos en el reglamento N°94 de la CEPE y protocolo de Latin NCAP para el ensayo sin seguridad pasiva, así mismo se detalla el porcentaje de lesión producido en los diferentes criterios en base a un AIS específico, el mismo que permite clasificar las lesiones por gravedad.

Tabla 72

Gravedad de lesión en colisión frontal sin seguridad

Criterio de evaluación	Valor máximo				U.	Gravedad de lesión
	HIII-50%		HIII-05%			
HIC36	2442	NC	2535	NC	-	HIII-50 percentil, vida amenazada por fractura, coma cerebral (AIS6). HIII-05 percentil, vida amenazada por fractura, coma cerebral (AIS6).
HIC15	2286	NC	1507	NC	-	Riesgo de daño cerebral. Riesgo de fractura del cráneo. HIII-50 percentil, 96% y 95%. HIII-05 percentil, 45%, 38%.
NIC-Tracción	6.61	NC	3.59	NC	kN	HIII-50 percentil, 100%. HIII-05 percentil, 100%.
NIC-Cizalladura	-1.89	C	2.89	NC	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, fractura.
NIC-Momento de flexión	-97.5	NC	-163	NC	Nm	HIII-50 percentil, 18%. HIII-05 percentil, 100%.

Criterio de evaluación	Valor máximo				U.	Gravedad de lesión
	HIII-50%		HIII-05%			
ThCC	-136	NC	-29.9	C	mm	AIS \geq 3 y AIS \geq 4. HIII-50 percentil, 100%. HIII-05 percentil, sin fractura.
FFC-Izquierda	79	NC	42.3	NC	kN	AIS \geq 2 y AIS \geq 3. HIII-50 percentil, 100%. HIII-05 percentil, 100%.
FFC-Derecha	31.7	NC	54	NC	kN	AIS \geq 2 y AIS \geq 3. HIII-50 percentil, 99.5% y 99.52%. HIII-05 percentil, 100%.
Tibia	9.08	NC	12.9	NC	kN	HIII-50 percentil, 81.70% HIII-05 percentil, 100%.
Índice TI	8.053	NC	6.146	NC	-	Mayor a 1.3
Movimiento de la articulación en la rodilla izquierda	-9.14	C	-5.87	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
Movimiento de la articulación en la rodilla derecha	-29.4	NC	-9.89	C	mm	HIII-50 percentil, fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

Nota. En la tabla la abreviatura corresponde NC (No cumple) y C (Cumple) de acuerdo a los valores de bajo rendimiento en seguridad. El índice TI se obtiene mediante la relación de fuerzas de compresión axial y momento de flexión, por lo que, el valor ideal está restringido al cumplimiento del valor máximo de la fuerza de compresión axial.

La simulación de impacto frontal del vehículo tipo SUV sin la implementación de los elementos de seguridad pasiva, presenta resultados altos en los criterios de lesión, a comparación de los valores admisibles.

- El criterio de lesión de la cabeza HIC para 36 ms y 15 ms, sobrepasan el límite mínimo especificado de seguridad, los cuales constituyen amenaza directa a la vida con gravedad AIS \geq 4 (grave con riesgo vital), con máximo el 90% de supervivencia. En condiciones críticas puede alcanzar la muerte con un AIS6.
- El criterio de lesión del cuello ante la fuerza de tracción y momento de flexión con AIS \geq 3 conllevan a tener la probabilidad de traumas en el cuello y riesgo de estrés en el

ligamento cabeza-cuello en un 100% de forma moderada con totalidad de supervivencia para cada uno de los dummies.

- La deflexión del tórax ocasiona daños anatómicos directos al Dummy HIII 50 percentil con AIS \geq 3 y AIS \geq 4 con máximo el 90% de probabilidad en fractura simples y complejas del área del tórax y esternón, por lo que el grado de lesión puede ser mayor como una fractura traqueal, contusión pulmonar, lesión medular completa, entre otros.
- El Fémur está evaluado en un AIS \geq 2 y AIS \geq 3 desde una fractura simple hasta una amputación de la extremidad debido a la fuerza axial generada, por lo cual, para cada Dummy el riesgo está alrededor del 100% con alta probabilidad de supervivencia.
- La fuerza de compresión axial sobre la tibia sobrepasa el valor máximo en cada Dummy, por lo cual, evaluado a un AIS \geq 2, la fractura de la misma está propensa a efectuarse con 81.70% y 100% de riesgo en el Dummy HIII 50 y 05 percentil.
- La gravedad de lesión relacionada al desplazamiento de la articulación de la rodilla izquierda se encuentra entre el máximo y mínimo rendimiento de seguridad, sin generar ninguna fractura, mientras que del lado derecho solo se ve afectada la rodilla del Dummy HIII 50 percentil con fractura o límite de falla de ligamento cruzado sin causar riesgo de muerte, con 100% de la probabilidad de supervivencia.

En la tabla 73 se indica los valores de los criterios de lesión y el cumplimiento con los valores máximos establecidos en el reglamento N°94 de la CEPE y protocolo de Latin NCAP para el ensayo con seguridad pasiva, así mismo se detalla el porcentaje de lesión producido en los diferentes criterios en base a un AIS específico.

Tabla 73

Gravedad de lesión en colisión frontal con seguridad

Criterio de evaluación	Valor máximo		U.	Grado de lesión		
	HIII-50%	HIII-05%				
HIC36	1262	NC	838	C	-	HIII-50 percentil, inconsciente de 1 a 6 horas, con presencia de fractura en el cráneo. HIII-05 percentil, inconsciente por menos de 1 hora, fractura lineal.
HIC15	792.1	NC	759.4	C	-	Riesgo de daño cerebral. Riesgo de fractura del cráneo. HIII-50 percentil, 7% para cada una. HIII-05 percentil, 4% para cada una.
NIC-Tracción	3.20	C	2.83	NC	kN	HIII-50 percentil, 1%. HIII-05 percentil, 80%.
NIC-Cizalladura	-0.876	C	-1.48	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
NIC-Momento de flexión	33.1	C	101	NC	Nm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, 100%.
ThCC	-54.7	NC	-34.8	C	mm	AIS \geq 3 y AIS \geq 4. HIII-50 percentil, 20% y 0.5%. HIII-05 percentil, sin fractura.
FFC-Izquierda	3.12	C	2.78	C	kN	AIS \geq 2 y AIS \geq 3. HIII-50 percentil, 1.5% y 1.86%. HIII-05 percentil, 2.21% y 2.36%.
FFC-Derecha	5.56	C	2.78	C	kN	AIS \geq 2 y AIS \geq 3. HIII-50 percentil, 5.18% y 4.04%. HIII-05 percentil, 2.21% y 2.36%.
Tibia	6.52	C	2.67	C	kN	HIII-50 percentil, 46%. HIII-05 percentil, 5.17%.
Índice TI	1.847	NC	1.398	NC	-	Mayor a 1.3.
Movimiento de la articulación en la rodilla izquierda	-2.80	C	-2.50	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
Movimiento de la articulación en la rodilla derecha	-6.40	C	-1.20	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

Nota. En la tabla la abreviatura corresponde NC (No cumple) y C (Cumple) de acuerdo a los valores mínimos o de bajo rendimiento en seguridad. El índice TI se obtiene mediante la relación de fuerzas de compresión axial y momento de flexión, por lo que, el valor ideal está restringido al cumplimiento del valor máximo de la fuerza de compresión axial.

La simulación de impacto frontal del vehículo tipo SUV con la implementación de los elementos de seguridad pasiva permite determinar de manera anatómica la gravedad de lesiones y por ende el cumplimiento de las condiciones de seguridad hacia los ocupantes. El análisis de los resultados se detalla:

- El HIC36 presenta lesiones graves con riesgo vital con la presencia de inconsciencia y fractura craneal, mientras que el HIC15 se basa en una gravedad con bajo riesgo de daño cerebral y fractura del cráneo con 7% en el Dummy HIII 50 percentil y 4% en el Dummy HIII 05 percentil, ambos con supervivencia máxima del 90%.
- En el criterio de lesión del cuello, la fuerza de tracción afecta directamente al Dummy HIII 05 percentil con 80% de riesgo en una escala AIS \geq 3, de la misma manera el momento de flexión con riesgo del 100% en la misma escala, sin afectar la supervivencia del Dummy. Por otra parte, el Dummy HIII 50 percentil no presenta riesgos de lesión en al área del cuello-cabeza.
- La deflexión del tórax en el Dummy HIII 50 percentil tiene riesgo de 20% y 0.5% en una escala de gravedad AIS \geq 3 y AIS \geq 4, por lo que la fractura en las costillas y el esternón puede ser leve sin pérdida de la vida humana con 90% de probabilidad de supervivencia.
- Los criterios de lesión del fémur tanto izquierda como derecha cumplen con un rendimiento medio en seguridad donde el riesgo máximo es del 5% aproximado en cada Dummy. La supervivencia no es afectada en ningún caso.
- La fuerza axial sobre la tibia la posiciona en un rendimiento medio de seguridad, con máximo el 46% y 5.17% de riesgo para un AIS \geq 3, correspondiente al Dummy HIII 50 y 05 percentil.
- El movimiento de la articulación de la rodilla cumple con el máximo rendimiento de seguridad a un AIS \geq 2 y 100% de supervivencia.

Colisión Lateral con Barrera Deformable Móvil

En la tabla 74 se indica los valores de los criterios de lesión y el cumplimiento con los valores máximos establecidos en el reglamento N°95 de la CEPE y protocolo de Latin NCAP para el ensayo sin seguridad pasiva, así mismo se detalla el porcentaje de lesión producido en los diferentes criterios en base a un AIS específico.

Tabla 74

Gravedad de lesión en colisión lateral sin seguridad

Criterio de evaluación	Valor máximo				U.	Grado de lesión
	HIII-50%		HIII-05%			
HIC36	63.51	C	12.22	C	-	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
HIC15	63.51	C	8.108	C	-	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
ThCC	0.751	C	-0.746	C	mm	AIS≥3 y AIS≥4. HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
PSPF-Izquierda	1.22	C	1.02	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
PSPF-Derecha	1.02	C	1.09	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
APF	0.283	C	0.169	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

Nota. La tabla indica el valor máximo de cada criterio de lesión obtenido mediante la simulación biomecánica. La abreviatura corresponde C (Cumple).

La simulación de impacto lateral del vehículo tipo SUV sin la implementación de los elementos de seguridad pasiva, presenta resultados del estudio biomecánico en 4 criterios de evaluación:

- Los criterios de lesión de la cabeza HIC36 y HIC15, deflexión del tórax ThCC, fuerza resultante en la pelvis PSPF y abdomen APF presentan valores bajos, constituyendo así el máximo rendimiento en seguridad pasiva para el Dummy HIII 50 y 05 percentil. El

éxito de los resultados en el ensayo sin seguridad pasiva se debe a las características y condiciones de la aplicación del impacto lateral.

En la tabla 75 se indica los valores de los criterios de lesión y el cumplimiento con los valores máximos establecidos en el reglamento N°95 de la CEPE y protocolo de Latin NCAP para el ensayo con seguridad pasiva, así mismo se detalla el porcentaje de lesión producido en los diferentes criterios en base a un AIS específico.

Tabla 75

Gravedad de lesión en colisión lateral con seguridad

Criterio de evaluación	Valor máximo		U.	Grado de lesión		
	HIII-50%	HIII-05%				
HIC36	10.29	C	4.34	C	-	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
HIC15	6.10	C	2.32	C	-	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
ThCC	-2.46	C	-6.47	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
PSPF-Izquierda	0.610	C	1.43	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
PSPF-Derecha	0.714	C	0.393	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
APF	0.161	C	0.2	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

Nota. La tabla indica el valor máximo de cada criterio de lesión obtenido mediante la simulación biomecánica. La abreviatura corresponde C (Cumple).

La simulación de impacto lateral del vehículo tipo SUV con implementación de seguridad pasiva, cinturón de seguridad de tres puntos, airbag frontal y lateral para el maniquí HIII 50 percentil, mientras que para el maniquí HIII 05 percentil se considera la implementación de cinturón de seguridad de tres puntos y airbag frontal, presenta los resultados del estudio biomecánico en cuatro criterios:

- Los criterios de lesión de la cabeza HIC36 y HIC15, deflexión del tórax ThCC, fuerza resultante en la pelvis PSPF y abdomen APF presentan valores mucho más bajos comparados con los resultados de la colisión lateral sin la implementación de los componentes de seguridad pasiva mencionados al máximo rendimiento de confort, considerando que en el criterio de la deflexión del tórax ThCC los valores llegan a aumentar levemente debido a la fuerza ejercida por el cinturón de seguridad, al igual que en la pelvis derecha e izquierda.

Vuelco

En la tabla 76 se indica los criterios de lesión y el cumplimiento con los valores máximos adoptados del protocolo de Latin NCAP para el ensayo sin seguridad pasiva, así mismo se detalla el porcentaje de lesión producido en los diferentes criterios en base a un AIS específico.

Tabla 76

Gravedad de lesión en vuelco sin seguridad

Criterio de evaluación	Valor máximo				U.	Grado de lesión
	HIII-50%		HIII-05%			
HIC36	148.8	C	691.8	C	-	HIII-50 percentil, dolor de la cabeza o mareo, sin fractura. HIII-05 percentil, inconsciente menos de 1 hora, fractura lineal.
HIC15	148.8	C	691.8	C	-	Riesgo de daño cerebral. Riesgo de fractura del cráneo. HIII-50 percentil, sin riesgo y 0.2%. HIII-05 percentil, 8% en cada una.
NIC-Tracción	-4.02	NC	-2.65	NC	kN	HIII-50 percentil, 45%. HIII-05 percentil, 60%
NIC-Cizalladura	0.657	C	1.63	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
NIC-Momento de flexión	82.6	NC	102	NC	Nm	HIII-50 percentil, 9%. HIII-05 percentil, 100%.
ThCC	-2.14	C	2.58	C	mm	AIS \geq 3 y AIS \geq 4. HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
FFC-Izquierda	-1.31	C	-1.46	C	kN	AIS \geq 2 y AIS \geq 3. HIII-50 percentil, 0.59% y 1.04%. HIII-05 percentil, 0.87% y 1.31%.
FFC-Derecha	2.26	C	-0.602	C	kN	AIS \geq 2 y AIS \geq 3. HIII-50 percentil, 0.975% y 1.41%. HIII-05 percentil, 0.468% y 0.89%.
Tibia	4.10	C	-1.28	C	kN	HIII-50 percentil, 7.39%. HIII-05 percentil, 3.29%.
Índice TI	0.755	C	0.410	C	-	Sin fractura.
Movimiento de la articulación en la rodilla izquierda	-3	C	-0.812	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
Movimiento de la articulación en la rodilla derecha	-5.19	C	-0.9	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
PSPF-Izquierda	5.69	C	2.15	C	kN	HIII-50 percentil, 5%. HIII-05 percentil, 2%.
PSPF-Derecha	21.9	NC	1.19	C	kN	HIII-50 percentil, 100%. HIII-05 percentil, 1%.
APF	0.348	C	0.214	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

La simulación de vuelco del vehículo tipo SUV sin la implementación de los elementos de seguridad pasiva, presenta resultados del estudio biomecánico en 8 criterios de evaluación:

- Los criterios de lesión de la cabeza HIC36 y HIC15, se encuentran dentro del rendimiento máximo de seguridad, evaluado a la gravedad $AIS \geq 4$, que tan solo afecta un 8 % la probabilidad de que el Dummy HIII 05 percentil contraiga riesgo de daño cerebral y fractura en el cráneo con inconsciencia de menos de 1 hora, por lo demás, se no se considera ninguna lesión.
- La lesión del cuello NIC debido a la fuerza de tracción aplicada presenta un posible riesgo de traumas en el cuello a una gravedad $AIS \geq 3$ con 45% y 60% de riesgo en el Dummy HIII 50 y 05 percentil respectivamente sin pérdida vital con el 100% de supervivencia. Finalmente, el momento de flexión es superior al mínimo rendimiento, el mismo que puede generar riesgo de estrés en el ligamento cabeza-cuello a un $AIS \geq 3$ con 9% y 100% en cada Dummy.
- La deflexión del tórax ThCC, fuerza del fémur FFC, comportamiento de la tibia, movimiento de la articulación de las rodillas, pelvis izquierda y abdomen APF presentan valores correspondientes al máximo rendimiento en seguridad para ambos dummies de estudio.
- La fuerza resultante en la pelvis PSPF derecha del maniquí HIII 50 percentil presenta un valor superior a los 6 kN establecido por el protocolo Latin NCAP por lo que se puede considerar la existencia de una fractura cerrada $AIS \geq 2$. En cuanto al Dummy HIII 05 percentil presenta valores que le posicionan dentro del máximo rendimiento. La variación de valores entre derecha e izquierda corresponde a la dinámica del impacto.
- En si las evaluaciones constituyen un alto nivel de seguridad, el éxito de los resultados en el ensayo sin seguridad pasiva se debe a las características y condiciones de la

aplicación del vuelco, así como barreras de protección contra impacto ubicadas en el vehículo.

En la tabla 77 se indica los criterios de lesión y el cumplimiento con los valores requeridos para el ensayo con seguridad pasiva, así mismo se detalla el porcentaje de lesión producido en los diferentes criterios en base a un AIS específico.

Tabla 77

Gravedad de lesión en vuelco con seguridad

Criterio de evaluación	Valor máximo				U.	Grado de lesión
	HIII-50%		HIII-05%			
HIC36	32.8	C	26.35	C	-	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
HIC15	27.85	C	24.9	C	-	Riesgo de daño cerebral. Riesgo de fractura del cráneo. HIII-50 percentil, sin riesgo. HIII-05 percentil, sin riesgo.
NIC-Tracción	0.748	C	0.501	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
NIC-Cizalladura	-0.276	C	-0.429	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
NIC-Momento de flexión	22.9	C	27.7	C	Nm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, 1%.
ThCC	-0.0547	C	-5.24	C	mm	AIS≥3 y AIS≥4. HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
FFC-Izquierda	3.05	C	1.57	C	kN	AIS≥2 y AIS≥3. HIII-50 percentil, 1.46% y 1.82%. HIII-05 percentil, 0.94% y 1.38%.
FFC-Derecha	2.20	C	0.945	C	kN	AIS≥2 y AIS≥3. HIII-50 percentil, 0.94% y 1.38%. HIII-05 percentil, 0.59% y 1%.
Tibia	3.20	C	2.45	C	kN	HIII-50 percentil, 8.10%. HIII-05 percentil, 4%.
Índice TI	0.636	C	1.071	C	-	Sin fractura.
Movimiento de la articulación en la rodilla izquierda	-3.73	C	-0.410	C	mm	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.
Movimiento de la articulación en la rodilla derecha	-15.3	NC	-0.347	C	mm	HIII-50 percentil, fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

Criterio de evaluación	Valor máximo				U.	Grado de lesión
	HIII-50%		HIII-05%			
PSPF-Izquierda	5.24	C	2	C	kN	HIII-50 percentil, 5%. HIII-05 percentil, 2%.
PSPF-Derecha	2.76	C	0.845	C	kN	HIII-50 percentil, 3%. HIII-05 percentil, sin fractura.
APF	0.311	C	0.356	C	kN	HIII-50 percentil, sin fractura. HIII-05 percentil, sin fractura.

La simulación de vuelco del vehículo tipo SUV con la implementación de los elementos de seguridad pasiva, presenta resultados del estudio biomecánico en 8 criterios de evaluación:

- Los criterios de lesión de la cabeza HIC36 y HIC15, lesión del cuello NIC, deflexión del tórax ThCC, fuerza del fémur FFC, comportamiento de la tibia, movimiento de las rodillas, fuerza resultante en la pelvis PSPF y abdomen APF presentan valores aún más bajos comparados con los de la simulación de vuelco sin seguridad, tan solo el movimiento de la rodilla derecha del maniquí HIII 50 percentil presenta un valor superior a los 15 mm establecido por el protocolo Latin NCAP por lo que se puede considerar la existencia de una fractura o lesión en los ligamentos AIS \geq 2.
- En general, los componentes de seguridad pasiva del vehículo constituyen un alto nivel de seguridad para el Dummy HIII 05 percentil mientras que para el Dummy 50 percentil se visualiza un daño en la zona de la rodilla derecha, pero aún se consigue un nivel de seguridad apropiada en los demás criterios.

Capítulo V

Marco Administrativo

Recursos

Para la ejecución de la presente investigación fueron necesarios los recursos que se detallan a continuación, los cuales permitieron asegurar el análisis de colisiones en un vehículo tipo SUV por FEM con la implementación de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros de forma efectiva.

Recursos Humanos

Para el desarrollo de la investigación con el tema: “Análisis de colisiones para un vehículo categoría M1 tipo SUV por FEM mediante metodología explícita con la implementación de componentes de seguridad pasiva para el estudio biomecánico de los pasajeros”, fueron necesarios los recursos humanos que se detallan en la tabla 78.

Tabla 78

Recursos humanos

Orden	Descripción	Función
1	Chuquimarca Catagña, Bryan Alejandro	Investigador
2	Guashpa Bonilla, Daniel Alejandro	Investigador
3	Iza Tobar, Henry Heriberto	Colaborador científico

Recursos Tecnológicos

Los recursos tecnológicos necesarios para el desarrollo de la investigación presente se detallan a continuación en la tabla 79.

Tabla 79*Recursos tecnológicos*

Orden	Detalle
1	Laptops
2	Internet
3	Software LS DYNA (CEN INGENIERÍA S.A)
4	Software LS-PrePost (CEN INGENIERÍA S.A)
5	Software ANSA (Versión estudiantil)
6	Software Solid Works (Versión estudiantil)
7	Microsoft Office

Presupuesto

A continuación, en la tabla 80, se muestra el presupuesto utilizado para el desarrollo de la presente investigación:

Tabla 80*Presupuesto*

Material/Equipo	Cantidad	Unidad de medida	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Capacitación CAE	2	U	350	700
Computador	2	U	900	1800
Mouse para dibujo	2	U	60	120
Ventiladores para computador	2	U	25	50
Uso de software LS – DYNA	2	U	100	200
Viajes – traslado	2	U	20	40
Teléfono celular	1	U	200	200
Papelería	50	U	0.02	1
Energía eléctrica	2	U	25	50
Subtotal				3161
Imprevistos (5%)				158.05
Total				3318.05

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se modeló un vehículo tipo SUV en base a las características de los tres modelos más comercializados en el país correspondiente a la categoría M1, de dimensiones principales como: distancia entre ejes de 2 775 mm, voladizo delantero de 908.83 mm, voladizo posterior de 988.67 mm, ancho total de 1 903.73 mm y alto total de 1 709.91 mm. En el modelo se incluyó componentes que aporten a la resistencia estructural del vehículo, así como barras contra impacto, con una masa total de 2166.92 kg y un centro de masa de coordenadas $x=-2\ 192.35$, $y=1.06152$ y $z=599.858$ mm. En cuanto a seguridad pasiva se incluyó cinturones de seguridad de tres puntos y bolsas de airbag específicas.
- La colisión frontal del vehículo tipo SUV se simuló de acuerdo al protocolo de evaluación R94 CEPE/ONU para cada condición con un procesamiento de 200 ms. En el posprocesamiento de las lesiones anatómicas, el análisis se basó en 6 criterios, es así que el ensayo sin seguridad presentó un grave riesgo AIS 6 con pérdida de vida humana localizada en la cabeza con HIC36 de 2442 y 2535 para el Dummy HIII 50 y 05 percentil, de la misma manera el HIC15 de 2286 y 1507, donde la gravedad de riesgo en daño cerebral o fractura del cráneo fue de 96% y 95% para el conductor y 45% y 38% para el copiloto, en los demás criterios se obtuvo alta probabilidad de riesgo equivalente a fracturas con $AIS \geq 2$ y $AIS \geq 3$. Al implementar la seguridad pasiva la mayoría de criterios disminuyeron radicalmente, a excepción de la deflexión del tórax en el Dummy HIII 05 percentil, donde el valor característico aumenta manteniéndose dentro del rendimiento mínimo de seguridad, esto debido a que el modelo ficticio es pequeño

comparado con la dimensión y posición del cinturón de seguridad. En términos generales el vehículo no satisface la seguridad mínima necesaria para ningún ocupante.

- El ensayo de impacto lateral, se efectuó mediante el carro impactador de barrera móvil deformable de acuerdo al reglamento R95 de la CEPE/ONU, para las condiciones de estudio en un tiempo de 200 ms. En el posprocesamiento la gravedad de lesión fue evaluado en 4 criterios, donde desde la primera condición, los valores son absolutamente bajos dentro del rendimiento máximo en seguridad, levemente se apreció que la deflexión del tórax aumentó en cada Dummy debido a la presencia del cinturón de seguridad. Finalmente se justifica el grado de impacto bajo debido a las características propias del vehículo tipo SUV, ya que al ser un modelo alto el área de contacto con la barrera deformable se dio origen a la altura del travesaño longitudinal, a esto se agregó la presencia de barreras lateral contra impacto en las puertas laterales y el reforzamiento en el bastidor estructural, por lo que, al no producirse un contacto directo no causó daño alguno a los pasajeros.
- El vuelco del vehículo tipo SUV se simuló a base del protocolo FMVSS 208 SAE J2114 con y sin seguridad pasiva en 1500 ms. En el posprocesamiento de las lesiones anatómicas el análisis se basó en los criterios establecidos en el protocolo Latin NCAP y CEPE/ONU, en el ensayo sin seguridad el criterio NIC – Tracción presenta un riesgo de traumas en el cuello del 45% y 60% para el Dummy HIII 50 y 05 percentil, respectivamente, ya que se tiene valores de -4.02 kN y -2.65 kN, los cuales se encuentran fuera del rango de evaluación, así mismo se evidencia un riesgo de estrés en el ligamento cabeza – cuello del 9% y 100% para el Dummy HIII 50 y 05 percentil respectivamente, con valores de 82.6 Nm y 102 Nm. Finalmente se evidencia una fractura cerrada de la pelvis en la zona derecha del 100% en el dummy HIII 50 percentil ya que se aplica una fuerza de 21.9 kN. En los demás criterios se obtiene una baja

probabilidad de riesgo y con valores dentro de los parámetros de evaluación. Por otra parte, al implementar la seguridad pasiva gran parte de los criterios disminuyen sus valores considerablemente a excepción del movimiento de la articulación en la rodilla derecha con 15.3 mm lo que puede provocar fractura o lesiones de ligamentos.

- Mediante la simulación del ensayo de colisión frontal con 40% de traslape, colisión lateral y vuelco se determinó que el primer tipo de colisión es el más susceptible a generar riesgos de fracturas o lesiones anatómicas en el cuerpo humano ficticio, aunque en cierto grado incida la implementación de los componentes de seguridad pasiva con la reducción gradual de las lesiones, no deja de ser un ambiente inseguro para los pasajeros, ya que sin seguridad, prácticamente se obtuvo mediante datos la pérdida de la vida humana a un AIS6, centrado en el criterio de lesión de la cabeza con HIC36 de 2442 y 2535, así como HIC15 de 2286 y 1507 para los dummies HIII 50 y 05 percentil, seguido de alto riesgo en fracturas y lesiones de rango moderado y alto riesgo vital evaluado entre un AIS \geq 2 y AIS \geq 4. Con la seguridad pasiva, de la misma manera se presencié alto impacto sobre la cabeza con valores fuera del rendimiento mínimo de seguridad establecido bajo norma de HIC36 de 1262 y 838, así como HIC15 de 792.1 y 759.4 para los mismos dummies, aunque los valores fueron relativamente bajos y en la mayoría de criterios garantiza la seguridad, no cumplen con lo requerido en la cabeza, la cual se constituye un estudio importante, por lo que se les atribuye una gravedad AIS \geq 4 con riesgo de pérdida vital, pues finalmente se estima que el grado de impacto sobre este punto depende directamente del diseño de airbag y el tamaño corporal del humano.

Recomendaciones

- Obtener planos del diseño correspondiente a los vehículos de la categoría de estudio en convenio o mediante la disposición de marca específica para adquirir dimensiones y detalles precisos con el fin de modelar un vehículo aproximado a la realidad en función a estándares de diseño internacional.
- Realizar un estudio primario de los componentes que aporten resistencia al automóvil durante una colisión, ya que estos son los primeros que se encargan de absorber o disipar la energía de impacto, a fin de determinar autopartes que no son necesarias modelarlas, puesto que no van a variar los resultados dentro de la simulación.
- Estudiar los diferentes criterios correspondientes a la calidad de malla de elementos finitos, de manera que los resultados obtenidos en el posprocesamiento sean más confiables.
- Verificar las unidades en las que se está trabajando dentro de *Ls PrePost* antes de ingresar las propiedades mecánicas en las cartas de control del material, para esto se recomienda visitar la página *Consistent units de LS – DYNA*, donde se muestra la relación de unidades entre las distintas magnitudes como: masa, longitud, tiempo, fuerza, presión, energía, densidad, módulo de Young y gravedad, esto con el fin de obtener resultados en unidades coherentes y entendibles.
- Realizar el estudio del comportamiento estático y dinámico de muelles y amortiguadores mediante la simulación explícita en software para la aplicación y representación de la suspensión del vehículo mediante *dampers* y *springs*.
- Desarrollar un estudio a detalle de los materiales textiles aplicados a bolsas airbag y cinturones de seguridad, en relación a las propiedades y características aplicadas a la simulación por software.

Bibliografía

4RealSim. (2020). *Solucion A Problemas No Lineales, ¿Implícito O Explícito?*.

<https://www.4realsim.com/es/solucion-a-problemas-no-lineales-implicito-explicito/#:~:text=Por%20ejemplo%2C%20la%20soluci%C3%B3n%20impl%C3%ADcita,de%20las%20fuerzas%20de%20inercia.>

Abajas Bustillos , R. (2016) *Uso de la Escala de Lesiones Abreviada (AIS), en sus versiones AIS 98 y AIS 05 (actualización 08), en la Evaluación de la Efectividad y Eficiencia del Tratamiento Hospitalario de los Pacientes Traumáticos.*[Tesis de Doctorado, Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8273/Tesis%20RAB.pdf?sequence=1>

ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH & DEVELOPMENT. (1996).

Anthropomorphic Dummies for Crash and Escape System Testing. AGARD.

Agencia Nacional de Tránsito. (29 de diciembre de 2021). *Causas de la siniestralidad en Ecuador 2021.* Flourish: https://public.flourish.studio/visualisation/8257427/?utm_source=showcase&utm_campaign=visualisation/8257427

Alekseev, S., Tarasov, A., Borovkov, A., Aleshin, M., & Klyavin, O. (2017). VALIDATION OF EURONCAP FRONTAL IMPACT OF FRAME OFF-ROAD VEHICLE: ROAD TRAFFIC ACCIDENT SIMULATION. *Materials Physics and Mechanics*, 11.

ASOCIACIÓN DE EMPRESAS AUTOMOTRICES DEL ECUADOR. (2022). *Boletín de Prensa: Venta de Vehículos-Resumen*[Archivo PDF]. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/05/BOLETIN-DE-VENTAS-PARA-PRENSA-MAYO-2022.pdf>

ASOCIACIÓN DE EMPRESAS AUTOMOTRICES DEL ECUADOR. (2022). *Venta Histórica de Vehículos*. <https://www.aeade.net/>

Auto Crash. (1 de abril de 2020). *¿Por qué el diseño y el material de la carrocería es fundamental en la seguridad del vehículo?*. <https://www.revistaautocrash.com/por-que-el-diseno-y-el-material-de-la-carroceria-es-fundamental-en-la-seguridad-del-vehiculo/>

Bidez, M., Cochran, J., King, D., & Burke, D. (2007). Occupant Dynamics in Rollover Crashes: Influence of Roof Deformation and Seat Belt Performance on Probable Spinal Column Injury. *Annals of Biomedical Engineering*, 35, 1973 - 1998.

Blog de los profesional del taller. (2022). <https://blog.reparacion-vehiculos.es/articulo-tecnico-que-materiales-se-utilizan-en-la-fabricacion-de-las-carrocerias>

Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: Mc Graw Hill.

Caeiro, J., Guede, D., & González , P. (2013). Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 5(1), 43-50.

<https://scielo.isciii.es/pdf/romm/v5n1/revision1.pdf>

Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito. (enero de 2016). *Cinturón de Seguridad*[Archivo PDF]. https://www.conaset.cl/wp-content/uploads/2016/01/fichas_accion_5.pdf

Delgano Bueno , S., Montes de Oca Hernández , D., & Pérez Mallada , N. (2011). *Biomecánica en la Valoración Médico Legal de las Lesiones*. Madrid: ADEMÁS Comunicación,s.l.

Departamento de Transporte de los Estados Unidos. (s.f.). *Cronología del programa de calificaciones de seguridad de 5 estrellas de la NHTSA*. <https://www.nhtsa.gov/ratings>

Diario Oficial de la Unión Europea. (20 de septiembre de 2012). *Reglamento N° 94 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE)-Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal*. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:42012X0920\(02\)&from=PT](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:42012X0920(02)&from=PT)

Diario Oficial de la Unión Europea. (10 de julio de 2015). *Reglamento N° 95 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas-Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral [2015/1093]*. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X0710\(01\)&from=CS](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X0710(01)&from=CS)

Engineering Simulation And Scientific Software. (2022). *La línea completa de Software Ansys*. https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/?gclid=Cj0KCQjw_4-SBhCgARIsAAlegrXCLt1NpSoF4nclvav8B8YdV-SzhsCp-c0BxwZnpIVCzMX1ogVsD8UaAuSGEALw_wcB

Fernandez Albalat, R. (2017) *Estudio de mercado de la incorporación de sistemas de confort, asistencia y seguridad en los vehículos*[Tesis, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/45542/1/TFG_RAFAEL_DE_MARIA_FERNANDEZ_ALBALAT.pdf

FIA Foundation for the Automobile and Society. (2009). *Cinturones de seguridad y sistemas de retención infantil: un manual de seguridad vial para decisores y profesionales*. Inís Communication. https://www.grsroadsafety.org/wp-content/uploads/Seat-belts-child-restrants_Spanish-.pdf

GLOBAL SAFETY TEXTILES . (2022). <https://www.global-safety-textiles.com/rueckverfolgbarkeit/?lang=en>

Goebel Engineering. (14 de septiembre de 2021). *Simulación de caída FEM: ¿Cuál es el daño por caída?*. <https://www.goebel-engineering.com/es/simulacion-de-caida-fem/amp/>

HELLA TECH WORLD. (2022). *Estructura y Funcionamiento del Airbag*. <https://www.hella.com/techworld/es/Informacion-Tecnica/Electricidad-y-electronica-del-automovil/Sistema-airbag-3083/>

HUMANETICS. (s.f.). *Historia Humanética*. <https://humanetics.humaneticsgroup.com/about-us/history>

Ibañez, Á. (7 de noviembre de 2018). *La historia de los “dummies”, los muñecos que mejoraron la seguridad de los automóviles*. <https://tecvolucion.com/historia-dummies-seguridad/>

Ingeniería Avanzada para Soluciones Reales. (marzo de 2017). *INTRODUCCIÓN A LS-DYNA (4 SAFETY)*. http://www.complx.com.mx/wp-content/uploads/2017/04/chapter1_1_1_rev2.pdf

INGENIERIA Y MECANICA AUTOMOTRIZ. (2 de marzo de 2020). *Qué es el Coeficiente de Poisson y cómo se calcula?*. <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-el-coeficiente-de-poisson-y-como-se-calcula/>

Janzen, I. (10 de agosto de 2012). *El jacobiano: calidad de malla de elementos finitos*. <http://www.isaiahjanzen.com/2012/08/the-jacobian-finite-element-mesh-quality.html>

LATIN NCAP. (s.f.). *Ensayos*. <https://www.latinncap.com/es/nuestros-ensayos>

LS-DYNA. (s.f.). <https://hmong.es/wiki/LS-DYNA>

Lubbe, N., Hikichi, H., Takahashi, H., & Davidsson, J. (2011). REVIEW OF THE EURO NCAP UPPER LEG TEST. *Conference: The 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 13.

https://www.researchgate.net/publication/271833447_Review_of_the_Euro_NCAP_Upper_Leg_Test

MACHINE DESIGN DATABOOK. (2004). *PROPERTIES OF ENGINEERING MATERIALS*. McGraw-Hill.

Menéndez, T. (22 de marzo de 2022). *Siniestralidad en Ecuador 2021*.

<https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/velocidad-buses-ant-accidentes-transito/>

Ministerio de Gobierno. (s.f.). *Accidentes de tránsito con tendencia a la baja en el país*.

<https://www.ministeriodegobierno.gob.ec/accidentes-de-transito-con-tendencia-a-la-baja-en-el-pais/#:~:text=Los%20accidentes%20de%20tr%C3%A1nsito%20es,de%20mortalidad%20de%20Am%C3%A9rica%20Latina.>

Nahum, A. M., & Melvin, J. W. (2002). *Accidental Injury: Biomechanics and Prevention*. Springer Science.

Organización Mundial de la Salud. (2009). *Informe Sobre la Situación Mundial de la Seguridad Vial*. Organización Mundial de la Salud. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44137/9789243563848_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

RIVEKIDS. (14 de enero de 2021). *Pretensores en Cinturón de Seguridad*. <https://www.rivekids.com/pretensores-cinturon-seguridad/>

RIVEKIDS TECHNOLOGY. (2 de agosto de 2018). *Los Dummies en la Actualidad*.

<https://www.rivekids.com/dummies-crash-test/>

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2016). *RTE INEN 034 "ELEMENTOS MÍNIMOS DE SEGURIDAD PARA VEHÍCULOS AUTOMOTORES"*[Archivo PDF].

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/M1-RTE-034-4R.pdf>

Shashi Kuppa, J. W., & Mark Haffner, R. (1999). LOWER EXTREMITY INJURIES AND ASSOCIATED INJURY CRITERIA. *National Highway Traffic Safety Administration*(457), 15.

Sociedad de Ingenieros de Automoción. (s.f.). *Estándares SAE para vehículos terrestres*.

<https://www.sae.org/standards/ground-vehicle>

The National Crash Analysis Center. (2012). Extended Validation of the Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan. *NCAC Working Paper*, 18.

Toyota . (2022). http://toyota-spanish.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/8652/~/%E2%BFqu%E3%A9-son-los-cinturones-de-seguridad-elr%2Falr-de-3-puntos%3F#:~:text=El%20Retractor%20de%20Cierre%20de,o%20al%20momento%20del%20impacto.

UDLAP. (s.f.). *Investigación Acerca de los Dummies*. <http://catarina.udlap.mx/>

[u_dl_a/tales/documentos/lim/maldonado_j_r/apendiceA.pdf](http://catarina.udlap.mx/udla/tales/documentos/lim/maldonado_j_r/apendiceA.pdf)

Valero Cabello, E. (2010). *Antropometría*. [https://www.insst.es/documents/](https://www.insst.es/documents/94886/524376/DTEAntropometriaDP.pdf/032e8c34-f059-4be6-8d49-4b00ea06b3e6)

[94886/524376/DTEAntropometriaDP.pdf/032e8c34-f059-4be6-8d49-4b00ea06b3e6](https://www.insst.es/documents/94886/524376/DTEAntropometriaDP.pdf/032e8c34-f059-4be6-8d49-4b00ea06b3e6)

Vázquez Vega, D., Hernández Jiménez, J. R., Fabela Gallegos, M., Flores Centeno, O., Sánchez Vela, L. G., & Molano Clemente, M. (2017). REVISIÓN DE LA NORMATIVIDAD SOBRE LOS REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD EN AUTOMÓVILES. *Instituto Mexicano del Transporte*, 114.
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt491.pdf>

Vázquez Vega, D., Hernández Jiménez, J., Fabela Gallegos, M., Flores Centeno, O., Sánchez Vela, L., & Cruz Acevedo, M. (2020). PROGRAMAS DE EVALUACIÓN DE AUTOS NUEVOS PARA LOGRAR VEHÍCULOS SEGUROS. *Instituto Mexicano del Transporte*, 136. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt595.pdf>

Vetturazzi, R. (6 de mayo de 2020). *Ventajas de la integración de LS-DYNA con las herramientas de Ansys*. <https://www.esss.co/es/blog/ventajas-de-la-integracion-de-ls-dyna-con-las-herramientas-de-ansys/>

Anexos