



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**  
**DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

**“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL AIRBAG DEL CONDUCTOR DE AUTOBÚS EN COLISIONES FRONTALES MEDIANTE SIMULACIÓN”.**

---

**AUTOR: Diego Hernán Acosta Ramón**

**TUTOR: Ing. Mg. César Hernán Arroba Arroba**

**AMBATO– ECUADOR**

**Julio - 2022**

## CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: “**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL AIRBAG DEL CONDUCTOR DE AUTOBÚS EN COLISIONES FRONTALES MEDIANTE SIMULACIÓN**”, elaborado por el Sr. Diego Hernán Acosta Ramón, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 0502927767, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente Trabajo Experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, Julio 2022

---

**Ing. Mg. César Hernán Arroba Arroba**  
**TUTOR**

## **AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Yo, Diego Hernán Acosta Ramón, con C.I. 0502927767 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL AIRBAG DEL CONDUCTOR DE AUTOBÚS EN COLISIONES FRONTALES MEDIANTE SIMULACIÓN”**, así como también análisis computacionales, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Julio 2022



---

**Diego Hernán Acosta Ramón**

**C.I: 0502927767**

**AUTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Julio 2022



---

**Diego Hernán Acosta Ramón**

**C.I: 0502927767**

**AUTOR**



## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el estudiante Diego Hernán Acosta Ramón de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL AIRBAG DEL CONDUCTOR DE AUTOBÚS EN COLISIONES FRONTALES MEDIANTE SIMULACIÓN”**.

Ambato, Julio 2022

Para constancia firman:

---

**Ing. Mg. Oscar Iván Analuiza Maiza**  
**Miembro Calificador**

---

**Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez**  
**Miembro Calificador**

## **DEDICATORIA**

A la memoria de Elvia Fonseca y Lastenia Gutiérrez, que me dejaron el legado del trabajo duro, la honestidad y la valentía para afrontar cualquier adversidad.

A mis padres Hernán Acosta y Marcela Ramón que me brindaron consejos y apoyo para dar lo mejor de mí, a mi hermana Sandy que siempre dedicó parte de su tiempo para que yo pueda cumplir mis objetivos. Por tales razones, entrego mi trabajo en ofrenda a la paciencia y amor que me han dedicado.

Diego Acosta

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por colmarme de bendiciones y siempre iluminar los caminos hacia las metas de mis objetivos.

A mis padres por haberme brindado su apoyo emocional y económico para culminar el presente proyecto.

A mi familia quienes han estado presente en cada momento de mi vida, mostrándome su apoyo incondicional para alcanzar mis metas.

A la Universidad Técnica de Ambato, la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por haberme formado como profesional y dejar que me lleve conocimientos que aplicaré en la sociedad.

Al Ing. Mg. César Arroba, por haberme brindado su paciencia y conocimientos para el desarrollo de esta tesis.

A mis amigos quienes me han brindado su apoyo durante mi vida universitaria para lograr culminar con mi carrera.

## ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
GLOSARIO.....	xxi
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT .....	xxiii
CAPÍTULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1 Antecedentes investigativos.....	1
1.1.1 Investigaciones preliminares.....	1
1.1.2 Justificación .....	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Fundamentación teórica.....	4
1.3.1 Estructura del autobús.....	4
1.3.2 Elementos de seguridad de la cabina .....	6
1.3.3 Protección dentro de la cabina .....	8
1.3.4 Simulación .....	14
1.3.5 Software de simulación. ANSYS LS-DYNA RESEARCH .....	20
1.3.6 Comisión Económica Para Europa Reglamento N° 94.....	23
1.3.7 National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).....	24
1.3.8 EURONCAP .....	24

1.4	Hipótesis .....	26
1.4.1	Señalamiento de variable de la hipótesis .....	26
CAPÍTULO II .....		27
2	METODOLOGÍA.....	27
2.1	Nivel o tipo de investigación .....	27
2.1.1	Investigación bibliográfica.....	27
2.1.2	Investigación explorativa .....	27
2.1.3	Investigación descriptiva .....	27
2.1.4	Investigación explicativa .....	27
2.2	Población y muestra.....	28
2.2.1	Población.....	28
2.2.2	Muestra .....	28
2.3	Recursos.....	28
2.3.1	Recursos humanos .....	28
2.3.2	Recursos institucionales.....	28
2.3.3	Recursos materiales .....	28
2.3.4	Recursos económicos.....	29
2.4	Operacionalización de variables .....	30
2.4.1	Variable Independiente .....	30
2.4.2	Variable Dependiente.....	32
2.5	Plan de recolección de información.....	34
2.6	Procedimiento.....	35
2.6.1	Criterio de lesiones del maniquí .....	35
2.6.2	Simulaciones .....	36
2.6.3	Modelado CAD del vehículo .....	38
2.6.4	Malla del modelo .....	43
2.6.5	Sistema de airbag .....	47

2.6.6	Doblado de airbags. ....	48
2.6.7	Ubicación del maniquí de pruebas de impacto Híbrido III.....	50
2.6.8	Materiales.....	51
CAPITULO III.....		56
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	56
3.1	Resultados.....	56
3.2	Impacto frontal con barrera fija .....	56
3.3	Impacto oblicuo con barrera móvil.....	57
3.4	Representación de simulaciones .....	58
3.5	Criterios de lesiones del maniquí en impacto frontal sin airbag.....	61
3.5.1	Criterio de lesión en la cabeza (HIC).....	61
3.5.2	Criterio de lesiones en el cuello .....	61
3.5.3	Índice de severidad en el pecho .....	62
3.5.4	Desplazamiento del tórax.....	63
3.5.5	Fuerza en los fémures .....	64
3.5.6	Fuerzas de compresión en las tibias.....	65
3.5.7	Desplazamiento de las rodillas.....	66
3.6	Criterios de lesiones en un impacto frontal con airbag A.....	67
3.6.1	Criterio de lesión en la cabeza (HIC).....	67
3.6.2	Criterio de lesiones en el cuello .....	67
3.6.3	Índice de severidad en el pecho .....	68
3.6.4	Desplazamiento del tórax.....	69
3.6.5	Fuerza en los fémures .....	69
3.6.6	Fuerzas de compresión en las tibias.....	70
3.6.7	Desplazamiento de las rodillas.....	71
3.7	Criterios de lesiones en un impacto frontal con airbag B.....	73
3.7.1	Criterio de lesión en la cabeza (HIC).....	73

3.7.2	Criterio de lesiones en el cuello .....	73
3.7.3	Índice de severidad en el pecho .....	74
3.7.4	Desplazamiento del tórax.....	75
3.7.5	Fuerza en los fémures .....	76
3.7.6	Fuerzas de compresión en las tibias.....	77
3.7.7	Desplazamiento de las rodillas.....	77
3.8	Criterios de lesiones en impacto Oblicuo sin airbag .....	79
3.8.1	Criterio de lesión en la cabeza (HIC).....	79
3.8.2	Criterio de lesión cerebral (BRIC).....	79
3.8.3	Criterio de lesiones en el cuello .....	80
3.8.4	Índice de severidad en el pecho .....	81
3.8.5	Desplazamiento del tórax.....	82
3.8.6	Fuerza en los fémures .....	83
3.8.7	Fuerzas de compresión en las tibias.....	84
3.8.8	Desplazamiento de las rodillas.....	85
3.9	Criterios de lesiones en un impacto Oblicuo con Airbag A .....	86
3.9.1	Criterio de lesión en la cabeza (HIC).....	86
3.9.2	Criterio de lesión cerebral (BRIC).....	86
3.9.3	Criterio de lesiones en el cuello .....	87
3.9.4	Índice de severidad en el pecho .....	88
3.9.5	Desplazamiento del tórax.....	89
3.9.6	Fuerza en los fémures .....	89
3.9.7	Fuerzas de compresión en las tibias.....	90
3.9.8	Desplazamiento de las rodillas.....	91
3.10	Criterios de lesiones en un impacto Oblicuo con Airbag B.....	92
3.10.1	Criterio de lesión en la cabeza (HIC).....	92
3.10.2	Criterio de lesión cerebral (BRIC).....	93

3.10.3	Criterio de lesiones en el cuello .....	94
3.10.4	Índice de severidad en el pecho .....	95
3.10.5	Desplazamiento del tórax.....	96
3.10.6	Fuerza en los fémures .....	96
3.10.7	Fuerza de compresión en las tibias .....	97
3.10.8	Desplazamiento de las rodillas.....	98
3.10.9	Resumen de resultados.....	100
3.11	Verificación de energía de Hourglass.....	109
3.11.1	Energía de Hourglass en Impacto frontal sin airbag.....	109
3.11.2	Energía de Hourglass en Impacto frontal con airbag tipo A.....	109
3.11.3	Energía de Hourglass en Impacto frontal con airbag tipo B.....	110
3.11.4	Energía de Hourglass en Impacto oblicuo sin airbag.....	110
3.11.5	Energía de Hourglass en Impacto oblicuo con airbag tipo A .....	111
3.11.6	Energía de Hourglass en Impacto oblicuo con airbag tipo B.....	111
CAPITULO IV.....		113
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	113
4.1	Conclusiones.....	113
4.2	Recomendaciones .....	114
BIBLIOGRAFÍA.....		115
ANEXOS.....		120
Anexo 1 .....		121
Anexo 2 .....		122
Anexo 3 .....		123
Anexo 4.....		124
Anexo 5 .....		125
Anexo 6.....		126
Anexo 7 .....		126



Anexo 8.....	127
Anexo 9.....	128
Anexo 10.....	129
Anexo 11.....	142
Anexo 12.....	142
Anexo 13.....	143
Anexo 14.....	143

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Recursos económicos del proyecto.....	29
Tabla 2: Variable independiente. ....	30
Tabla 3: Variable dependiente. ....	32
Tabla 4: Plan de recolección de información.....	34
Tabla 5: Condiciones de la simulación de impacto oblicuo.....	38
Tabla 6: Descripción del modelo de la empresa MIRAL a simular.....	39
Tabla 7: Modelo 3D de estructura de autobús de la empresa MIRAL.....	41
Tabla 8: Vistas del modelo mallado en ANSYS LS-DYNA RESEARCH. ....	44
Tabla 9: Características de malla del modelo de simulación. ....	46
Tabla 10: Materiales.....	53
Tabla 11: Condiciones de simulación. ....	57
Tabla 12: Tabla de resumen de resultados. ....	100
Tabla 13: Porcentaje de cumplimiento de criterios de lesiones del maniquí en impactos frontales.....	108
Tabla 14: Porcentaje de cumplimiento de criterios de lesiones del maniquí en impactos frontales oblicuos. ....	108
Tabla 15: Características del cilindro .....	131
Tabla 16: Datos del airbag para ingreso al programa . ....	134
Tabla 17: Condiciones de simulación adicionales. ....	137

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura del autobús interprovincial .....	5
Figura 2: Estructura de la cabina.....	6
Figura 3: Disposición de la cabina de un bus.....	8
Figura 4: Zona del conductor .....	9
Figura 5: Mecanismo de inflado de airbag.....	9
Figura 6: Despliegue de las bolsas de aire .....	10
Figura 7: Despliegue de las bolsas de aire .....	11
Figura 8: Disposición de las bolsas de aire en un vehículo.....	14
Figura 9: Autobús con airbag.....	15
Figura 10: Dummy para las pruebas .....	17
Figura 11: Tres tipos de dummies.....	17
Figura 12: Esquema de la barrera fija respecto al vehículo .....	19
Figura 13: Esquema de la barrera móvil respecto al vehículo .....	20
Figura 14: Impacto entre vehículo y barrera.....	21
Figura 15: Desarrollo del programa .....	22
Figura 16: Calidad de la malla. ....	23
Figura 17: Generación del modelo.....	24
Figura 18: Representación del impacto de un vehículo .....	25
Figura 19: Criterios de lesiones del maniquí.....	35
Figura 20: Esquema de las simulaciones. ....	36
Figura 21: Dimensiones generales de barrera CEPE R94.....	37
Figura 22: Representación del impacto.....	37
Figura 23: Procedimiento de simulación de impacto oblicuo con barrera móvil producido en el conductor.....	38

Figura 24: Dimensiones de modelos de airbags extendidos implementados en las simulaciones, Airbag A izquierda, Airbag B derecha.....	48
Figura 25: Airbags doblados, izquierdo airbag tipo A, derecho airbag B.....	49
Figura 26: Ingreso de propiedades del airbag al programa. Unidades mm ms kg .....	49
Figura 27: Curva de presión de inflado de airbag .....	50
Figura 28: Ubicación del conductor y dimensiones con respecto al volante, tablero, asiento y habitáculo del conductor.....	51
Figura 29: Propiedades mecánicas del material.....	52
Figura 30: Diagrama esfuerzo deformación del material.....	52
Figura 31: Selección de propiedades.....	54
Figura 32: Impacto frontal de autobús con barrera fija.....	57
Figura 33: Impacto oblicuo con barrera móvil.....	58
Figura 34: Secuencia impacto frontal con barrera fija. ....	59
Figura 35: Secuencia impacto oblicuo con barrera móvil.....	60
Figura 36: Curva de aceleración resultante vs Tiempo.....	61
Figura 37: Curvas de criterio de cortante (a) y tensión (b) en el cuello.....	62
Figura 38: Curva de índice de severidad del pecho. ....	63
Figura 39: Curva de desplazamiento del tórax.....	63
Figura 40: Criterio de fuerza del fémur izquierdo (a), fémur derecho (b). ....	64
Figura 41: Fuerzas de compresión de la tibia izquierda (a), derecha (b). ....	65
Figura 42: Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b). ....	66
Figura 43: Curva de aceleración resultante vs Tiempo.....	67
Figura 44: Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello.....	68
Figura 45: Curva de índice de severidad del pecho. ....	69
Figura 46: Curva de desplazamiento del tórax.....	69
Figura 47: Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b). ....	70

Figura 48: Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b). ...	71
Figura 49: Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b). .....	72
Figura 50: Curva de aceleración resultante vs Tiempo. ....	73
Figura 51: Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello. ....	74
Figura 52: Curva del índice de severidad del pecho. ....	75
Figura 53: Curva de desplazamiento del tórax. ....	75
Figura 54: Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b). ....	76
Figura 55: Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b). ...	77
Figura 56: Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b). .....	78
Figura 57: Curva de aceleración resultante vs Tiempo. ....	79
Figura 58: Velocidades rotacionales en x (a), y (b), z (c). ....	80
Figura 59: Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión en el cuello. ....	81
Figura 60: Curva de índice de severidad del pecho. ....	82
Figura 61: Curva de desplazamiento del tórax. ....	82
Figura 62: Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b). ....	83
Figura 63: Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b). ...	84
Figura 64: Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b) .....	85
Figura 65: Curva de aceleración resultante vs Tiempo .....	86
Figura 66: Velocidades rotacionales en x (a), y (b), z (c) .....	87
Figura 67: Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello. ....	88
Figura 68: Curva de índice de severidad del pecho. ....	88
Figura 69: Curva de desplazamiento del tórax. ....	89
Figura 70: Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b). ....	90
Figura 71: Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b). ...	91
Figura 72: Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b). .....	92
Figura 73: Curva de aceleración resultante vs Tiempo. ....	93

Figura 74: Velocidades rotacionales en x (a), y (b), z (c).....	94
Figura 75: Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello.....	95
Figura 76: Curva de índice de severidad del pecho. ....	96
Figura 77: Curva de desplazamiento del tórax.....	96
Figura 78: Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b). ....	97
Figura 79: Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b)...	98
Figura 80: Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b). ....	99
Figura 81: Gráfica de impacto frontal sin airbag de energías vs tiempo. ....	109
Figura 82: Gráfica de impacto frontal con airbag tipo A de energías vs tiempo. ....	110
Figura 83: Gráfica de impacto frontal con airbag tipo B de energías vs tiempo. ....	110
Figura 84: Gráfica de impacto oblicuo sin airbag de energías vs tiempo. ....	111
Figura 85: Gráfica de impacto oblicuo con airbag tipo A de energías vs tiempo....	111
Figura 86: Gráfica de impacto oblicuo con airbag tipo B de energías vs tiempo....	112
Figura 87: Movimientos de maniquí en impacto frontal para dos tipos de condiciones, grafico superior pulso de aceleración medido en impacto real y simulado, grafico intermedio modelo real, grafico inferior simulación.....	121
Figura 88: Vistas laterales secuenciales de la prueba de barrera deformable frontal EuroNCAP real simulada para el vehículo todo terreno .....	122
Figura 89: Vistas secuenciales desde abajo de la prueba de barrera deformable frontal EuroNCAP real y simulada para el vehículo todo terreno .....	123
Figura 90: Vistas secuenciales desde arriba de la prueba de barrera deformable frontal EuroNCAP real y simulada para el bastidor del vehículo todoterreno .....	124
Figura 91: Validación de modelo inflador de airbag utilizando el programa ANSYS LSDYNA.....	125
Figura 92: Gráfico izquierda banco de pruebas físico para ensayo ECE-R29, grafico derecha secuencia de simulación y ensayo ECE-29 tiempo máximos 60ms.....	126

Figura 93: Comparación de resultados de ensayo y simulación ECE-R29, Grafico izquierda resultados simulados, grafico derecho resultados de ensayo real .....	126
Figura 94: Deformación de estructura en diferentes velocidades iniciales en impacto frontal .....	127
Figura 95: Análisis de impacto frontal de 3 maniquís de pruebas de impacto que representan afectación en niños, grafico superior modelo FEM de autobús, grafico inferior izquierda estructura deformada, grafico inferior derecho aceleraciones en cabeza de los 3 maniqués .....	128
Figura 96: Esquema de la máquina ATS, donde se inyecta aire comprimido al airbag mediante un reservorio de aire y posteriormente colisiona con un cilindro calibrado correctamente a un acelerómetro .....	130
Figura 97: Vistas del airbag .....	130
Figura 98: Cilindro a simular .....	131
Figura 99: Mallado general .....	132
Figura 100: Calidad de la malla, con valor de Jacobiano mínimo de 5.729e-1 y valor máximo de 1 .....	132
Figura 101: Existen 12594 elementos y 13269 nodos en total. ....	133
Figura 102: Gráfica presión vs tiempo de la explosión del airbag, donde se muestran resultados de presiones para volúmenes del tanque de 0.1, 0.06 y 0.03 sin transferencia de calor .....	134
Figura 103: Ingreso de datos del airbag al programa. ....	135
Figura 104: Ingreso de datos del cilindro al programa. ....	135
Figura 105: Ingreso de propiedades del airbag al programa. ....	136
Figura 106: Secuencia de simulación en ANSYS LS-DYNA RESEARCH. ....	137
Figura 107: Gráfica aceleración (Gs) vs Tiempo del programa. Con 10.4 de fuerzas Gs máximas producidas en 50 ms. ....	138
Figura 108: Gráfica aceleración (Gs) vs Tiempo del artículo.....	138

Figura 109: Gráfica velocidad (m/s) vs Tiempo del programa. Velocidad máxima del cilindro basculante 4.37 m/s producidos en 125 ms. ....	139
Figura 110: Gráfica velocidad (m/s) vs Tiempo del artículo .....	139
Figura 111: Gráfica presión vs Tiempo del programa. Con un valor máximo de 155 kPa a 23 ms. ....	140
Figura 112: Gráfica presión (kPa) vs Tiempo del artículo.....	141
Figura 113: Impresión a escala en 3D de la estructura del autobús.....	142
Figura 114: Estructura a escala de autobús impreso en 3D. ....	142
Figura 115: Modelo de estructura de autobús impreso en 3D. ....	143
Figura 116: Entrega del trabajo de investigación a la empresa MIRAL.....	143



## **GLOSARIO**

- CEPE: Comisión Económica para Europa.
- EURONCAP: Programa Europeo de Evaluación de Coches Nuevos.
- NHTSA: Administración de la Sociedad Nacional de Tránsito en Carreteras.
- CAD: Diseño Asistido por Computador.
- CAE: Ingeniería Asistida por Computador.
- SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices.
- ODB: Barrera deformable compensada.
- RMDB: Resultados de Investigación de Barrera Móvil.
- INEN: Servicio Ecuatoriano de Normalización.
- NTE: Norma Técnica Ecuatoriana.
- HIC: Criterio de Lesión en la Cabeza.
- BRIC: Criterio de Lesión Cerebral.

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realizó con el fin de analizar los efectos del airbag producidos en conductores de autobuses interprovinciales, para ello se ubicaron bolsas de aire en su estructura y posteriormente se realizaron simulaciones de choques frontales mediante el uso del reglamento CEPE R94, RMDB por EURONCAP y NHTSA puesto en vigencia desde el año 2020.

Para la etapa inicial se seleccionó el autobús interprovincial para modelar los elementos de aporte estructural mediante software CAD, más adelante se usó ANSYS LS-DYNA RESEARCH para la simulación, en dónde se tomó en cuenta la selección del airbag y su adecuada posición, el maniquí Híbrido III que permitió medir 8 criterios de lesiones establecidas por el reglamento R94, y las barreras para impactos frontales y oblicuos dada por EURONCAP Y NHTSA. Ingresados los elementos y parámetros necesarios en el software, se dio inicio a las simulaciones, las mismas que constan de 4 choques con y sin airbag, uno frontal y el otro con desfase oblicuo de 15 grados. Finalizada la simulación se realizó la comparación e interpretación de resultados.

Con la investigación se concluyó que el uso del airbag es perjudicial durante choques frontales y que no son de importancia, porque incrementan las lesiones en el conductor, siendo esto comprobado al obtener resultados que superan los límites dados por los criterios de lesiones en maniquí del reglamento R94.

**Palabras clave:** Autobús interprovincial, Airbag, Maniquí Híbrido III, Barrera fija, Barrera móvil, Simulación, Impacto frontal, Impacto oblicuo.

## ABSTRACT

The present thesis work was carried out in order to analyze the effects of the airbag produced in interprovincial bus drivers, for which airbags were located in its structure and later simulations of frontal crashes were carried out using the CEPE R94, RMDB regulation. by EURONCAP and NHTSA put into effect from the year 2020.

For the initial stage, the interprovincial bus was selected to model the structural contribution elements using CAD software, later ANSYS LS-DYNA RESEARCH was used for the simulation, where the selection of the airbag and its adequate position was taken into account, the dummy Hybrid III that allowed to measure 8 injury criteria established by the R94 regulation, and the barriers for frontal and oblique impacts given by EURONCAP and NHTSA. Once the necessary elements and parameters were entered into the software, the simulations began, which consist of 4 crashes with and without airbags, one frontal and the other with an oblique phase shift of 15 degrees. Once the simulation was completed, the results were compared and interpreted.

With the investigation it was concluded that the use of the airbag is harmful during frontal crashes and that they are not important, because they increase the injuries in the driver, this being verified by obtaining results that exceed the limits given by the criteria of injuries in the dummy of the regulation. R94.

**Keywords:** Interprovincial bus, Airbag, Hybrid III Dummy, Fixed barrier, Mobile Barrier, Simulation, Frontal impact, Oblique impact.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes investigativos

#### 1.1.1 Investigaciones preliminares

Para el presente estudio se implementará el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y el de ingeniería asistida por ordenador (CAE), especializado en simulaciones de impactos automotrices ANSYS LS-DYNA RESEARCH debido a que cuenta con una amplia validación, por ejemplo, se citan los siguientes artículos referenciales: estudio que tiene como objetivo validar el comportamiento biomecánico del modelo computacional de maniquí de pruebas de impacto Híbrido III, con cinturón de seguridad ensamblado al modelo de auto y accionamiento de airbag realizando colisiones frontales físicas y simuladas, contrastando resultados con modelo real, llegando a la conclusión de que el maniquí físico ubicado en el automóvil se comporta de igual manera que el simulado al obtener las mismas causas de lesiones, esto se puede observar en la Figura 87 del Anexo 1 [1]. Por otro lado, se realizó una validación por parte del Programa Europeo de Validación de Coches Nuevos (EURONCAP) con el fin de validar el programa, en impactos frontales de estructura de vehículo todo terreno contra una barrera deformable físicamente, para después simular modelos computacionales de vehículo, maniquí y bolsa de aire que se aprecia en las Figuras 88, 89 y 90 de los anexos 2, 3 y 4 [2]. Una vez realizado los impactos físicos y simulados a diferentes tiempos, el estudio concluye que se obtienen resultados casi exactos de lesiones de maniquí, comportamiento de la bolsa de aire e incluso de deformación de la carrocería y bastidor del vehículo, comprobando que el software puede obtener los mismos efectos que un ensayo real [2].

Otra investigación que valida el programa, es la publicada por la revista SAE, en dónde se tiene como objetivo realizar ensayos físicos de impactos de airbags con una máquina de inflado e impactado, para posteriormente ingresar al programa y validar el modelo inflador de bolsa de aire utilizado en automóviles, una vez realizados los ensayos físicos y simulados se obtuvieron resultados similares de presión, aceleración y velocidad, por lo que concluye que el programa es apto para usarse en este tipo de

validaciones, esto puede ser observado en la Figura 91 del Anexo 5 [3]. En otra investigación, se tiene como objetivo validar resultados obtenidos del ensayo físico en Comisión Económica Para Europa (CEPE) R29 de péndulo de impactos frontales de autobuses por medio de simulación con ANSYS LS-DYNA RESEARCH, que se puede apreciar en la Figura 92 y 93 de los anexos 6 y 7 [4], la cual consiste en impactar físicamente un péndulo de 1.5 toneladas con la cabina de un autobús y comprobar que no exista contacto entre la zona del conductor y cualquier parte de la carrocería o el péndulo, también se hizo su respectiva simulación, en donde se obtuvieron datos similares de zonas de deformaciones y fracturadas en la estructura, concluyendo que dicha cabina se comporta de igual manera que en el software.

En otra de las investigaciones se simula el impacto de autobuses con el objetivo evaluar el comportamiento biomecánico de pasajeros en los que se incluyen niños y también la deformación de estructura en impactos frontales, para ello se observa modelo de elemento finito del autobús, estructura deformadas y las gráficas de aceleraciones, esto para llegar a la conclusión de que existen lesiones graves en la cabeza de los tres maniquís, como se aprecia en las Figuras 94 y 95 de los anexos 8 y 9 [5], [6].

Para este perfil se investigó varios documentos técnicos como artículos científicos, tesis, manuales, entre otros, los mismos se detallan en el literal de bibliografía, siendo los artículos más relevantes los mostrados anteriormente.

Los datos de simulación para diferentes tipos airbags como, por ejemplo: el caudal másico, presión de descarga e inflado y temperatura de inflado del gas se encuentran publicados en revistas especializadas, documentos y manuales [1], [7], [8] y [9], los mismos que se encuentran validados. Al contar con información confiable de propiedades para el funcionamiento de los airbags permite el desarrollo de este proyecto que se centra en verificar el comportamiento biomecánico del conductor de un autobús en impactos frontales al implementar ningún o distintos modelos de airbag.

### **1.1.2 Justificación**

Las bolsas de aire o airbags, son dispositivos de seguridad que se implementan para reducir las lesiones de pasajeros en vehículos en el caso de colisiones graves, ha pasado cincuenta años desde que se comercializó el primer vehículo que implementaba este tipo de mecanismo, en este tiempo se ha desarrollado nuevas tecnologías para mejorar la seguridad en estos componentes, en la actualidad se utiliza tecnología

computacional avanzada como softwares especializados que en los mismos se pueden desarrollar nuevos modelos con el objetivo de mejorar la seguridad de pasajeros en vehículos. La evolución de la tecnología CAE en la última década ha permitido tener softwares altamente validados para analizar el comportamiento de estructuras automotrices en impactos, analizando la biomecánica de sus pasajeros conjuntamente con la interacción de componentes de seguridad como airbag y cinturones de seguridad, los programas más utilizados en esta área son MADYMO y ANSYS LS-DYNA RESEARCH en los que se desarrollan modelos de autos, maniquís generados por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico (NHTSA) [10], ponencias de técnicos EURONCAP en la conferencia #12 de ANSYS LS-DYNA RESEARCH de 2019 [11], artículos publicados en la conferencia de EURONCAP [12], boletín técnico de certificación de modelo humano de peatón [13], artículos técnicos de la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) [14], entre otras organizaciones de investigación para la seguridad de pasajeros de vehículos, que han realizado ensayos de impactos de vehículos con la Barrera Deformable Compensada (ODB) y con la barrera móvil obteniendo Resultados de Investigación de Barrera Deformable Móvil (RMDB) .

El uso de ANSYS LS-DYNA RESEARCH es de gran importancia para el avance de las investigaciones, debido a que cuenta con una precisión en sus simulaciones, esto ha sido demostrado en varias publicaciones de revistas de renombre como SAE, la cual emitió un artículo en el que se realizó la validación de un modelo computacional de airbag mediante un ensayo físico [7]. Para esta investigación se tomó como referencia dicho artículo y se replicó el ensayo físico mediante simulación, para posteriormente comparar resultados y validar el presente estudio, como se observa en el anexo 10.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Analizar los efectos del airbag del conductor de autobús en colisiones frontales mediante simulación.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Modelar mediante CAD el autobús interprovincial cumpliendo normativas de diseño y construcción de un modelo de autobús.
- Simular diferentes modelos de airbags por medio del software CAE para identificar la configuración que disminuya lesiones al conductor.
- Simular condiciones de impacto frontal de autobús basado en R94 CEPE 40% ODB Frontal, implementando airbag y sin airbag por medio de software CAE para verificar las lesiones en conductor en este tipo de colisiones.
- Simular condiciones de impacto frontal de autobús basado en RMDB para prueba Oblicua (overlap) NHTSA EURONCAP, implementando airbag y sin airbag por medio de software CAE para verificar las lesiones en conductor en este tipo de colisiones.

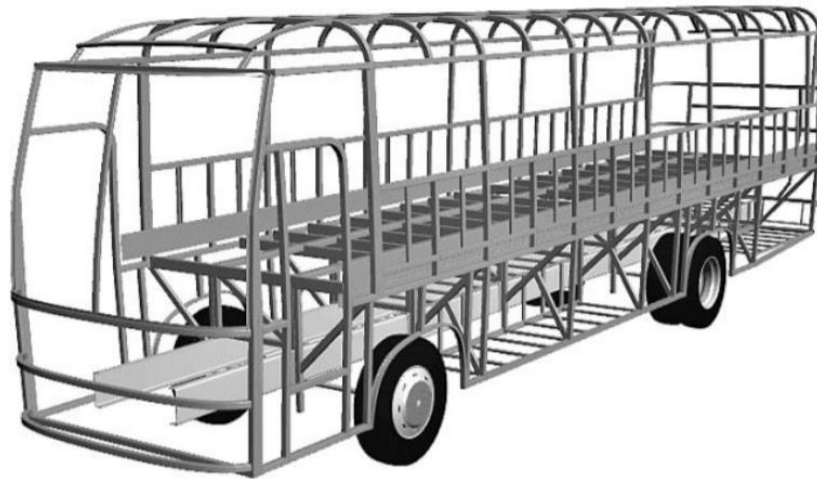
## **1.3 Fundamentación teórica**

### **1.3.1 Estructura del autobús**

#### **1.3.1.1 Estructura General**

Es aquella estructura constituida por varios conjuntos de perfiles de acero como se aprecia en la Figura 1 y planchas metálicas que sirven como soportes rígidos, estos crean un habitáculo para el transporte de personas y toman en cuenta la seguridad de las mismas, siendo la estructura la encargada de poder soportar todo tipo de cargas, entre ellas las dinámicas y las estáticas, teniendo gran importancia durante colisiones, porque al momento en el que estas ocurren toda la carrocería será la encargada de absorber la mayor cantidad de energía posible [15].

Para el diseño estructural también existen otras condiciones de gran importancia, las cuales son las condiciones de cargas dinámicas y las que se va a encontrar sometida en el caso de que se produzca un siniestro, claro es el ejemplo del presente proyecto, donde se mostrará una estructura para un autobús interprovincial que tiene como característica ser más robusta comparada con la de un autobús urbano [15].



**Figura 1:** Estructura del autobús interprovincial [15].

Para que una estructura esté diseñada correctamente debe existir un compartimiento ocupado por los pasajeros y el conductor después de haber soportado un nivel de impacto, considerando todo esto después de la deformación, al cual se llama “espacio residual de supervivencia”, dada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), pero para impactos frontales la reglamentación ecuatoriana no entrega un análisis para este tipo de impactos [16]. En la actualidad se ha desarrollado algunos estudios de impactos frontales por parte de la NHTSA y EURONCAP en donde se identifica las principales lesiones que adquiere el conductor y lo que se podría realizar para reducir dichas lesiones para salvaguardar su vida, entre los ensayos más comunes son el impacto de la carrocería con péndulo y con una barrera fija [7].

### **1.3.1.2 Estructura de la cabina**

Es aquella que se compone de un armazón delantero como se muestra en la Figura 2, el cual cumple la función de soporte inicial que da la fijación a los elementos de la carrocería y a los elementos electrónicos, eléctricos, mecánicos, de seguridad, entre otros. Esta estructura está compuesta de refuerzos frontales de armazón, los cuales



soportarán el panel frontal que entrega una resistencia a colisiones directas, a fuerzas producidas por vientos y lluvias, siendo estos los principales motivos por los que se los construyen de manera reforzada [17].



**Figura 2:** Estructura de la cabina [17].

Existen también refuerzos superiores para parabrisas que dejan el espacio de este y anclajes directos al chasis, en el que se encontrará también el piso de la carrocería en donde el asiento del conductor tiene que estar anclado cumpliendo con ciertos parámetros establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) INEN 1668 que contribuyen en la seguridad del chofer, como el ajuste adecuado para personas con un peso promedio de 70 kg, mandos al alcance de los brazos, recorridos de ajuste entre 400 mm y 550 mm de manera vertical y horizontal hasta 120 mm. También se toma en cuenta la implementación del cinturón de seguridad de 3 puntos y el apoyacabeza, tanto para el asiento del conductor y del alterno, basándose en la NTE INEN 2675 y 2704 [18] .

### **1.3.2 Elementos de seguridad de la cabina**

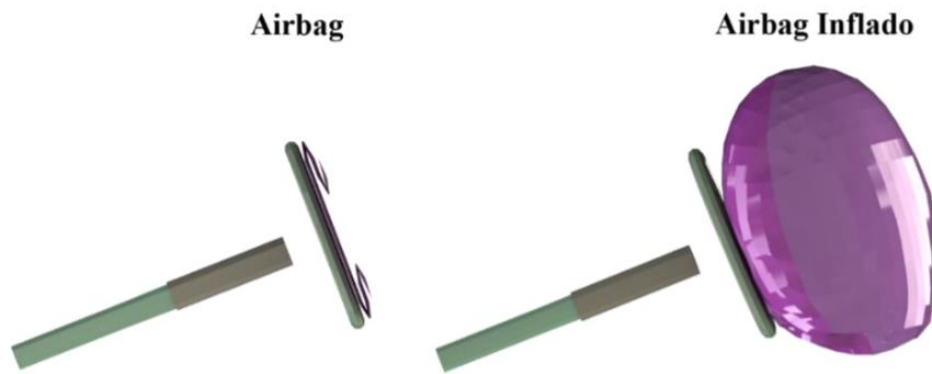
El autobús debe contar con ciertos elementos de seguridad y control establecidos por la NTE INEN 1668 para prevenir y tratar siniestros. La norma establece implementar un dispositivo que indique la velocidad con avisadores sonoros que se activen una vez sobrepasados los 90 km/h, también debe estar disponible el extintor de incendios de fácil desmontaje y en un lugar visible al igual que los triángulos de seguridad, debe existir también un tacógrafo, limitador de velocidad establecida por la NTE INEN 2712 y no debe carecer de rótulos informativos. Por otro lado, debe existir aislamientos y revestimientos en la parte interna de todo el autobús en general, en la parte inferior

del techo, las paredes frontales, laterales y posterior, para la parte de la cabina debe existir un aislante acústico para el motor y también de tipo térmico o retardador de llama [18].

También se debe tomar en cuenta que materiales van a ser utilizados para la parte interna, desde los cojines de los asientos, la tapicería, los forros, las protecciones plásticas de la zona posterior y lateral, también si es el caso el uso de los soportes plásticos, el cinturón de seguridad, otros accesorios como los apoyabrazos y los apoyapiés que se obvia en el caso del conductor, los materiales usados en el techo, el piso, las paredes y aquellos accesorios adicionales como cortinas, tengan una retardación en la propagación del fuego, con índice de llama de hasta 100 mm/min, tomando en cuenta la Organización Internacional de Estandarización ISO 3795 [18].

Por otro lado, en la parte exterior se debe implementar la protección de guardachoques, a aquellos buses que tengan un motor delantero correctamente construidos y equipados, teniendo en cuenta que exista una buena protección en todo el ancho y a los vehículos de categoría M1 y N1 que lleguen a impactarse contra este [18].

Se han realizado estudios en donde se han implementado sistemas de airbags en autobuses, en dónde por lo general se coloca una bolsa de aire en el volante como se observa en la Figura 3Figura 3, con el fin de que se encuentre frente al conductor para poder protegerlo de lesiones durante el choque, pero con ello se debe tomar en cuenta ciertos parámetros como los tiempos de inflado, que según organizaciones encargadas de regular todos los aspectos de seguridades proporcionadas al vehículo, estipulan que deben inflarse en un máximo de 15 ms [16].



**Figura 3:** Disposición de la cabina de un bus [16].

### 1.3.3 Protección dentro de la cabina

Según lo establecido en la NTE INEN 1668, como se nombró anteriormente hay que tomar en cuenta que todos los elementos adicionales implementados en la cabina deben tener baja combustibilidad para reducir la propagación de las llamas, también se debe cumplir los parámetros de unión chasis-carrocería que están presentados en los manuales, tanto de fabricación como de montaje del fabricante del chasis. Por otro lado, existe el sistema eléctrico, cuyas instalaciones deben ajustarse a las indicaciones de los fabricantes del chasis, tomando en cuenta que todos los cables que lleguen a pasar por cualquier orificio no deben de carecer de fijaciones para restringir su movimiento y que el orificio tenga su aislamiento y protección adecuada para que el cable no llegue a romperse [18].

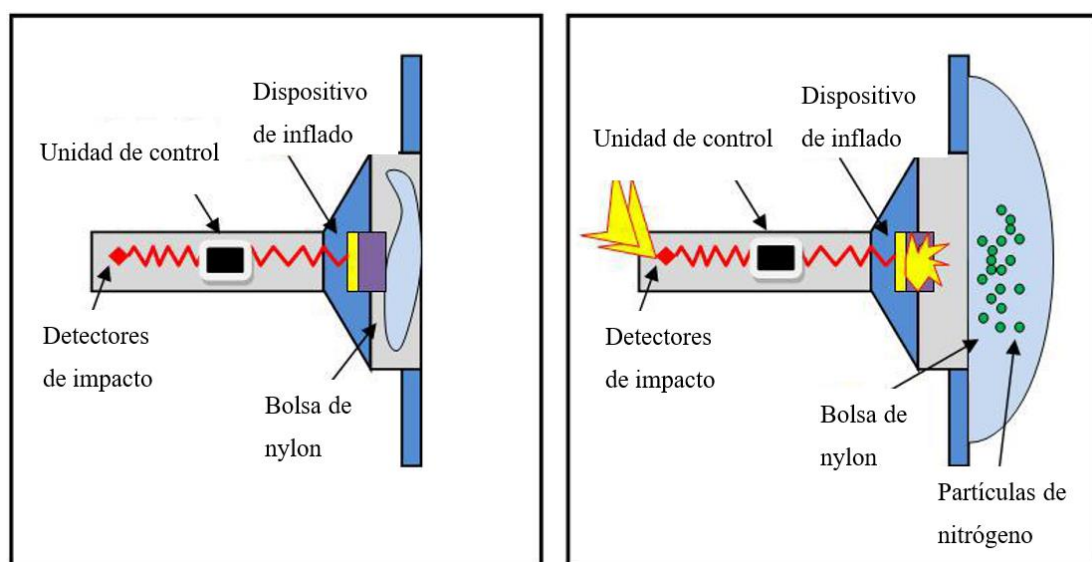
Por otro lado, en la zona del conductor que se aprecia en la Figura 4 se debe medir 1,20 m desde el piso del autobús el ruido, para evitar exceder 88dB, para esto es importante que las puertas y ventanas estén correctamente montadas y cerradas, todo esto cuando el motor esté cumpliendo su giro al 75 % de su máximo de sus rpm, cabe recalcar que este dato es para toda la zona interna en general del autobús. Otro parámetro importante es que dentro de la cabina y del bus en general hay que tomar en cuenta todos los sistemas de climatización necesaria, para tener una temperatura no mayor a los 23 grados centígrados, creando así un confort para todos los ocupantes [18].



**Figura 4:** Zona del conductor [18].

### 1.3.3.1 Airbag

Las bolsas de aire o airbags, son dispositivos de seguridad que se implementan para reducir las lesiones de pasajeros en vehículos en el caso de colisiones graves, ha pasado cincuenta años desde que se comercializo el primer vehículo que implementaba este tipo de mecanismo, en este tiempo se ha desarrollado nuevas tecnologías para mejorar la seguridad en estos componentes. El airbag, permanecen desinfladas, vacías y con un doblez según su diseño principal, pero llegan a inflarse durante un impacto, entonces al realizarse esta acción de forma rápida logran amortiguar la mayor parte de la fuerza de desplazamiento del conductor y ocupantes, logrando así minimizar lesiones, este mecanismo se puede apreciar en la Figura 5, sin obviar otros elementos de seguridad como el cinturón de seguridad [19].



**Figura 5:** Mecanismo de inflado de airbag [20].



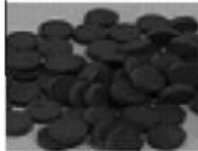

Es considerado como un elemento de seguridad pasivo, apareciendo el 23 de octubre de 1971 patentado por Mercedes Benz, pero su primera instalación en un vehículo fue en 1981. Conforme pasó el tiempo se definió al airbag como aquella bolsa de aire que debe estar compuesta por detectores de impactos, sistemas de inflado y bolsas de nylon en conjunto, considerándose como sistema de seguridad. Por lo general las bolsas son llenadas con nitrógeno producto de alguna reacción química que anteriormente fue estudiada para su implementación. Pero para que un airbag pueda entrar en funcionamiento el vehículo debe estar en una colisión, para ello se han realizado estudios en que la aceleración debe sobrepasar los 3G, y para que las bolsas de nylon logren realizar una amortiguación óptima a los ocupantes del vehículo la ubicación de estas debe ser estratégica [19].

Por lo general, los sitios en donde las bolsas de aire trabajan más son las ventanas laterales, parabrisas, panel de instrumentos y el volante, y únicamente suelen accionarse entre 30 ms a 40 ms, esto puede ser observado en la Figura 6, pudiendo ser a velocidades cercanas a los 300 km/h, pero hay que tomar en cuenta que su desinflado también suele ser veloz, según los fabricantes estas suelen desinflarse en apenas décimas de segundos, pero mucho más despacio. Actualmente, el funcionamiento se basa en la unidad de control que posea, el sistema informático que tenga la capacidad de poder controlar los sensores de acelerómetros, impacto y los de presión, de las velocidades de las ruedas y también de la ocupación de los asientos [19].



**Figura 6:** Despliegue de las bolsas de aire [19].

Tomando en cuenta los sensores nombrados anteriormente, estos deben tener una calibración correcta, en el caso de que se superen los umbrales que están prefijados, la unidad de control encargada de dar la orden al inflado pueda generar el gas propelente para que las bolsas puedan inflarse correctamente. Una vez que las bolsas microperforadas, se hayan inflado correctamente en las zonas en donde se especificó, se podrá amortiguar el impacto y también la presión que tenga el ocupante de los vehículos, al chocar con la bolsa de nylon, obligando al gas que tiene en su interior que se escape de esta lentamente. Por lo general estas bolsas de aire son infladas por la liberación de nitrógeno, generado por el accionamiento de propelentes pirotécnicos, existiendo diferentes tipos, los cuales se muestran en la Figura 7 usadas en varios tipos de bolsas, por ejemplo, la de agujeros radiales de salida de aire [21].

Propellant-A	Propellant-B	Propellant-C	Propellant-D
			
0.105 (g/each)	0.1 (g/each)	0.115 (g/each)	0.106 (g/each)

**Figura 7:** Despliegue de las bolsas de aire [22].

### 1.3.3.2 Tipos de airbags

Con el paso del tiempo los mecanismos de seguridad han ido en evolución, y con unos años se podrán ver diferentes tipos de airbags, pero en la actualidad se tienen algunos existentes en vehículos modernos como [23]:

- a) Airbag lateral: se encuentra en la zona lateral del asiento y se activa con velocidades mayores a los 18 km/h, protegiendo la cadera y el tórax de los impactos en contra de la puerta, ya suele venir instalado en la puerta del conductor o en otros casos en todas [23].
- b) Airbag de cortina: este se caracteriza por su despliegue desde el techo del vehículo, logrando evitar impactos laterales contra las ventanillas y las puertas,

protegiendo así el cuello y la cabeza, teniendo un rango de protección de los asientos traseros y delanteros [23].

- c) Airbag delantero: este es el más utilizado, porque logra la protección del acompañante y del conductor de cualquier choque frontal. En la mayoría de casos esta bolsa de aire llega a activarse a velocidades que sobrepasen los 30 km/h y suele desplegarse desde la mitad del volante y el salpicadero [23].
- d) Airbag trasero: teniendo su ubicación detrás de los apoyacabezas, activándose únicamente en caso de impactos fuertes por la parte posterior del vehículo, protegiendo las partes de la nuca y el cuello generalmente solo va instalado en vehículos de menor tamaño [23].
- e) Airbag cinturón de seguridad: esta bolsa de aire está ubicada en el cinturón de seguridad de los asientos, considerado como sistema de seguridad pasiva de los vehículos. La principal función que tiene este es poder disminuir la presión generada por el cinturón en el pecho, dirigido a personas con baja estatura y a niños. Un dato curioso es que este tipo de airbags ha venido siendo implementado solo en los asientos traseros [23].
- f) Airbag de rodilla: dirigido para el conductor para que durante cualquier impacto las rodillas de este no reciban daños al impactarse contra el salpicadero [23].
- g) Airbag de peatón: se encuentra en el exterior del vehículo y se llega a activar únicamente cuando este choca con un viandante para poder desplegarse desde la parte del motor a la zona exterior alzándose el capó. Dado esto, la función principal que cumple es poder minimizar los daños al peatón producidos por impacto frontal del vehículo, reduciendo daños en la cabeza [23].

### **1.3.3.3 Componentes del airbag**

Las bolsas de airbag están compuestas por varios elementos, en general se divide en externos, internos y otros sistemas de seguridad, esto porque varios de los componentes trabajan sincronizadamente con varios sistemas de seguridad [23]:

- Externos: en esta zona se incluyen los componentes de la bolsa de aire con su cubierta protectora y la columna de dirección [23].
- Internos: se incluyen desde los cables y los conectores, la unidad de impacto con la de control, el generador de gas, los sensores de choque y el de seguridad, el Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas (ASIC), el microprocesador y el almacenador de energía [23].
- Otros: se incluye el delimitador de la potencia del cinturón de seguridad y el tensor [23].

Cabe recalcar que para cada vehículo existe diferentes modelos y componentes de airbags específicos, entonces en el caso de que se requiera alguna restauración se debe comprobar la ubicación, el uso y la función a cumplir la pieza, como se aprecia en la Figura 8. Con los componentes tomados en cuenta y la ubicación de la bolsa de aire, se puede generar un gas compuesto por algunos elementos denominados como químicos-sólidos que como se mencionó anteriormente es el nitrógeno, y puede inflarse también a velocidades desde los 250 km/h. Por lo tanto, el impacto que tiene el cuerpo de un ser humano contra la bolsa de aire debe lograr producir el escape del gas por uno de los orificios, estos orificios suelen ser radiales y pueden ser ubicados en la zona superior de esta. Esto es con el fin de que el impacto pueda ser suavemente y que el pasajero y los ocupantes lleguen a recuperar la visibilidad lo más rápido posible para poder liberarse posteriormente una vez que el airbag haya cumplido su función [23].



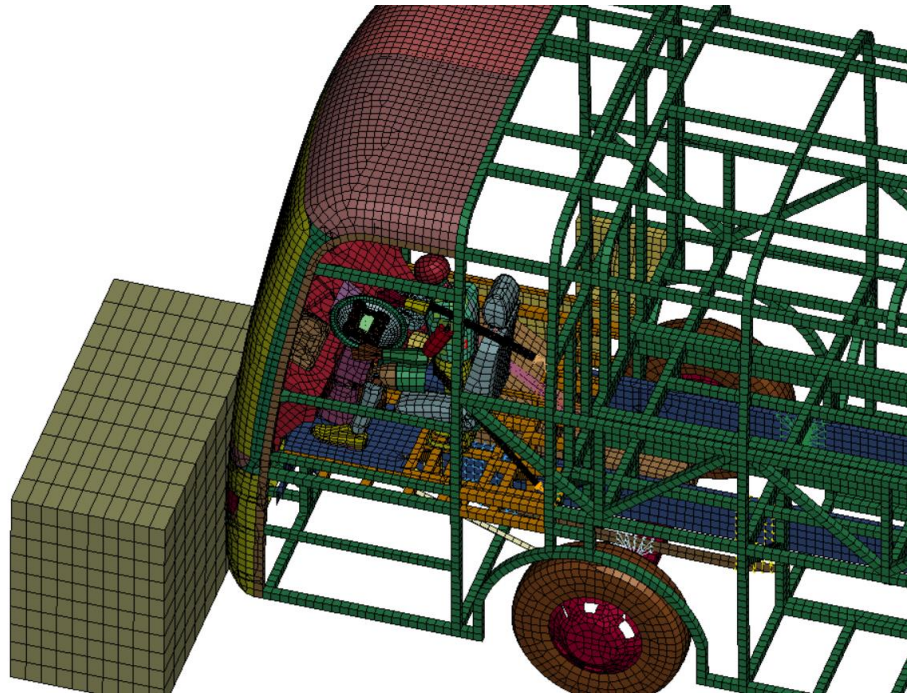


**Figura 8:** Disposición de las bolsas de aire en un vehículo [24].

### 1.3.4 Simulación

#### 1.3.4.1 Autobús con airbag

Para la implementación del airbag en un autobús interprovincial se debe tomar en cuenta varios factores como la ubicación del mismo, cinturón de seguridad, el tipo de bolsa de aire a usar, la forma de accionamiento, la estructura del vehículo, la velocidad de impacto y el tipo de colisión. Para el presente proyecto se realiza dos tipos de impactos, uno completamente frontal y otro oblicuo, en donde se utiliza el airbag para reducir lesiones en el conductor, en este caso el maniquí, el cual me permite verificar 8 criterios de lesiones que serán presentados posteriormente. La bolsa de aire deberá ir ubicada en la zona frontal al conductor, correctamente doblada para que pueda activarse efectivamente como se observa en la Figura 9 [23].



**Figura 9:** Autobús con airbag.

#### **1.3.4.2 Maniquí**

En la comprobación de daños causados por accidentes a ocupantes de vehículos o en otras situaciones, se realizan pruebas de choques en donde se usan maniqués especializados para cada situación, estos son conocidos como dummies, los cuales están constituidos por piel de caucho, un esqueleto de aluminio y varios sensores colocados internamente dentro del cuerpo, estos maniqués por lo general van colocados en los asientos tanto del conductor como del acompañante. Gracias a la implementación de estos maniqués se ha dado paso a una nueva etapa en la seguridad de transporte de personas [25].

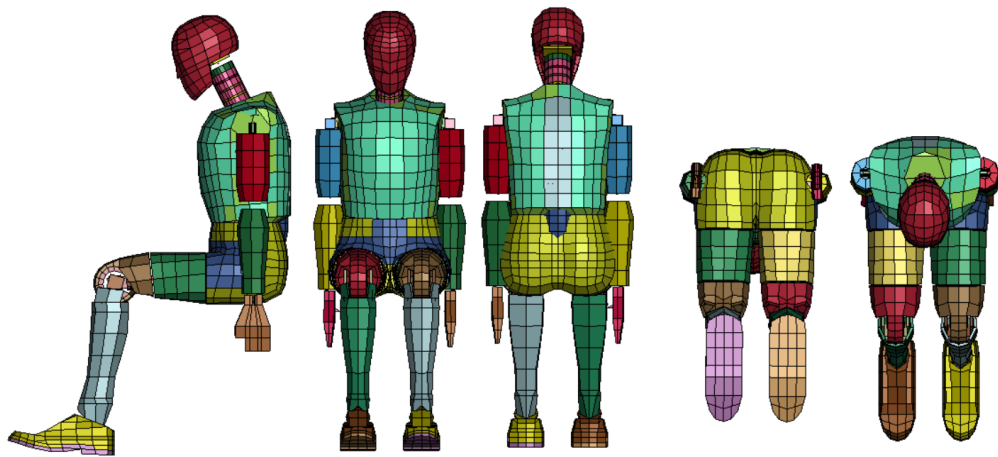
Por lo general, en situaciones reales los dummies se encuentran con ropa para así reducir la fricción ocasionada por el movimiento y los sensores suelen ubicarse en el asiento del conductor en la zona posterior siendo este un ordenador central que ayuda a la recolección de datos. Después de realizar el impacto de algún choque de gran magnitud, los daños más comunes de los maniqués suelen ser los cortes en la piel, pero esta situación aún es extraña debido a que los dummies tienen un diseño óptimo que no permite que estos se rompan, pero después de cada ensayo y análisis, todo cuerpo es revisado, reparado, inspeccionado y pasan por pruebas para poder tener una

certificación nueva, para que este pueda volver a ser usado. Tomando en cuenta estos datos, la mayor parte de ensayos son realizados de forma lateral, debido a varios datos recogidos en donde se determina que los accidentes más comunes son de impactos laterales en donde un vehículo impacta a otro lateralmente, o simplemente de forma frontal contra árboles y otro objeto que se encuentre en el exterior [25].

En el impacto frontal los maniqués, ya cuentan equipados con sensores específicos en la zona de los asientos delanteros, siendo estos cuerpos capaces de recoger toda la intensidad del choque por cada parte del cuerpo e incluso a día de hoy ya están equipados con huesos, siendo los sensores encarados de recoger datos de las lesiones desde la cabeza, el cuello, las rodillas, el pecho, las pelvis y toda la zona inferior de las piernas, siendo estos los principales criterios de lesiones que el maniqué para impactos frontales ofrece a recoger, aproximándose a la realidad en los ensayos de choques [25].

Entonces, el trabajo del dummy es lograr simular el cuerpo humano mientras se produce un impacto mientras este recoge datos que en una persona real no se podría hacer. En todas las pruebas de choques frontales se usa siempre el mismo dummy, denominado como maniqué híbrido III, garantizando resultados en un rango constante, por lo que un maniqué va a estar construido por los materiales que puedan asemejarse toda la fisiología posible que tiene el cuerpo humano, teniendo como ejemplo la espina dorsal que tiene suele estar hecha de capas que van alternadas por varios discos de metal y de ciertos cojines de goma [25].

Estos maniqués han venido dividiéndose en varios tamaños, por lo que se los clasifica por un porcentaje haciendo referencia a los géneros, es decir, que un maniqué de percentil 50, se refiere a un hombre mediano, siendo más grande que la mitad de la población de hombres y más pequeña que la mitad restante. Por lo que este es el maniqué más común encontrado en ensayos de impacto frontal, teniendo como características la estatura de 178 cm y 77 kilogramos, puede ser observado en la Figura 10, por lo general es utilizado para simulaciones en softwares ubicándolo como conductor y obtiene el nombre de Hybrid III porque está basado de las partes de otros maniqués anteriores a este [25].



**Figura 10:** Dummy para las pruebas [25].

Con el fin de tener un análisis que rose la realidad es necesario incluir varios maniqués que tengan la posibilidad de representar varios tamaños, edades y con ello los sexos. Entre estos se encuentra el hombre más grande representado como el 95 percentil de toda la población de adultos masculinos, llegando a medir alrededor de 1.89 m (6 pies y dos pulgadas) pesando 101.15 kg (223 libras). Por otro lado, está el Hybrid III femenino que es mucho más pequeño con las características de 1.52 m de altura (5 pies) y 50 kilos de peso (110 libras). También existen otros dos maniqués que van a representar a los niños con un peso de 21 kg (47 libras) que se trata de niños de 6 años de edad y otro con un peso de 15 kg (33 libras) que va a representar a otro niño de 3 años de edad, como se observa en la Figura 11 [25].



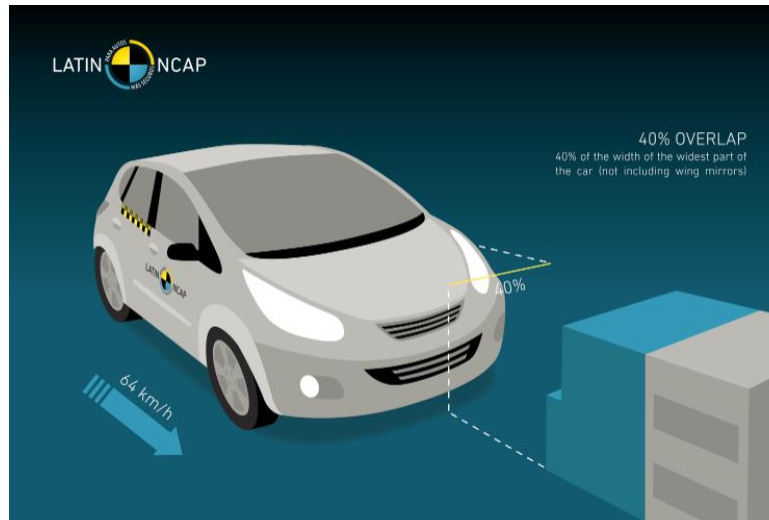
**Figura 11:** Tres tipos de dummies [25].

ANSYS LS-DYNA RESEARCH al ser uno de los softwares más competitivos a la hora de realizar simulaciones, tiene una amplia librería, en la que se encuentran los maniqués Hybrid III, con lo cual ha permitido al ser humano realizar varias simulaciones computacionales evitando así ensayos físicos. Una vez insertado de la librería el maniquí, el usuario tiene la posibilidad de ubicarlo donde desee, sin la necesidad de utilizar ropa, se puede ingresar factores de rozamiento, ubicar en una posición exacta y obtener movimiento durante colisiones si así lo requiere, para posteriormente verificar los resultados en el software que van a ser similares a los ensayos reales de laboratorio [25].

### **1.3.4.3 Barreras**

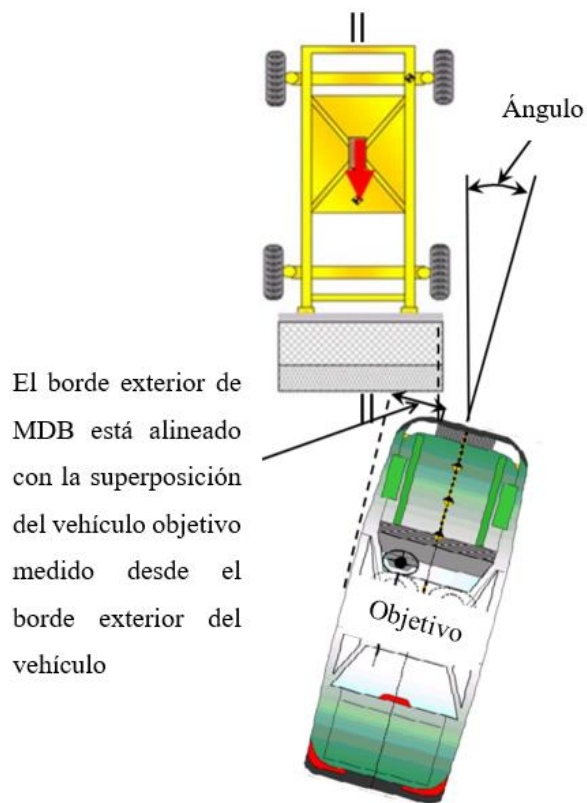
Para realizar la simulación es necesario preparar un área adecuadamente amplia en dónde se pueda ubicar al vehículo y a la barrera, las instalaciones deben estar correctamente ubicadas, tomando en cuenta que, dentro de los 5 metros de la barrera fija, todo el carril sea horizontal, liso y plano. Otro parámetro importante a tomar es la barrera en donde su cara frontal debe consistir en una estructura deformable, que según define el reglamento R94, esta debe ser perpendicular y únicamente puede existir una desviación  $\pm 1^\circ$ , siendo la masa total de la barrera anclada en el suelo, teniendo en cuenta que pueden existir dispositivos adicionales para que su movimiento sea limitado, esto en caso de ensayos reales, pero al momento de utilizar el software es obligatorio verificar que las condiciones de la barrera quede estática [26].

Un parámetro importante de la barrera es la orientación, para ello se toma en cuenta el posible primer contacto que tenga esta con el vehículo, siendo orientada en el lado de la columna de la dirección. Existen dos casos a tomar en cuenta, uno es que en caso de que el volante se encuentre a la derecha o a la izquierda hay que realizarlo en una posición que no sea tan favorable, según lo vaya a determinar los servicios técnicos que hagan este tipo de ensayos. Siguiendo el reglamento la barrera debe ocupar solamente un 40% de la carrocería frontal con un rango de error de  $\pm 20 \text{ mm}$  del lado del conductor, como se presenta la Figura 12 [26].



**Figura 12:** Esquema de la barrera fija respecto al vehículo [27].

Para el siguiente ensayo, es necesario el uso de un limitante para Resultados de Investigación con Barrera Móvil (Results Research Moving Deformable Barrier “RMDB”), la cual debe estar posicionada en frente del vehículo y fijada correctamente con las condiciones de anclaje, mientras que el vehículo debe tener un ángulo de desfase de 15 grados, denominada como simulación de impacto Oblicuo, como se representa en la Figura 13 que está basada por la EURONCAP, que da la condición de que el vehículo debe moverse a 56.3 km/h (35 mph) e impactar con la esquina superior de la zona del conductor, que posteriormente servirá para poder verificar la deformación de la carrocería y las lesiones causadas al maniquí [26].



**Figura 13:** Esquema de la barrera móvil respecto al vehículo [28].

### 1.3.5 Software de simulación. ANSYS LS-DYNA RESEARCH

Es un programa para realizar varias simulaciones, teniendo como propósito general la simulación multifísica realizado por Livermore Software Technology, conocido como LSTC. A día de hoy se considera a ANSYS LS-DYNA RESEARCH como herramienta CAE porque ayuda a integrar varios datos en un vínculo de proceso estructuralmente, siendo esto un habilitador para poder agilizar toda transformación tipo digital en el tiempo que va impulsando la economía de energía, también mejora la seguridad y todo desempeño que haga referencia al diseño moderno y el análisis. Este software abre muchas puertas para el avance de la sociedad, porque al invertir en este programa, se puede hacer ensayos simulados evitando invertir mucho dinero en ensayos físicos [28].



### 1.3.5.1 Principio del Programa

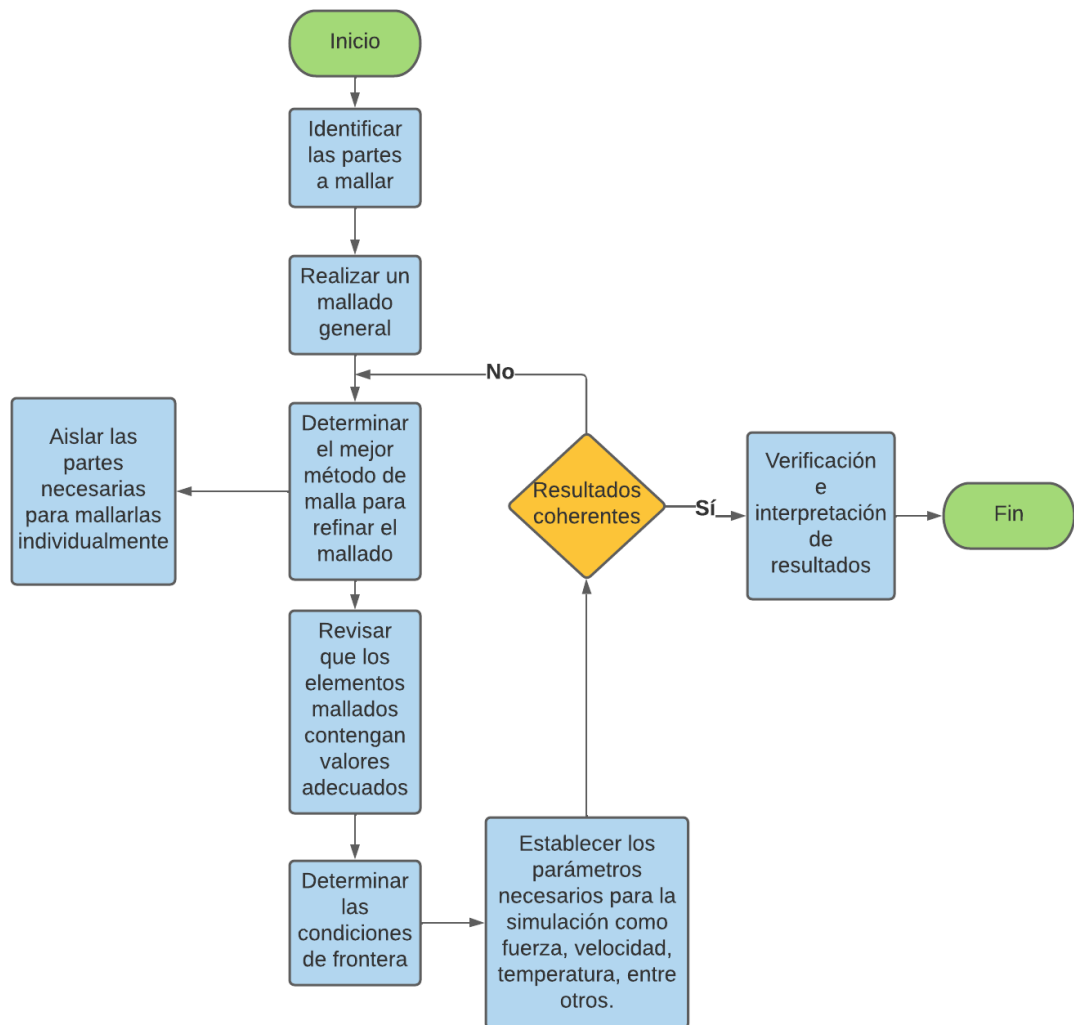
ANSYS LS-DYNA RESEARCH usa principios para un análisis estructural de forma explícita de manera dinámica que no sea lineal, que va a darse de forma simulada sus cargas de impacto, siendo muy útiles para poder evitar costos elevados, porque incluso se tiene varios ensayos de choques en los que se puede analizar las deformaciones para los elementos que son tanto bidimensional como tridimensional, como se representa en la Figura 14, tomando en cuenta el contacto existente en las superficies a analizar, también la tarea que tienen los materiales y las condiciones de límite que ayudan a la adquisición del modelo. Se puede verificar la semejanza existente a un modelo real, todo eso a través de la postpreparación que ayuda a la investigación. Se pueden obtener resultados de velocidades, desplazamiento, aceleraciones, esfuerzos, entre otros [28].



**Figura 14:** Impacto entre vehículo y barrera [28].

Existen varios parámetros importantes a tomar en cuenta para poder hacer un buen uso del programa, para ello es necesario tomar en cuenta los pasos mostrados en la Figura 15. Para obtener buenos resultados, se debe verificar que la generación de la malla esté correctamente realizada, para el caso de análisis tipo dinámicos que son explícitos solamente algunos elementos de la malla llegan a ser soportados por el software, esto se debe a las limitaciones que aun presenta este, pero en caso de realizarse en elementos tipo sólidos se usan las figuras de tetraedros, hexaedros, cubos y pirámides, pero al usar otros elementos como superficies, o denominados también como cascarones solamente se usan cuadrados o triángulos, dependiendo de la geometría. Para el presente proyecto se usó superficies, por lo que usaremos las figuras nombradas anteriormente [28].

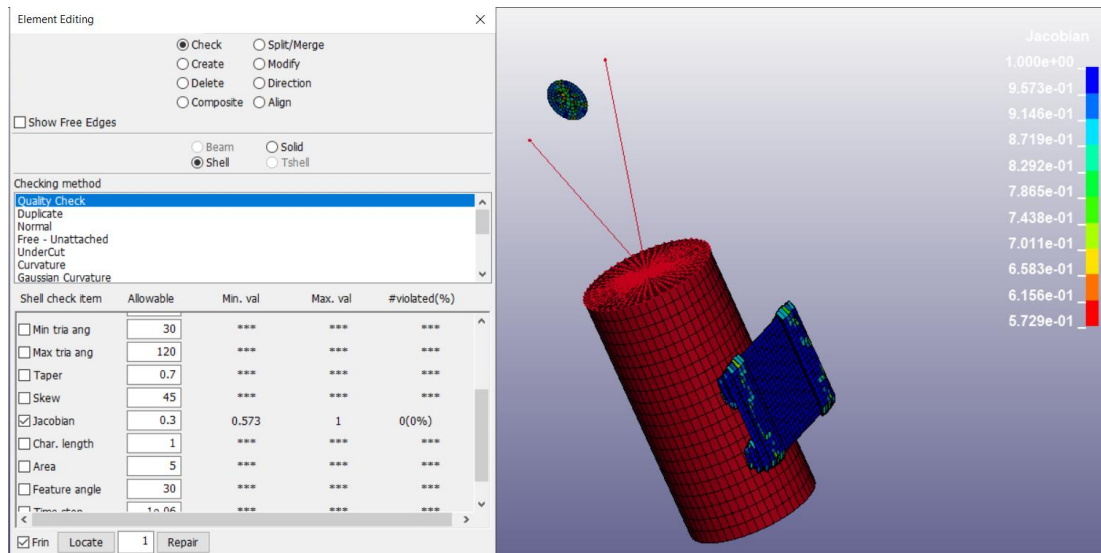




**Figura 15:** Desarrollo del programa.

### 1.3.5.2 Calidad de la Malla

El programa tiene sus recomendaciones generales para una buena generación de malla, siendo de las más importantes la verificación de la ubicación de los nodos en ciertos apoyos, condiciones de las aplicaciones de cargas, velocidades, fricción, etc. Para esta investigación, como se nombró anteriormente, se tomó en cuenta todo elemento que tenga geometrías triangulares y cuadriláteras en su mallado, por lo que se tomó en cuenta el aspect ratio que debe acercarse a 1, 0, y para evaluar la calidad de la malla se va a considerar que está bien realizada cuando el valor se aproxime a 1. Pero también se verifica la calidad de malla mediante el Jacobiano, donde se indica que al tener un valor de 0.3 no existe ningún porcentaje de falla, demostrando que existe un buen mallado, como se muestra con el ejemplo de la Figura 16 [29].



**Figura 16:** Calidad de la malla.

### 1.3.6 Comisión Económica Para Europa Reglamento N° 94

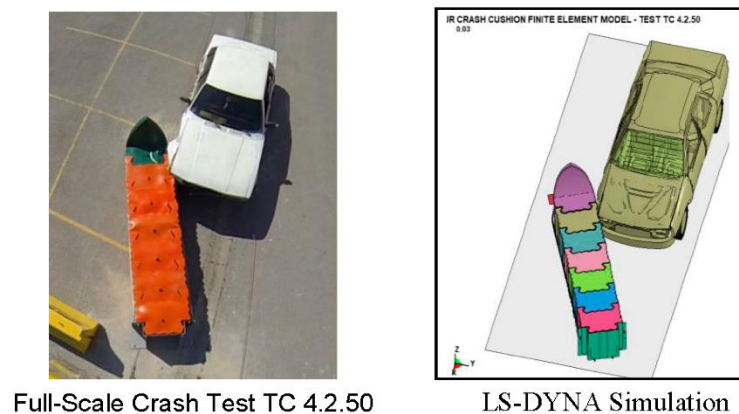
Este es un reglamento de las Naciones Unidas en dónde se encontrarán ciertas indicaciones sobre las homologaciones que deben tener los vehículos referentes a la protección de los ocupantes de estos, durante colisiones frontales. Dicho reglamento se conforma de ámbitos de aplicación, definiciones, solicitud de aplicación, homologación, especificaciones, instrucciones para vehículos con airbag, modificación y la extensión de homologación, conformidad que tiene la producción, las sanciones que existen por no conformidades respecto a la producción, el cese que existe en la producción, la disposición transitoria, los nombres y las direcciones de los servicios tipo técnico para poder realizar ensayos para homologaciones y también de los servicios tipo administrativos [26].

Este reglamento incorpora la comunicación que debe existir para la homologación o retirarla, una denegación y la realización de un paro a la producción de algún tipo de vehículo que tenga que ver con los ocupantes si llega a existir un choque frontal, todo respecto al reglamento R94. Por otro lado, están los ejemplos de la marca de homologación, criterios para su comportamiento, disposiciones e instalaciones de los maniqués y los ajustes para los sistemas de la retención [26]. También se encuentra todo lo respecto a los asientos para los vehículos que tienen motor, ensayos con carros, la técnica usada para la medición de los ensayos referente a las medidas, definición de

la barrera deformable para ensayo, la certificación para las partes de la pierna y el pie que debe tener el maniquí [26].

### 1.3.7 National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)

La Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras fue fundada el 31 de diciembre del año 1970, es considerada como una agencia que depende de Estados Unidos de Norteamérica teniendo lugar en el departamento de transporte de dicho país. Tiene como misión principal salvaguardar la vida de las personas, previniendo las heridas y los accidentes provocados por accidentes de tránsito. Es la encargada de emitir normativas de seguridad a vehículos y todo equipo relacionado con la seguridad de los ocupantes. Esta agencia utiliza el software ANSYS LS-DYNA RESEARCH, validándolo al realizar ciertos ensayos computacionales por el método de elementos finitos, claro es el ejemplo del ensayo de análisis oblicuos por el método de elementos finitos (oblique test data Analysis Method by ANSYS LS-DYNA RESEARCH Modeling), que es uno de los ensayos propuestos para el presente proyecto, el cual presenta un modelo numérico que puede ser útil para el desarrollo de restricciones óptimas necesarias en varios modos de impactos, como se aprecia en la Figura 17 [30].



**Figura 17:** Generación del modelo [31].

### 1.3.8 EURONCAP

Es considerado como un programa para la seguridad de los automóviles, teniendo el apoyo de algunos países europeos, gran parte de los fabricantes más importantes y otras organizaciones que se relacionen con la automoción de gran parte del mundo,

con este programa se ha logrado conseguir una mejora y mejor clasificación de las carreteras, siendo este uno de los proyectos relacionados con EURORAP. Tiene como objetivo principal dar una valoración mediante tests de normativas a la seguridad de todos los vehículos que se disponen en los mercados con una cantidad de estrellas, siendo una estrella la calificación más baja con un protección de colisiones muy baja, dos estrellas significa que le falta tecnología para la prevención de colisiones, tres estrellas tiene una buena protección para todos los ocupantes pero igualmente le falta tecnología, cuatro estrellas tiene un rendimiento ya generalizado y puede tener tecnología para poder prevenir colisiones, mientras que cinco estrellas es la calificación más alta con un excelente rendimiento en choques y un buen equipamiento de tecnología sólida para la prevención de las colisiones, esto siendo puntuado con ensayos reales como se muestra en la Figura 18 [32].



**Figura 18:** Representación del impacto de un vehículo [32].

## **1.4 Hipótesis**

En la colisión frontal del autobús el airbag produce lesiones sobre el conductor.

### **1.4.1 Señalamiento de variable de la hipótesis**

#### **1.4.1.1 Variable Independiente**

Colisión frontal.

#### **1.4.1.2 Variable Dependiente**

Lesiones producidas por el airbag al conductor del autobús.

#### **1.4.1.3 Término de relación**

Producen

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1 Nivel o tipo de investigación**

##### **2.1.1 Investigación bibliográfica**

Entendemos por investigación bibliográfica la etapa de la investigación científica en la que se explora la producción de la comunidad académica sobre un tema determinado. Implica un conjunto de actividades destinadas a localizar documentos relacionados con un tema o autor específico.

La presente investigación tiene carácter bibliográfico, porque la información necesaria se basa en normas que describen los parámetros necesarios para el estudio.

##### **2.1.2 Investigación explorativa**

La investigación exploratoria es un tipo de investigación que se utiliza para estudiar un problema que no está claramente definido, por lo que se realiza para comprenderlo mejor, pero sin aportar resultados concluyentes.

##### **2.1.3 Investigación descriptiva**

Se establece este tipo de investigación debido a que se efectúa una representación completa de parámetros dentro de cada una de las propiedades, además se estiman características de las poblaciones, necesarias para un análisis completo de respuestas y factores de entrada.

Tiene como finalidad definir, clasificar, catalogar o caracterizar el objeto de estudio siendo fundamental para la comprensión de los parámetros para la aplicación del método con las variables de entrada y de salida.

##### **2.1.4 Investigación explicativa**

La investigación explicativa es aquel tipo de estudio que explora la relación causal, es decir, no sólo pretende describir o abordar el problema investigado, sino que trata de encontrar sus causas.

En el presente documento, se analizan los efectos del airbag del conductor en una colisión frontal, sobre el propio conductor.

## **2.2 Población y muestra**

### **2.2.1 Población**

Modelos de autobuses interprovinciales de la empresa MIRAL.

### **2.2.2 Muestra**

Autobús interprovincial clase III.

## **2.3 Recursos**

### **2.3.1 Recursos humanos**

El proyecto experimental estará a cargo del autor y del docente tutor quien direccionará al tutorado durante el desarrollo del tema de investigación.

**Estudiante:** Diego Hernán Acosta Ramón

**Docente tutor:** Mg. Ing. César Arroba

### **2.3.2 Recursos institucionales**

- Universidad

La Biblioteca de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con lo cual se podrá reunir literatura científica necesaria para el proyecto.

### **2.3.3 Recursos materiales**

Consta de los medios que se utilizarán para el desarrollo y simulación del estudio:

- Computador.
- Internet.
- Software: Microsoft Office, ANSYS LS-DYNA RESEARCH, SolidWorks.

- Normas Nacionales e Internacionales.
- Biblioteca física y virtual.

#### 2.3.4 Recursos económicos

Para el presente proyecto se utilizaron los recursos mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Recursos económicos del proyecto.

<b>DETALLE</b>	<b>COSTO</b>
Internet	\$100
Normas Técnicas y libros	\$300
Software: Microsoft Office, ANSYS LS-DYNA RESEARCH, SolidWorks.	-
Impresiones	\$150
Capacitaciones	\$200
<b>Total</b>	<b>\$750</b>



## 2.4 Operacionalización de variables

La operacionalización de variables se lleva a cabo en la Tabla 2 y en la Tabla 3.

### 2.4.1 Variable Independiente

Colisión frontal

**Tabla 2:** Variable independiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
El ensayo son colisiones frontales en los que se simula choques de un autobús a 30 km/h con una barrera fija y a 56.33 km/h (35 mph) con una barrera móvil, ubicando al maniquí híbrido III como chofer,	Colisión totalmente frontal.	Impacto frontal de autobús basado en R94 CEPE 40% ODB Frontal.	Se realiza 3 impactos totalmente frontales de autobús contra una barrera fija que cubre el 40% de la carrocería a 30 km/h. El primero sin el uso del airbag y los siguientes con airbags tipo A y B, usando	Simulación mediante el método de elementos finitos.

<p>realizando dos impactos totalmente frontales y dos oblicuos con un ángulo de desfase de 15 grados, tomando en cuenta la ubicación y el</p>			<p>correctamente el maniquí híbrido III como conductor.</p>	
<p>accionamiento de un airbag que permita reducir lesiones en el maniquí.</p>	<p>Colisión frontal oblicua.</p>	<p>Impacto frontal de autobús basado en RMDB para prueba Oblicua (overlap) NHTSA EURONCAP.</p>	<p>Se realiza 3 impactos frontales oblicuos de autobús contra una barrera móvil con un ángulo de desfase de 15° a 56.33 km/h (35 mph). El primero sin el uso del airbag y los siguientes con airbags tipo A y B, usando correctamente el maniquí híbrido III como conductor.</p>	

## 2.4.2 Variable Dependiente

Lesiones producidas por el airbag al conductor del autobús.

**Tabla 3:** Variable dependiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Los criterios de comportamiento del maniquí con respecto al airbag, tendrán que analizarse 8 criterios a condición que ninguno sobrepase los límites establecidos por el reglamento dado, para contribuir a la protección del conductor durante choques frontales.	Criterios de lesiones en maniquí de pruebas de impacto Híbrido III.	Cabeza	No superar el valor de HIC de 1000.	Reglamento R94 (CEPE) Análisis por elementos finitos mediante observación en el programa.
		Lesión del cuello	No debe exceder los valores de la gráfica tensión vs tiempo del reglamento.	
		Severidad en el pecho	No superar el valor de CSI de 1000.	
		Tórax	No debe exceder 42 mm de compresión.	
		Fémur	No debe exceder el criterio expresada en curva de fuerza vs tiempo del reglamento.	

		Fuerza de compresión en la tibia	No debe exceder 8 KN.	
		Rodilla	El movimiento de rodilla deslizante no debe exceder 15 mm.	
		Criterio de lesión cerebral.	Los valores no deben sobrepasar la unidad.	
	Calidad de la malla	Jacobiano	Valores entre 0.3 y 0.6.	Volumen 1 del manual de ANSYS LS-DYNA RESEARCH.

## 2.5 Plan de recolección de información

El plan de recolección de la información se detalla en la Tabla 4.

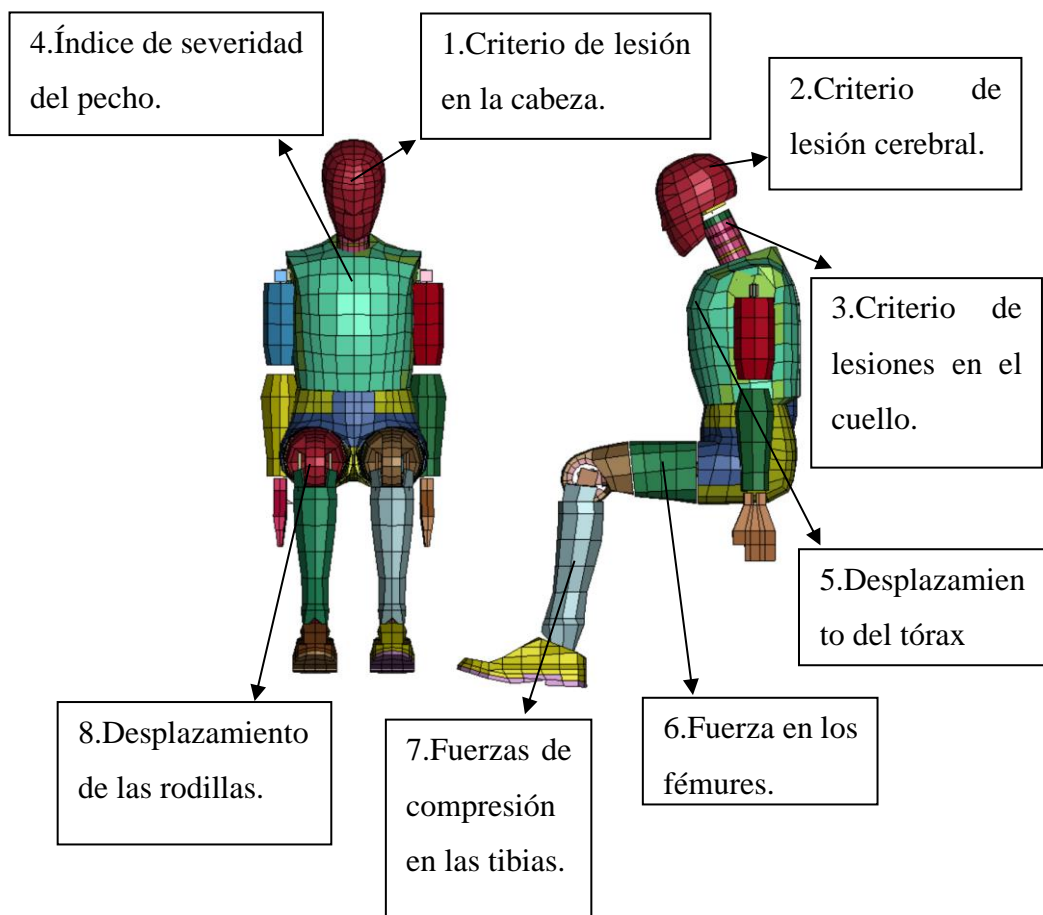
**Tabla 4:** Plan de recolección de información.

<b>Plan de recolección de información</b>	
<b>¿Qué?</b>	Datos del modelo a simular, detalles y características de componentes.
<b>¿Para qué?</b>	Modelar mediante CAD el autobús, simular el modelo de airbag, simular condiciones de impacto.
<b>¿Quién?</b>	La recolección de información es realizada por el investigador.
<b>¿A quién?</b>	Está dirigido a estudiantes y docentes que necesiten una base bibliográfica y un aporte al sector industrial productor de carrocerías.
<b>¿Cómo?</b>	Se recolecta la información mediante bases de datos, basados en normativas.
<b>¿Con qué?</b>	Para obtener la información se emplean hojas de cálculo, editor de texto y bibliografía.
<b>¿Cuándo?</b>	Se ejecuta en el año 2022.
<b>¿Cuántas veces?</b>	La simulación se efectúa una única vez bajo las condiciones descritas.
<b>¿Dónde?</b>	La recolección de información es realizada en la empresa.

## 2.6 Procedimiento

### 2.6.1 Criterio de lesiones del maniquí

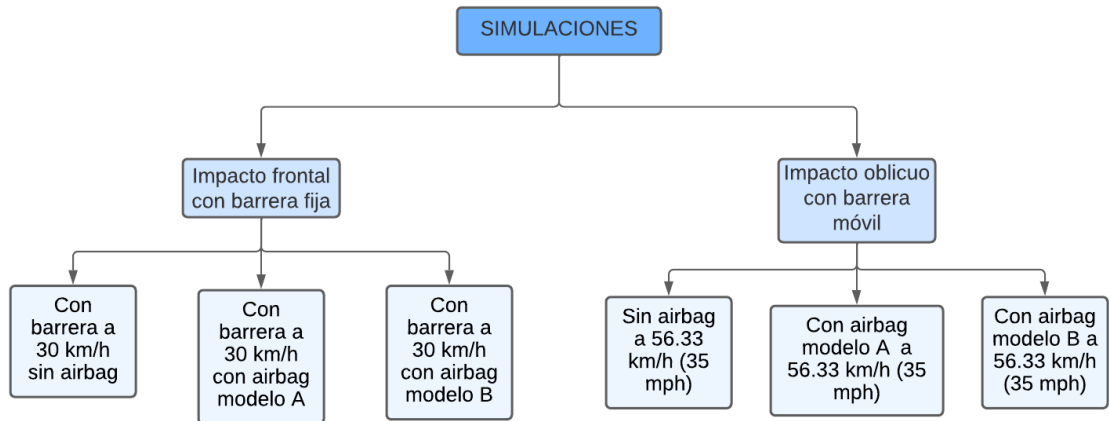
Para hacer las mediciones de las lesiones del maniquí, se tomó en cuenta los criterios dados por la normativa, que son el criterio de lesión la cabeza, de lesión cerebral, de lesiones en el cuello, índice de severidad en el pecho, desplazamiento del tórax, fuerza de los fémures, fuerzas de compresión de las tibias y desplazamiento de las rodillas, mismas que se pueden observar en la Figura 19.



**Figura 19:** Criterios de lesiones del maniquí.

## 2.6.2 Simulaciones

Para la realización de las simulaciones hay que tomar en cuenta los dos tipos de impacto frontal y las condiciones que estos tienen, siendo representado en la Figura 20.



**Figura 20:** Esquema de las simulaciones.

### 2.6.2.1 Simulación de impacto frontal con barrera

El reglamento CEPE R94 establece que se debe usar una barrera fija con las dimensiones de: 1000 mm de ancho, 650 mm de alto y 450 mm de profundidad, como se muestra en la Figura 21, esto para vehículos livianos de clase M1, para posteriormente verificar índices de lesiones provocados en colisiones frontales, siendo este impacto representado con un autobús en la Figura 22.





grados según lo indicado por James Saunders y Matthew J. Craig [28], como se puede observar en la Figura 23. El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento del sistema de airbag al producirse un impacto de tipo oblicuo en el cual el maniquí de impactos podría perder contacto con el airbag debido a fuerzas laterales producidas en la colisión, con los parámetros dados en la Tabla 5.



**Figura 23:** Procedimiento de simulación de impacto oblicuo con barrera móvil producido en el conductor.

**Tabla 5:** Condiciones de la simulación de impacto oblicuo.

Condición	Valor/cantidad	Observación
Velocidad de impacto	56.33 km/h (35 mph)	
Peso del carro	2500 kg	
Cinturones de seguridad	3 puntos	
Peso del modelo total	14573.2 kg	Carro + bus+ maniquí

### 2.6.3 Modelado CAD del vehículo

El vehículo se modeló mediante el software SolidWorks respecto a las medidas indicadas en la Tabla 6, estas fueron proporcionadas por el fabricante de carrocerías las cuales cumplen los requisitos de las normativas nacionales para la construcción de este tipo

de vehículos y que representan un modelo real que se construye y se comercializa en el país.

Para realizar la simulación, se preparó la geometría del vehículo en modelo de superficies, empezando por el armazón delantero, seguido por la zona estructural superior y central usando medidas dadas por el fabricante, después el armazón posterior, luego la zona de los maleteros, los anclajes de la estructura hacia el chasis y finalmente las autopartes que tengan interacción con el conductor, obteniendo como modelo final el modelo presentado en la Tabla 7.

**Tabla 6:** Descripción del modelo de la empresa MIRAL a simular.

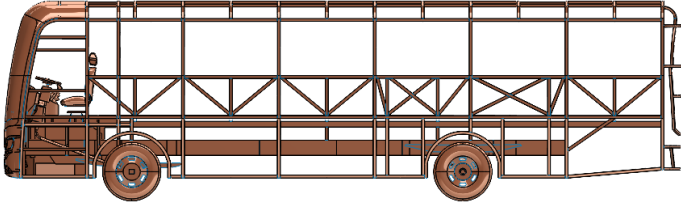
No.	Tipo de parámetro	Dimensión (mm) /Característica	Norma/referencia
<b>Dimensiones generales</b>			
1	Tipo de chasis	Chasis Motorizado	NTE INEN 2656
2	Marca chasis	Hino AK8JRSA	
3	Tipo de servicio de Autobús	Interprovincial	NTE INEN 1668
4	Largo	12066	NTE INEN 1668
5	Ancho	2056	NTE INEN 1668
6	Alto	3700 Incluido A/C	NTE INEN 1668
7	Distancia entre ejes	5800	NTE INEN 1668
8	Voladizo delantero	2444	NTE INEN 1668
9	Voladizo posterior	3822	NTE INEN 1668
10	Altura del piso al primer peldaño	450 Se incluye escalón retráctil	NTE INEN 1668
11	Numero de puertas	1	NTE INEN 1668
12	Altura de la puerta	2290	NTE INEN 1668
13	Ancho libre de puerta	1000	NTE INEN 1668
14	Altura del pasillo	1950	NTE INEN 1668
15	Altura del piso al borde de la ventana	750	NTE INEN 1668

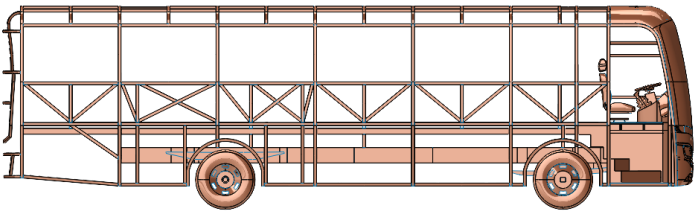
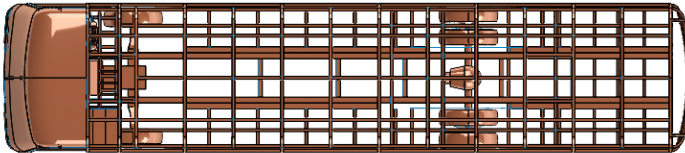
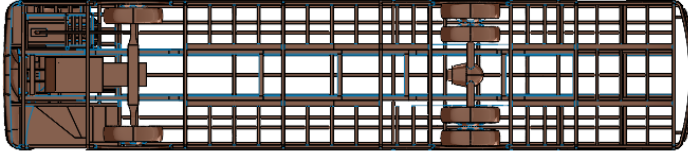
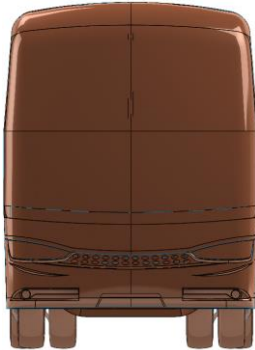
<b>No.</b>	<b>Tipo de parámetro</b>	<b>Dimensión (mm) /Característica</b>	<b>Norma/referencia</b>
16	Atura de cajuelas	1040	NTE INEN 1668
17	Tipo de portaequipajes	Compartimientos cerrados independiente de la cabina de los pasajeros, con acceso por la parte externa del vehículo, para el transporte de equipaje de los pasajeros.	NTE INEN 1668
18	Alto de las ventanas	950	NTE INEN 1668
19	Ancho de ventanas	1630	NTE INEN 1668
20	Altura del parabrisas	Frontales: 1900 Posterior: 760	NTE INEN 1668
21	Altura de faros	1000	NTE INEN 1155
22	Tipo de mascarilla	Abatible, neumática	NTE INEN 1668
23	Distancia de la parte más saliente del chasis a frente y posterior del autobús	Frente: 100 Posterior: 2370	NTE INEN 1668
24	Tipo de tablero de instrumentos	En fibra de vidrio, ergonómico	NTE INEN 1668
25	Tipo de gradas de ingreso de pasajeros	Estructura tubular que conforma una caja indeformable, en acero galvanizado	NTE INEN 1668
26	Tipo de cabina del conductor	Estructura tubular con forro de acero galvanizado	NTE INEN 1668
27	Tipo de asiento del conductor	Tipo ergonómico, regulable en los planos vertical y horizontal (longitudinal), deberá estar ubicado frente al panel de conducción.	NTE INEN 1668 NTE INEN 2704

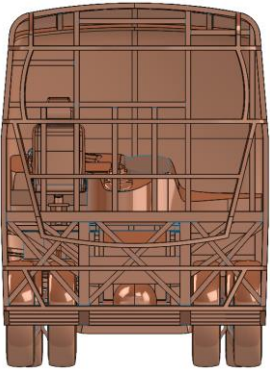
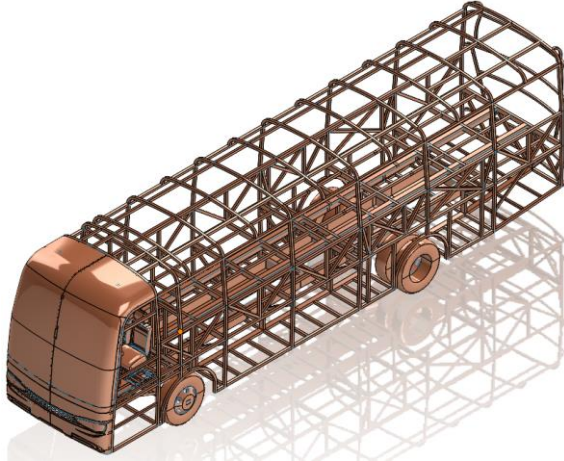
No.	Tipo de parámetro	Dimensión (mm) /Característica	Norma/referencia
28	Tipo de asiento del acompañante	N/A	N/A
29	Tipo de cinturones de seguridad del conductor	Tipo ergonómico, regulable	NTE INEN 1668 NTE INEN 2704
30	Tipo de asientos de pasajeros	Tipo ergonómico	NTE INEN 1668
31	Tipo de dispositivo de aire acondicionado	Equipo de Aire Acondicionado sobre el techo de bus	

Las partes que se consideraron para el modelo fueron las que proporcionan resistencia estructural considerable y también se toman en cuenta las autopartes que podrían tener un contacto e interacción con el conductor al momento de la simulación de impacto, estas partes son: estructura del autobús, asiento del chofer, chasis y sus autopartes más importantes, tablero de instrumentos, protecciones frontales (mascarilla, frente techo del chofer) y parabrisas [15]. Esta simplificación del modelo se realizará para tener un modelo eficiente con el que se tenga resultados confiables y en poco tiempo de simulación representada en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Modelo 3D de estructura de autobús de la empresa MIRAL.

Figuras	Descripción
	Vista lateral derecha, perfiles cuadrados armados para ventanas, techo y portaequipajes.

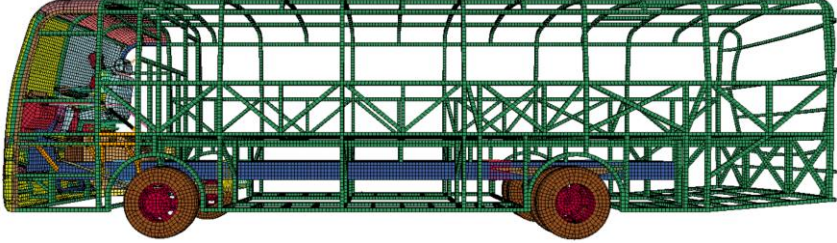
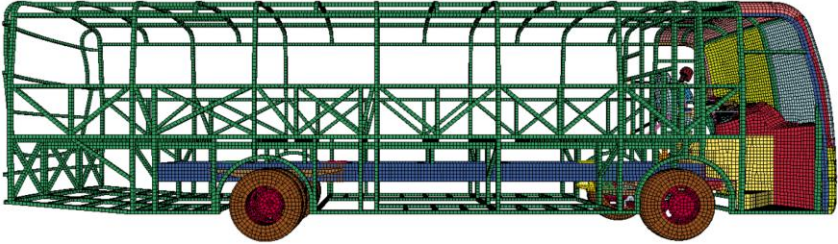
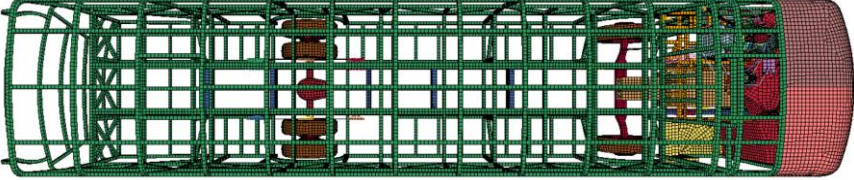
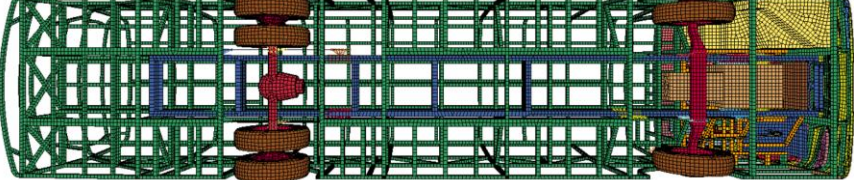
	<p>Vista lateral izquierda, perfiles cuadrados armados para ventanas, techo, portaequipajes, gradas y cabina del conductor.</p>
	<p>Vista superior, perfiles cuadrados armados para techo.</p>
	<p>Vista inferior, chasis ensamblado a la carrocería.</p>
	<p>Vista frontal, armazón delantero con superficie para cabina del conductor.</p>

	<p>Vista posterior, armado de perfiles para armazón trasero.</p>
	<p>Vista isométrica, estructura de bus completa para mallado.</p>


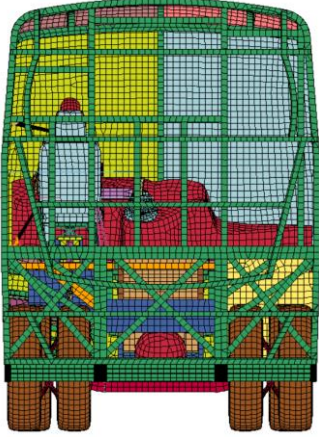
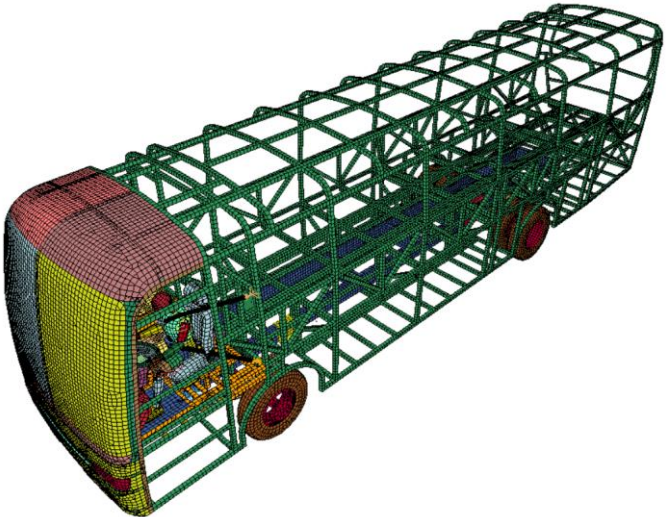
#### 2.6.4 Malla del modelo

Para el presente estudio se generó varios modelos de malla que contienen elementos tipo cuadriláteros y triangulares de 50 mm de tamaño en base del modelo CAD, como se muestra en la Tabla 8, con el objetivo de seleccionar un modelo que sea liviano de gasto computacional bajo con índices de calidad de malla aceptables, con esto se asegura tener un control de estabilidad en los resultados aún si se tiene un número elevado de elementos y nodos, los cuales se contabilizan en la Tabla 9. Se incluyó una unión compartida de todos los nodos para representar una soldadura entre cada uno de los componentes estructurales, para que exista una unión de mallado con el tablero y el asiento del conductor con la estructura de la carrocería descartando conexiones de pernos.

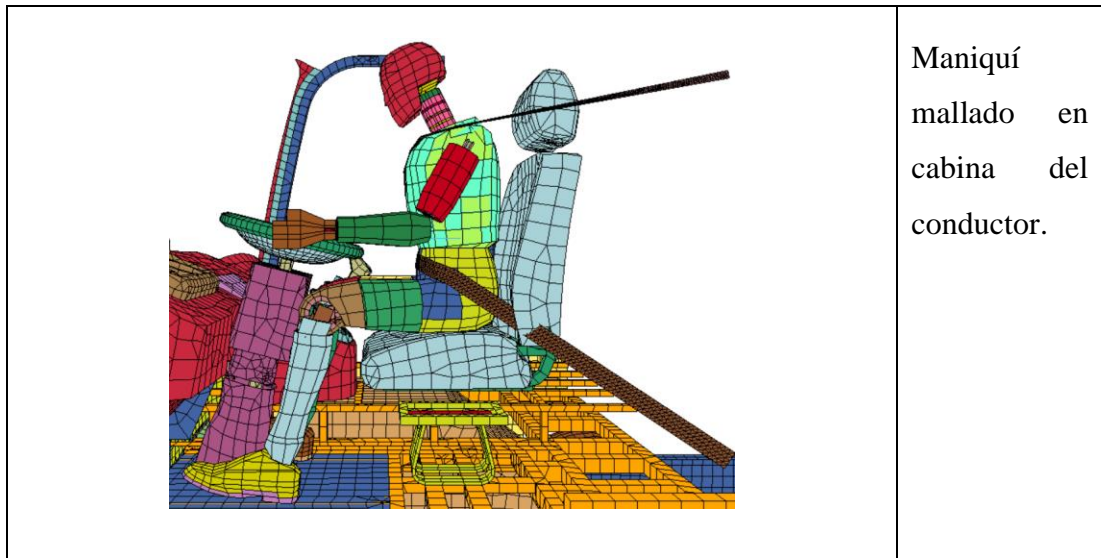
**Tabla 8:** Vistas del modelo mallado en ANSYS LS-DYNA RESEARCH.

Figuras	Descripción
 A 3D wireframe mesh of a bus chassis, viewed from the right side. The frame is primarily green, with wheels shown in brown and red. The front of the bus is on the left, and the rear is on the right.	Mallado vista lateral derecha.
 A 3D wireframe mesh of a bus chassis, viewed from the left side. The frame is primarily green, with wheels shown in brown and red. The front of the bus is on the right, and the rear is on the left.	Mallado vista lateral izquierda.
 A 3D wireframe mesh of a bus chassis, viewed from the top. The frame is primarily green, with wheels shown in brown and red. The front of the bus is on the right, and the rear is on the left.	Mallado vista superior.
 A 3D wireframe mesh of a bus chassis, viewed from the bottom. The frame is primarily green, with wheels shown in brown and red. The front of the bus is on the right, and the rear is on the left.	Mallado vista inferior.



 <p>A 3D wireframe mesh of a bus, viewed from the front. The mesh is colored in various sections: light blue on the left side of the hood, yellow on the right side, and a pink horizontal band across the front. The wheels are brown.</p>	<p>Mallado vista frontal.</p>
 <p>A 3D wireframe mesh of a bus, viewed from the rear. The mesh is colored in various sections: green on the rear panel, yellow on the side, and red on the interior seats. The wheels are brown.</p>	<p>Mallado vista posterior.</p>
 <p>A 3D wireframe mesh of a bus, viewed from an isometric perspective. The mesh is colored in various sections: green on the main body, yellow on the side, and red on the interior seats. The wheels are brown.</p>	<p>Mallado vista isométrica.</p>





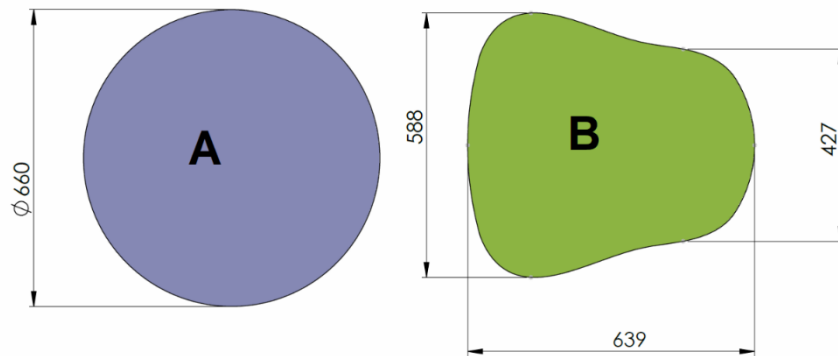
**Tabla 9:** Características de malla del modelo de simulación.

<b>Propiedad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>o</b>	<b>Observaciones</b>
	<b>Característica</b>		
Número de elementos	87724		Dado en impacto frontal de bus + maniquí + barrera
Número de nodos	100197		
Número de elementos	95150		Dado en impacto frontal de bus + maniquí + airbag A + barrera
Número de nodos	94332		
Número de elementos	93640		Dado en impacto frontal de bus + maniquí + airbag B + barrera
Número de nodos	100198		
Número de elementos	140925		Dado en impacto oblicuo de bus + maniquí + carro impactador
Número de nodos	150783		

Número de elementos	148311	Dado en impacto oblicuo de bus + maniquí + airbag A + carro impactador
Número de nodos	144917	
Número de elementos	146841	Dado en impacto oblicuo de bus + maniquí + airbag B + carro impactador
Número de nodos	150775	
Longitud de elementos max	50 mm	
Índice de jacobiano min	0.4	
Tipos de elementos	Shell 2D quadrilateral and triangular	Se utilizó este tipo malla debido a que es la más óptima para las simulaciones, porque se tiene la menor cantidad de elementos y nodos con la mejor calidad de malla controlada.

### 2.6.5 Sistema de airbag

Se utilizaron dos modelos de airbags, los cuales son representados en la Figura 24, esto se realizó para seleccionar el mejor diseño y así implementar el más óptimo que reduzca las lesiones en el conductor dadas en las 2 condiciones de simulaciones realizadas en este proyecto.

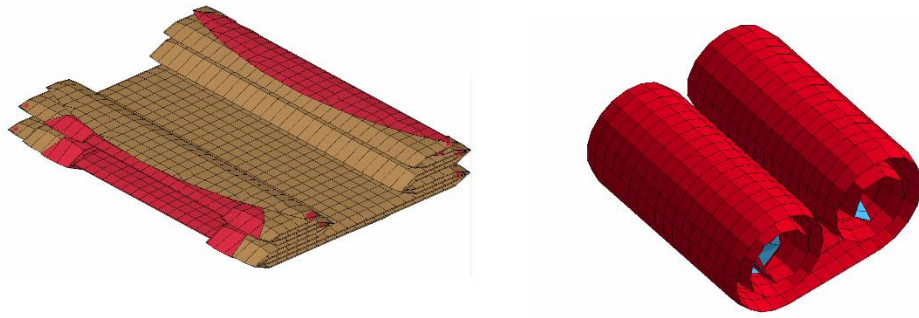


**Figura 24:** Dimensiones de modelos de airbags extendidos implementados en las simulaciones, Airbag A izquierda, Airbag B derecha.

El modelo A representa el airbag con diseño estándar utilizado en vehículos implementados en el conductor según el autor Zi Lu and Philemon Chan. [33], mientras que el diseño B es un modelo propio que se propone que tendrá un mayor alcance a partes vitales del conductor como el pecho, cuello y cabeza y también se desea optimizar el material utilizado para la fabricación, debido a las características mencionadas anteriormente el modelo cuenta con curvas pronunciadas y secciones más amplias que otras. [33].

### 2.6.6 Doblado de airbags.

El modelo de airbag de tipo A cuenta con los dobleces indicados en la investigación de Zi Lu and Philemon Chan. [33], mientras que el modelo B cuenta con 3 dobleces laterales a cada lado y dos dobleces espirales en el centro, dejando un modelo de airbag plegado con un área de  $0.06 \text{ m}^2$ , como se representa en la Figura 25, mismos que serán ensamblados en el interior del volante [33].



**Figura 25:** Airbags doblados, izquierdo airbag tipo A, derecho airbag B.

Se utilizó la carta de control mostrada en la Figura 26 de tipo AIRBAG\_WANG\_NEFSKE con las siguientes características:

Keyword Input Form

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 P5 peso 20 Kg.k)

\*AIRBAG\_WANG\_NEFSKE\_ID (1)

ID	TITLE							
1								
2	<b>SID</b>	<b>SIDTYP</b>	<b>RBID</b>	<b>VSCA</b>	<b>PSCA</b>	<b>VINI</b>	<b>MWD</b>	<b>SPSF</b>
	2	1	0	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0
3	<b>CV</b>	<b>CP</b>	<b>I</b>	<b>LCT</b>	<b>LCMT</b>	<b>TVOL</b>	<b>LCDI</b>	<b>IABT</b>
	1023.0000	1320.0000	781.90002	0	6000040	0.0	0	0.0
4	<b>C23</b>	<b>LCC23</b>	<b>A23</b>	<b>LCA23</b>	<b>CP23</b>	<b>LCCP23</b>	<b>AP23</b>	<b>LCAP23</b>
	1.0000000	0	0.0	6000041	1.0000000	0	0.0	0
5	<b>PE</b>	<b>RO</b>	<b>GC</b>	<b>LCEFR</b>	<b>POVER</b>	<b>PPOP</b>	<b>OPT</b>	<b>KNKDN</b>
	1.013e-04	1.000e-09	1.0000000	0	0.0	0.0	1	0
6	<b>IOC</b>	<b>IOA</b>	<b>IVOL</b>	<b>IRO</b>	<b>II</b>	<b>LCBF</b>		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0		

**Figura 26:** Ingreso de propiedades del airbag al programa. Unidades mm ms kg.

Dónde:

RO: Densidad.

EA y EB: Módulo de Young.

GAB: Módulo cortante.

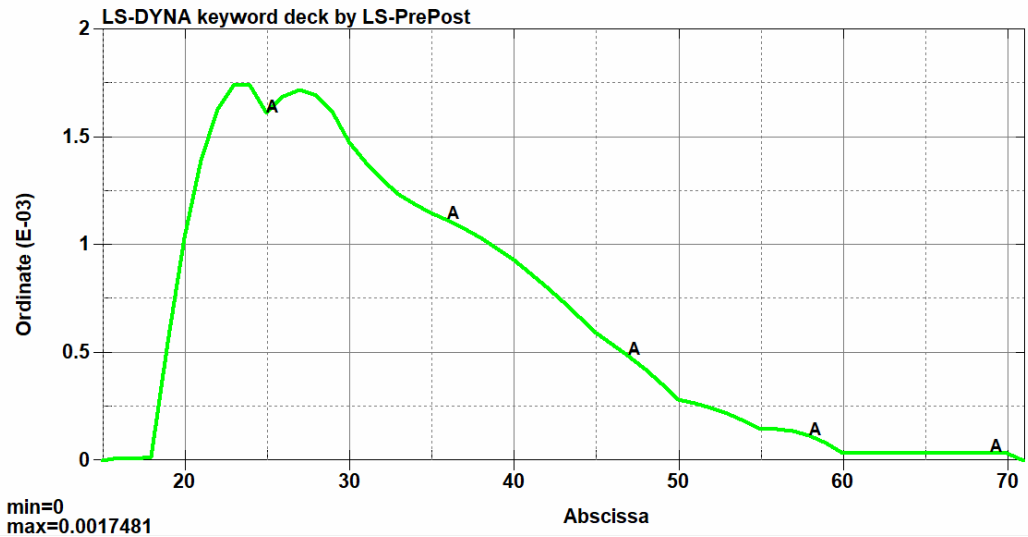
PRBA y PRAB: Coeficiente de Poisson.

CV: Capacidad calorífica a volumen constante.

CP: Capacidad calorífica a presión.

T: Temperatura del gas de entrada.

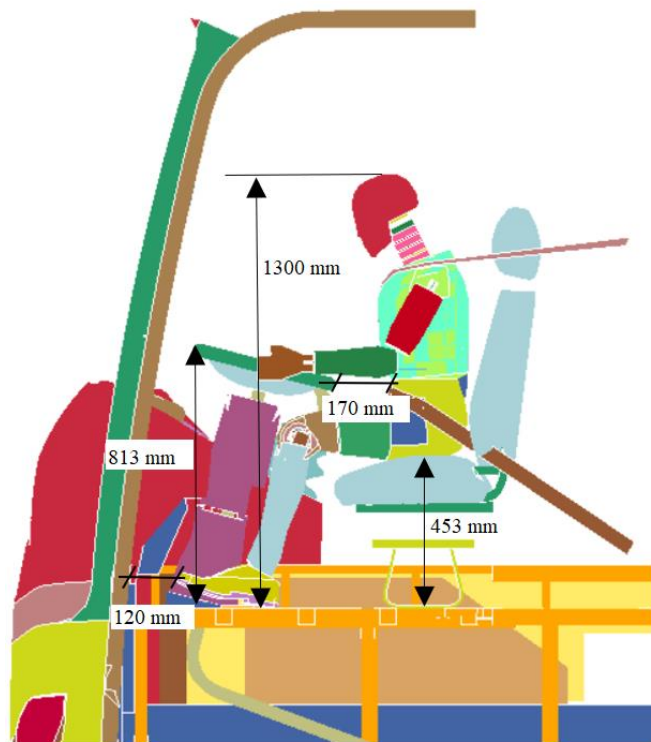
LCMT: Curva de carga que especifica el caudal másico de entrada o la presión del tanque en función del tiempo presentada en la Figura 27:



**Figura 27:** Curva de presión de inflado de airbag.

### 2.6.7 Ubicación del maniquí de pruebas de impacto Híbrido III.

El maniquí se ubica en la posición del conductor siguiendo la calibración presentada en la investigación [34], también se colocó un cinturón de seguridad de tres puntos como se muestra en la Figura 28 con las medidas indicadas.



**Figura 28:** Ubicación del conductor y dimensiones con respecto al volante, tablero, asiento y habitáculo del conductor.

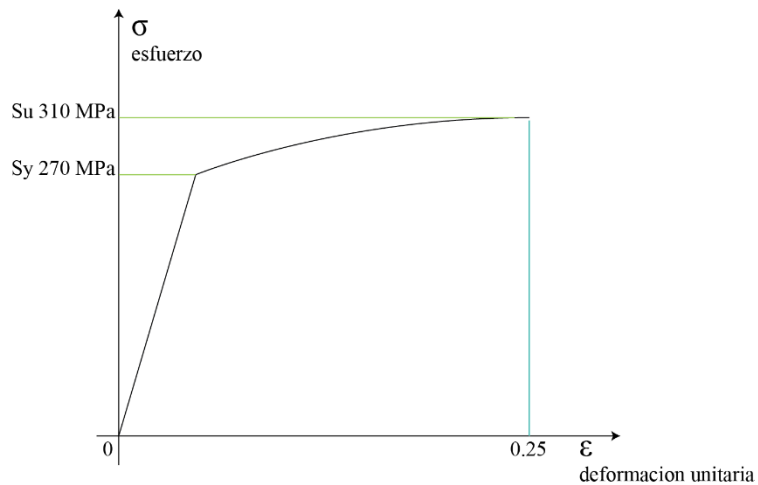
### 2.6.8 Materiales

El material estructural utilizado en las simulaciones se basa en las propiedades mecánicas de lo indicado en NTE INEN 2415, utilizando el material ASTM A500 grado A, que es el material estructural más utilizado en la construcción de carrocerías de buses en el país mostrada en la Figura 29.

Grado	Descripción	Límite de fluencia mínima (MPa)	Resistencia a la tracción mínima (MPa)	Elongación mínima en 50 mm <sup>A</sup> %
AC	Tubo para usos generales	--	290	≥ 35
A	Tubos estructurales sección circular	230	310	25 <sup>B</sup>
B		290	400	23 <sup>C</sup>
C		315	425	21 <sup>D</sup>
D		250	400	23 <sup>C</sup>
A	Tubos estructurales	270	310	25 <sup>B</sup>
B	sección cuadrada,	315	400	23 <sup>C</sup>
C	rectangular o	345	425	21 <sup>D</sup>
D	especial	250	400	23 <sup>C</sup>

<sup>1</sup> ASTM A500/A500M Table 2 Tensile requirements.  
<sup>A</sup> El mínimo valor de elongación especificado aplica únicamente a los ensayos realizados antes del envío del tubo.  
<sup>B</sup> Se aplica a espesor de pared (e) igual o mayor a 3,05 mm. Para espesores menores del especificado, el valor mínimo de elongación en 50 mm debe ser calculado por la ecuación % = 2,2 e + 17,5 redondeado al espesor más cercano.  
<sup>C</sup> Se aplica a espesor de pared (e) igual o mayor a 4,57 mm. Para espesores más ligeros el mínimo valor de elongación en 50 mm debe ser calculado por la fórmula = 2,4 e + 12 redondeado al espesor más cercano.  
<sup>D</sup> Se aplica a espesor de pared (e) igual o mayor a 3,05 mm. Para espesores más ligeros el mínimo valor de elongación en 50 mm, puede ser por acuerdo con el fabricante.

**Figura 29:** Propiedades mecánicas del material [18].



**Figura 30:** Diagrama esfuerzo deformación del material.

Propiedades mecánicas del material estructural ASTM A500 grado A,  $S_y$  límite de fluencia 270 MPa,  $S_u$  resistencia última a la tracción 310 MPa y deformación unitaria máxima 0.25 mm/mm, NTE INEN 2415, la cual se puede identificar en la curva de la Figura 30 y en la Tabla 10. Por otro lado, se ingresan los materiales en la carta de control Mat\_Fabric, como se muestra en la Figura 31.

**Tabla 10: Materiales.**

<b>Materiales</b>	
Acero estructural de carrocerías de bus	Sy. Su. E densidad
Acero del bastidor del chasis	Según lo indicado en manual de carrozados
Material de vidrios y parabrisas	Vidrios templados
Material de esponjas de asientos	Modelos de NHTSA
Material de cinturones de seguridad	Según materiales publicados en material de entrenamiento de LSTC
Material de ruedas del vehículo	Materiales hyper elásticos según modelos NHTSA
Material de bolsa de aire Airbag	Según materiales publicados en material de entrenamiento de LSTC
Materiales del Maniquí de pruebas de impacto	Según modelo de LSTC



\*MAT\_FABRIC\_(TITLE) (034) ( 1 )

TITLE

1	MID	RO	EA	EB	=	PRBA	PRAB	=
	3000092	8.760e-07	0.3000000	0.2000000	0.3000000	0.2000000	0.2000000	0.2000000
2	GAB	=	=	CSE	EL	PRL	LRATIO	DAMP
	0.0400000	0.0400000	0.0400000	1.0	0.0600000	0.3500000	0.1000000	0.2000000
3	AOPT	FLC	FAC	ELA	LNRC	FORM	FVOPT	TSRFAC
	3.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
4	UNUSED	RGBRTH	AOREF	A1	A2	A3	X0	X1
	0	0.0	0	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0
5	V1	V2	V3	=	=	=	BETA	ISREFG
	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

**Figura 31:** Selección de propiedades [33].

Dónde:

MID: Identificación del material. Se debe utilizar un número único.

RO: Densidad de masa.

EA: Módulo de Young - dirección longitudinal. Para un material de tejido elástico isotópico, solo se definen EA y PRBA y se utilizan como el módulo de Young isotrópico y la relación de Poisson, respectivamente. La entrada para las direcciones de fibra y el forro debe ingresarse como cero para la tela elástica isotrópica.

EB: Módulo de Young - dirección transversal, puesto a cero para material elástico isotrópico.

PRBA: Relación de Poisson con menor dirección.

PRAB: Relación de Mayor Poisson con dirección puesta a cero para material elástico isotrópico.

GAB: Módulo de corte en dirección ab, puesto a cero para material elástico isotrópico.

CSE: Opción de eliminación de tensiones de compresión:

- EQ.0.0: no elimina las tensiones de compresión (por defecto),
- EQ.1.0: eliminar esfuerzos de compresión (no aplica para lineales).

EL: Módulo de Young para liner elástico (obligatorio si LRATIO>0).

PRL: Relación de Poisson para liner elástico (obligatorio si LRATIO>0).

LRATIO: Un valor distinto de cero activa el forro elástico y define la relación entre el grosor del forro y el grosor total de la tela (opcional).

DAMP: Coeficiente de amortiguamiento de Rayleigh. Se recomienda un coeficiente de 0,05 correspondiente al 5% de amortiguamiento crítico. A veces son necesarios valores mayores

AOPT: Opción de ejes de material:

A1: Componente del vector a para AOPT = 2.

V1: Componente del vector v para AOPT = 3.

V2: Componente del vector v para AOPT = 3.

## CAPITULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados

#### 3.2 Impacto frontal con barrera fija

Para medir lesiones en el maniquí se modificaron las dimensiones de la barrera fija simulando la aproximación hacia un vehículo según lo establece la EURONCAP [35], con el fin de obtener un comportamiento dinámico extremo del conductor en el autobús y se pueda verificar los índices de lesiones más comunes producidos en este tipo de colisiones.

Hay que tomar en cuenta que para casos reales las velocidades a las que circulan los buses interprovinciales son elevadas, y que en muchas ocasiones los accidentes que estos provocan no solo dejan lesiones graves al conductor, sino que casi siempre causan una muerte inmediata como se muestra en [36], mientras que al circular a velocidades moderadas las consecuencias para los ocupantes del autobús no siempre son desastrosas como se muestra en [37]. Entonces, en el presente estudio se pretendió medir las lesiones provocadas en impactos frontales, por lo que se tuvo que ocupar una velocidad moderada que no provoque la muerte inmediata del chofer, esta es dada por el reglamento CEPE R94 [26] la cual es de 56 km/h para el vehículo. En esta investigación se realizaron algunas pruebas de impacto frontal del autobús contra la barrera a esta velocidad, pero los resultados obtenidos no fueron adecuados para verificar las lesiones críticas del conductor debido a que el autobús se deformaba en su totalidad y el habitáculo de conductor estaba totalmente invadido por elementos estructurales frontales y por autopartes produciendo lesiones extremas en el conductor. Por otro lado, la energía cinética del autobús en el impacto tiene un valor muy elevado considerando que el autobús tiene una masa de aproximadamente de 12 toneladas con lo cual la estructura se deforma exageradamente y por consecuencia producirá la muerte del conductor. La velocidad de 56 km/h es la que se establece a vehículos livianos de categoría M1, pero para poder analizar el comportamiento crítico en impacto frontales de autobuses se consideró una velocidad de 30 km/h según lo publicado en [38] teniendo un comportamiento más estable de la estructura del modelo

que ayudó a analizar el comportamiento de lesiones aceptables del conductor, como se representa en la Figura 32, junto con los parámetros a utilizar en la Tabla 11.



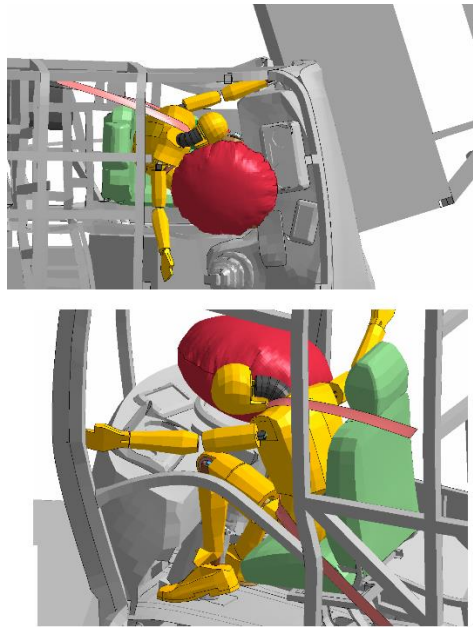
**Figura 32:** Impacto frontal de autobús con barrera fija.

**Tabla 11:** Condiciones de simulación.

Condición	Valor/cantidad	Observación
Velocidad de impacto	30 km/h	
Dimensiones de la barrera	2000 mm de ancho, 1300 mm de alto y 900 mm de profundidad	
Cinturones de seguridad	3 puntos	
Peso del modelo total	14573.2 kg	Carro + bus+ maniquí

### 3.3 Impacto oblicuo con barrera móvil

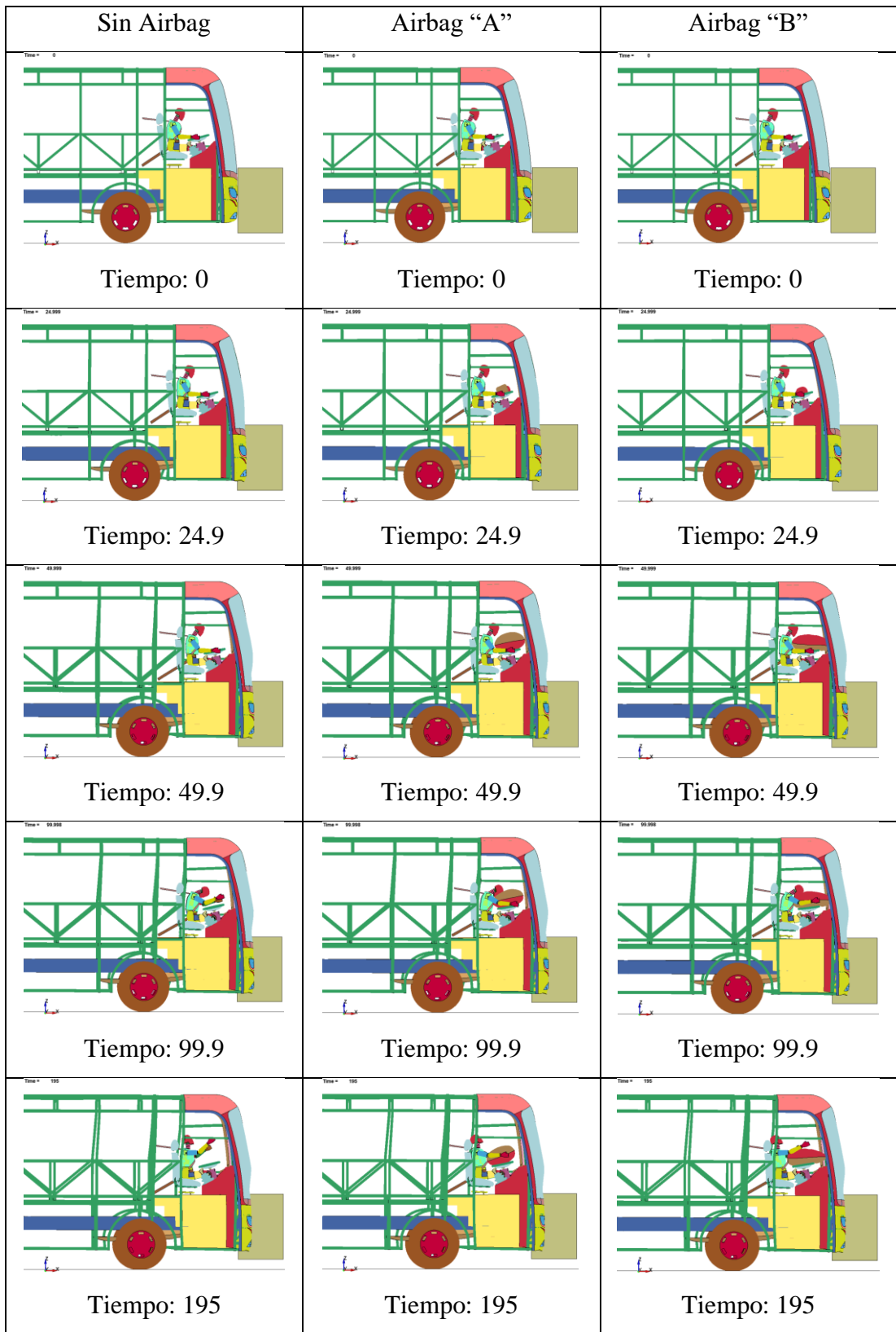
En el presente impacto no se encontraron irregularidades como en el anterior, por lo que se pudo realizar las mediciones de los criterios de lesiones sin problemas, usando los datos establecidos por [28], obteniendo un comportamiento esperado en el maniquí, que puede ser observado en la Figura 33.



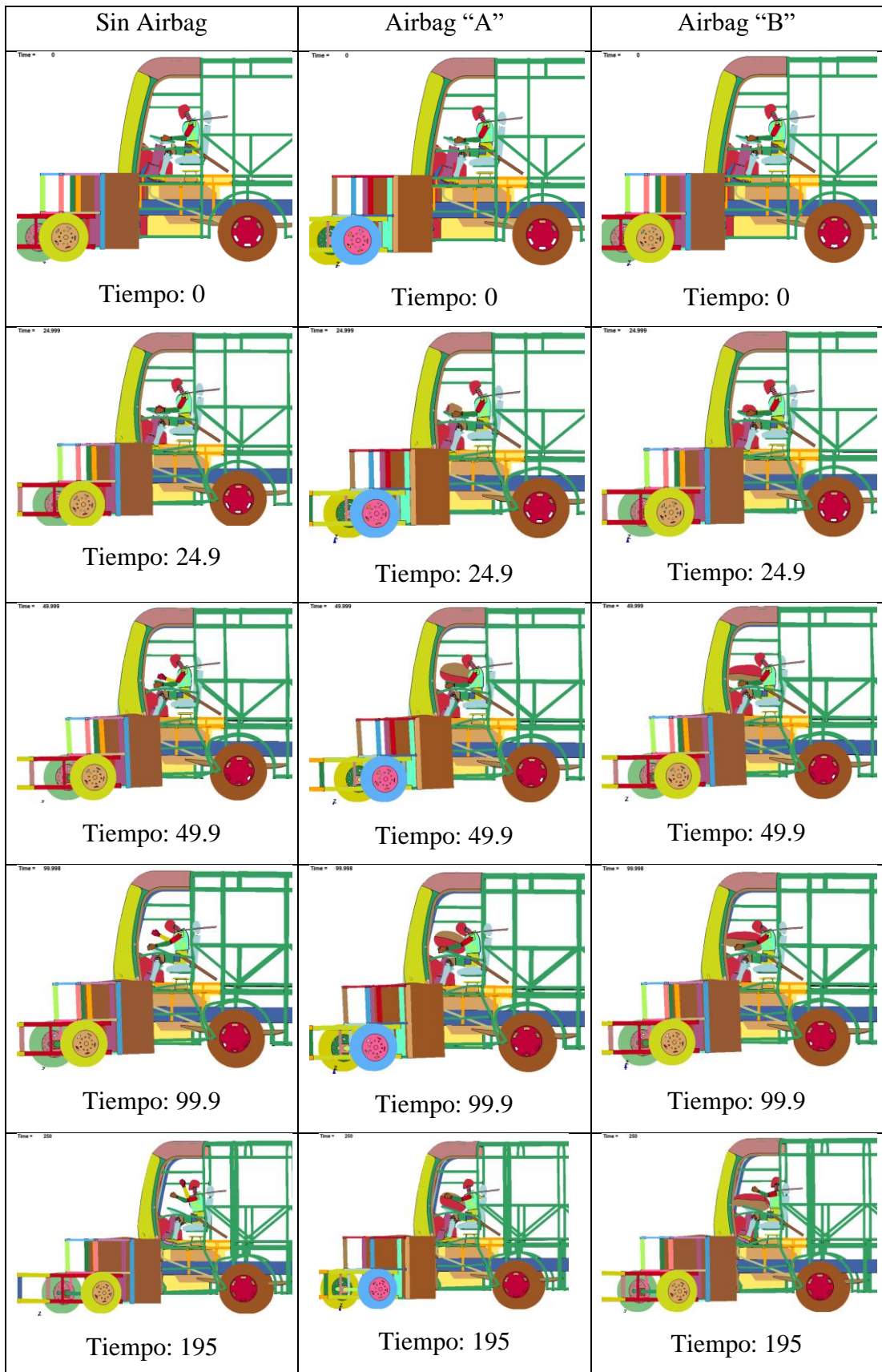
**Figura 33:** Impacto oblicuo con barrera móvil.

### **3.4 Representación de simulaciones**

La simulación indica el comportamiento del maniquí en el autobús durante la colisión frontal y oblicua, las cuales son representadas con una secuencia vertical en la Figura 34 y la Figura 35, indicando impactos sin airbag en la columna izquierda, con airbag tipo A en la columna de la mitad y con airbag tipo B en la columna derecha.



**Figura 34:** Secuencia impacto frontal con barrera fija.

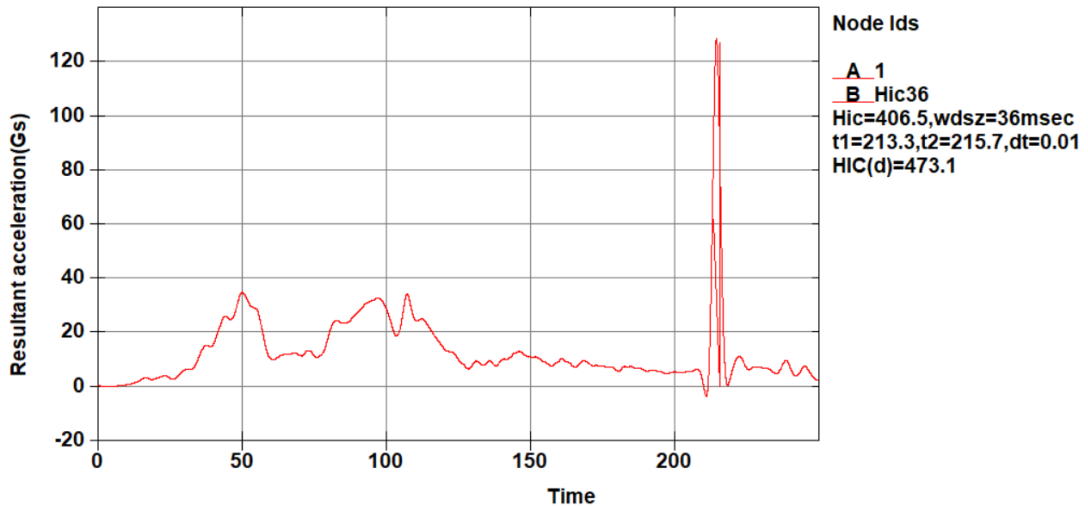


**Figura 35:** Secuencia impacto oblicuo con barrera móvil.

### 3.5 Criterios de lesiones del maniquí en impacto frontal sin airbag

#### 3.5.1 Criterio de lesión en la cabeza (HIC)

Obtenidos los resultados en la Figura 36, se tiene un HIC sin el uso del airbag de 406.5, indicando que no supera el valor de 1000 según lo establecido en el reglamento de las Naciones Unidas.

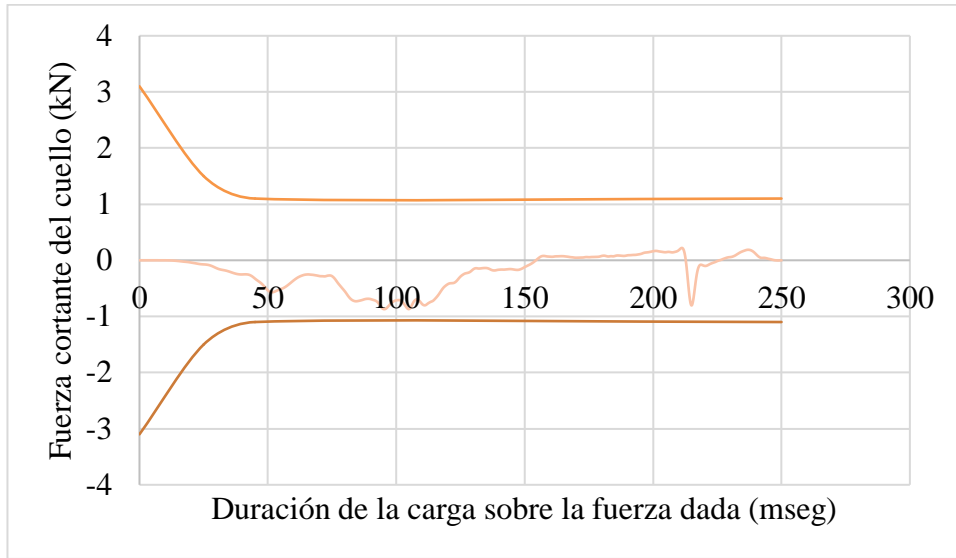


**Figura 36:** Curva de aceleración resultante vs Tiempo.

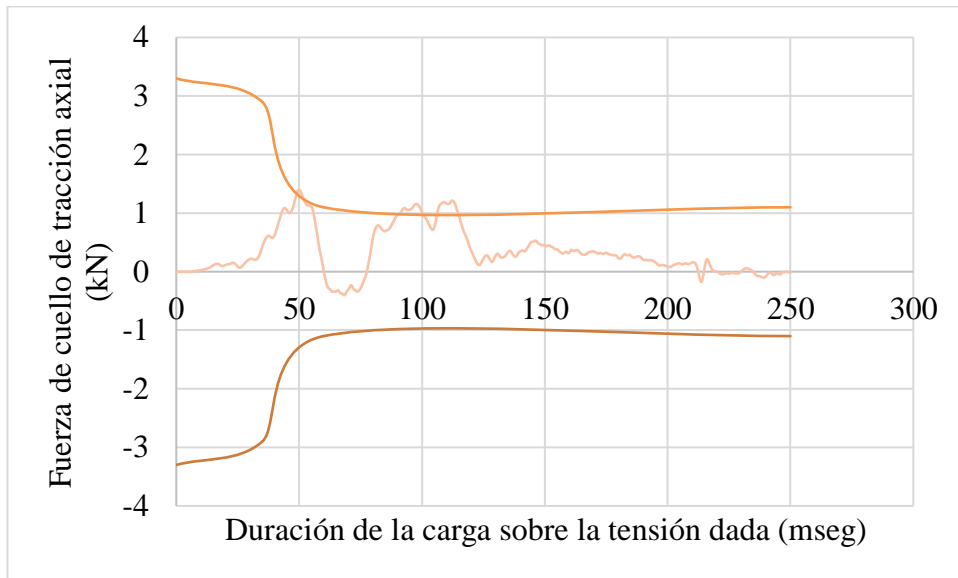
#### 3.5.2 Criterio de lesiones en el cuello

Obtenidas las curvas de la Figura 37, se deduce que en un impacto frontal el criterio de tensión en el cuello durante un impacto frontal sobrepasa el rango permitido por el reglamento de las Naciones Unidas, mientras que el criterio de fuerza cortante se mantiene dentro del rango.





(a)

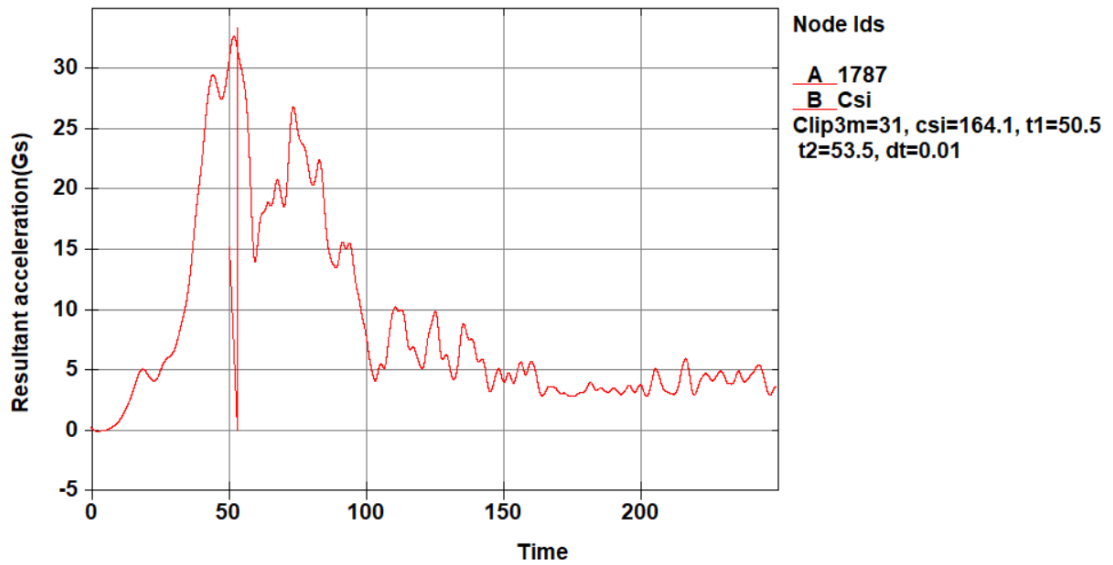


(b)

**Figura 37:** Curvas de criterio de cortante (a) y tensión (b) en el cuello.

### 3.5.3 Índice de severidad en el pecho

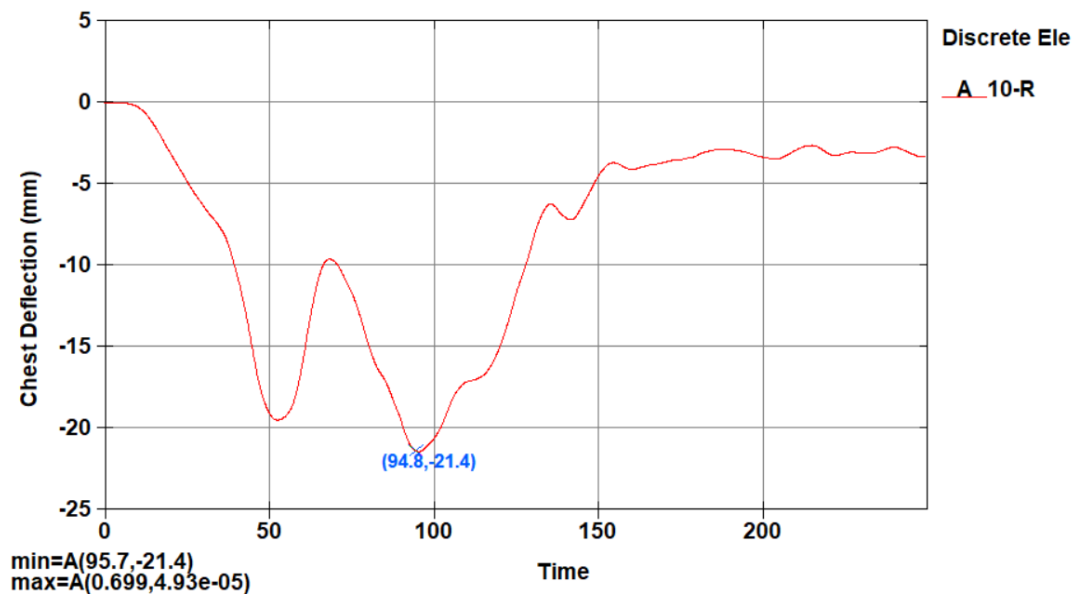
Con la Figura 38, se determina que el valor de  $csi$  no sobrepasó el valor de 1000 que establece el reglamento de las Naciones Unidas, teniendo un valor para un impacto frontal sin airbag de 164.1, determinando que el uso de airbag no es necesario para lesiones en el pecho.



**Figura 38:** Curva de índice de severidad del pecho.

### 3.5.4 Desplazamiento del tórax

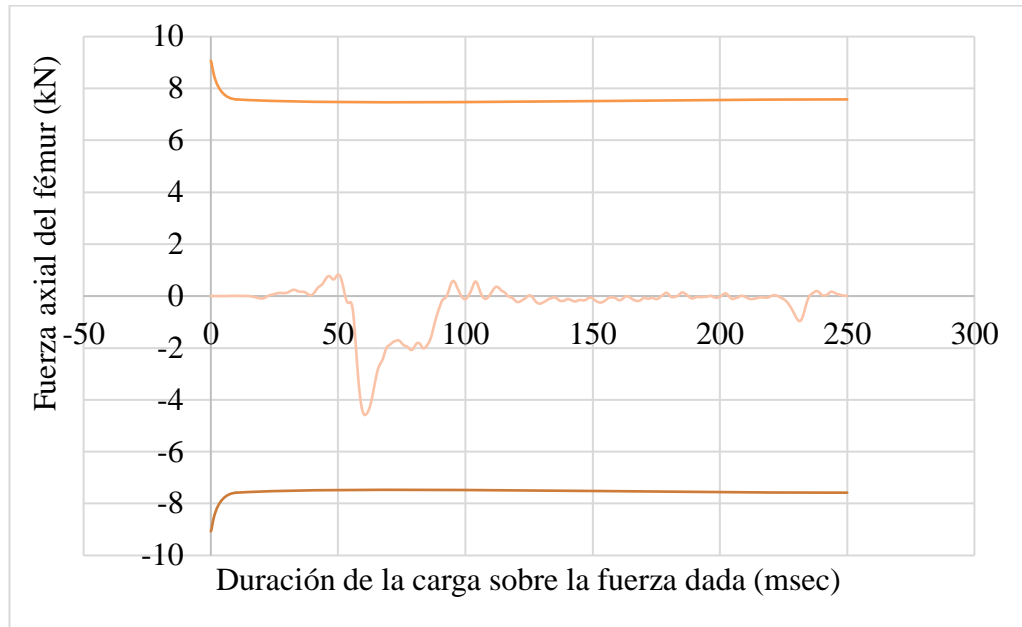
Dada la Figura 39 se puede verificar que para un impacto frontal sin airbag se tiene un desplazamiento del tórax de 21.4 mm que no sobrepasa los 42 mm establecidos por el reglamento de las naciones unidas, determinando que no es necesario el uso airbag en un impacto frontal.



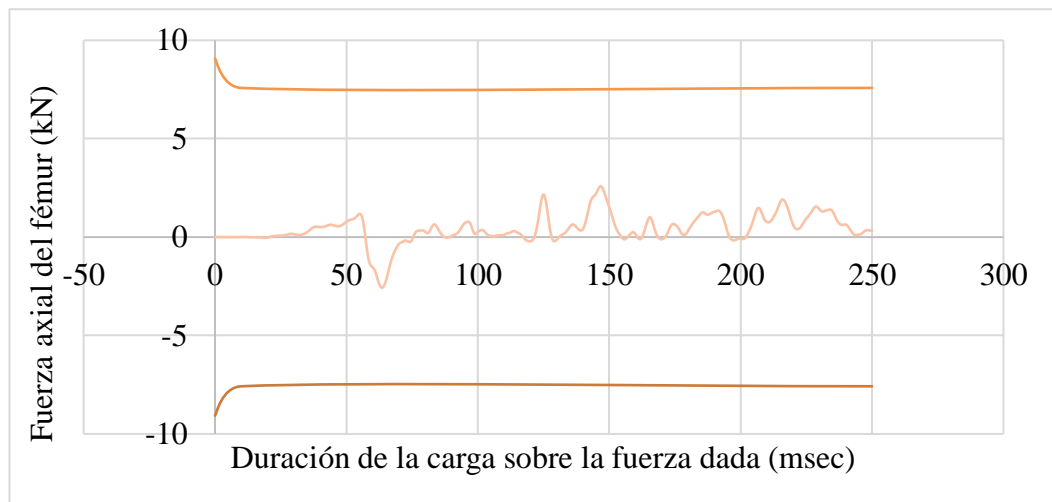
**Figura 39:** Curva de desplazamiento del tórax.

### 3.5.5 Fuerza en los fémures

Con las curvas de la Figura 40 se comprueba que la fuerza axial respecto a la duración de la carga sobre la fuerza dada no sobrepasa los rangos establecidos por las Naciones Unidas, comprobando que sin el uso del airbag no se tiene lesiones graves.



(a)

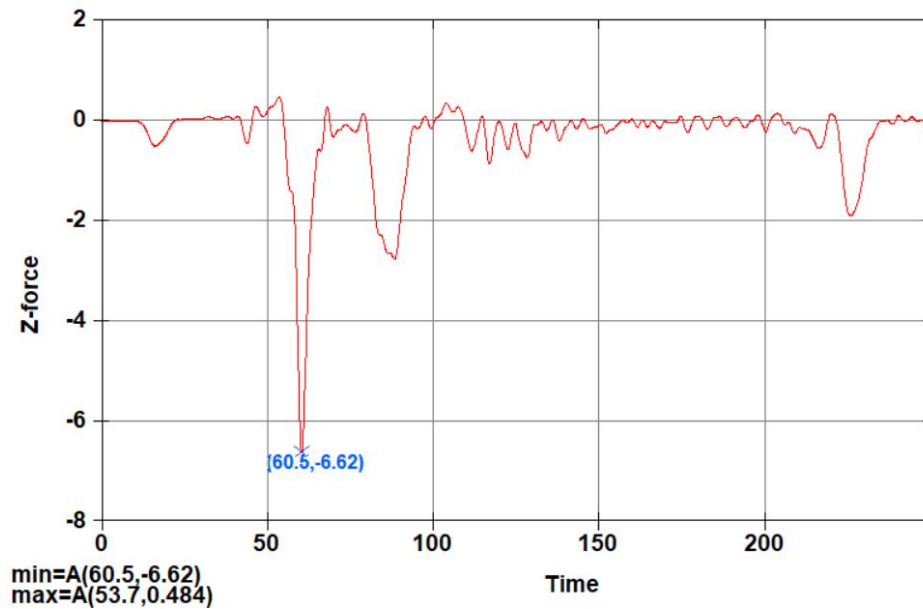


(b)

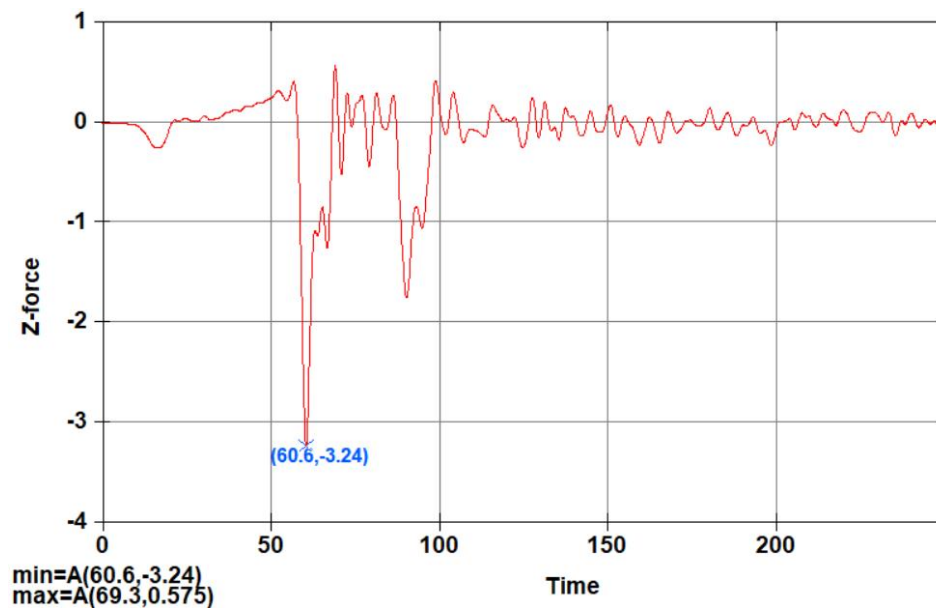
**Figura 40:** Criterio de fuerza del fémur izquierdo (a), fémur derecho (b).

### 3.5.6 Fuerzas de compresión en las tibias

Dada la Figura 41, se puede apreciar que existen fuerzas de compresión para la tibia izquierda de 6.62 kN y para la derecha de 3.24 kN. Tomando en cuenta que ninguno sobrepasa los 8 kN establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, no existen lesiones graves sin el uso de airbag.



(a)

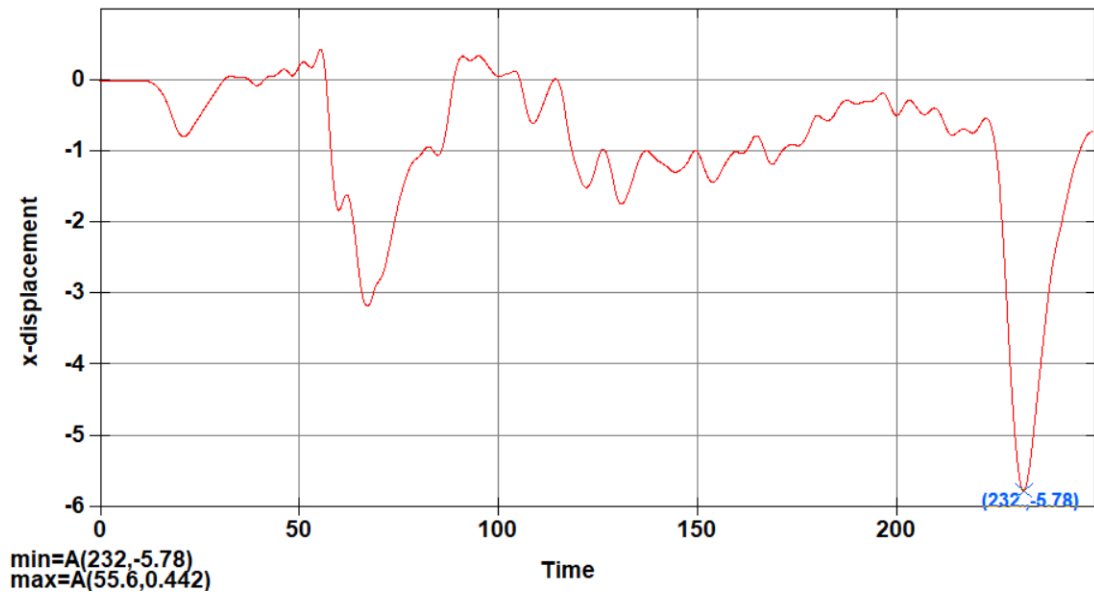


(b)

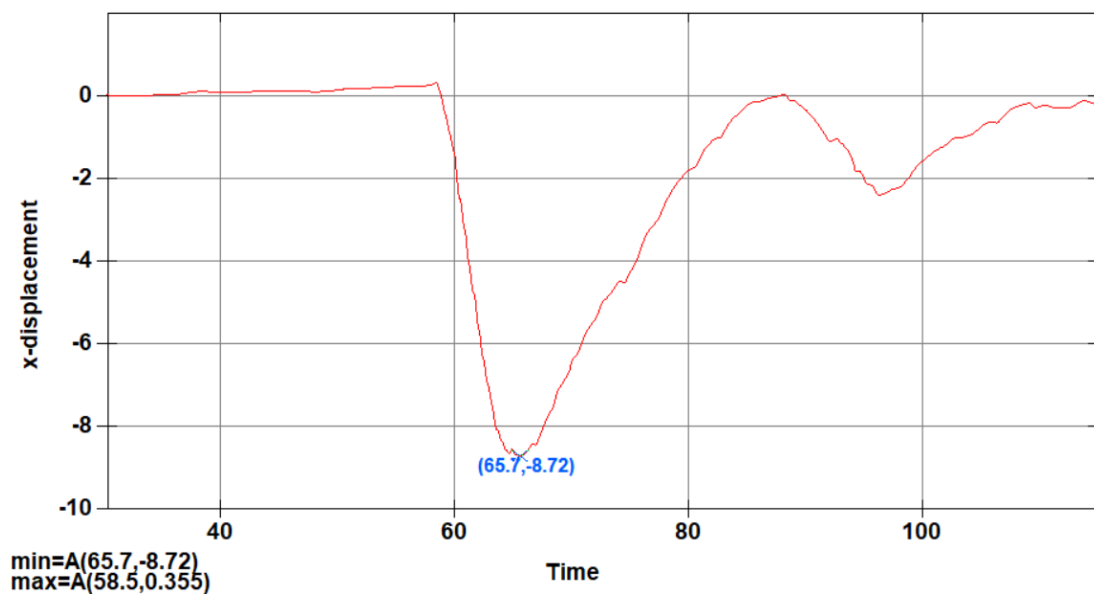
**Figura 41:** Fuerzas de compresión de la tibia izquierda (a), derecha (b).

### 3.5.7 Desplazamiento de las rodillas

En la Figura 42 se determina que existe un desplazamiento de 5.78 mm en la rodilla izquierda y 8.87 mm en la rodilla derecha, los cuales no sobrepasan los 15 mm establecidos por las Naciones Unidas, determinando que no existen lesiones graves en esta zona durante impactos frontales.



(a)



**Figura 42:** Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b).

### 3.6 Criterios de lesiones en un impacto frontal con airbag A

#### 3.6.1 Criterio de lesión en la cabeza (HIC)

Obtenidos los resultados en la Figura 43, se tiene HIC con el uso del airbag tipo A de 800.2, indicando que no supera el valor de 1000 según lo establecido en el reglamento de las Naciones Unidas.

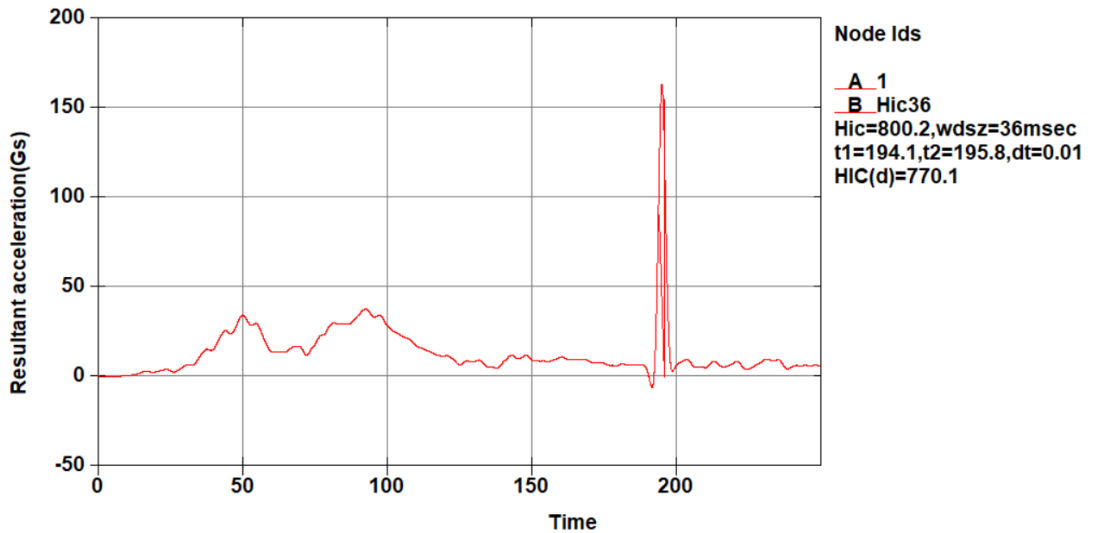
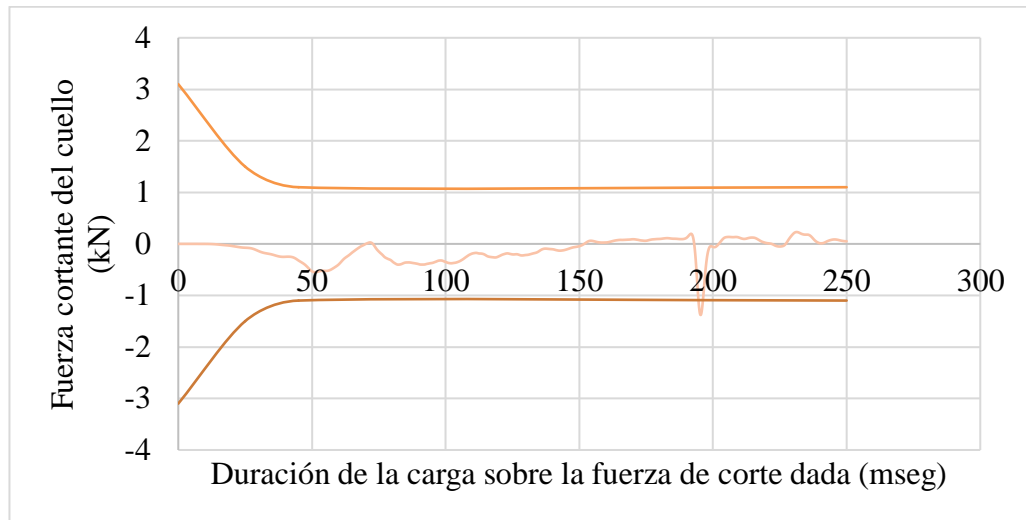


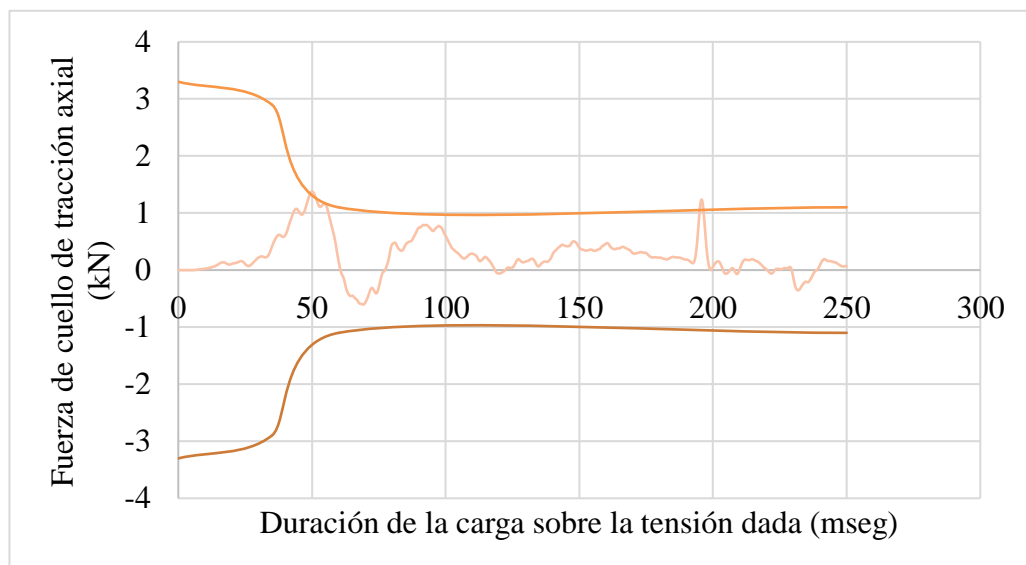
Figura 43: Curva de aceleración resultante vs Tiempo.

#### 3.6.2 Criterio de lesiones en el cuello

Obtenidas las curvas de la Figura 44, se deduce que en un impacto frontal el criterio de fuerza cortante y el de tensión en el cuello sobrepasan los rangos permitidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que este tipo de airbag no debería ser usado en autobuses.



(a)

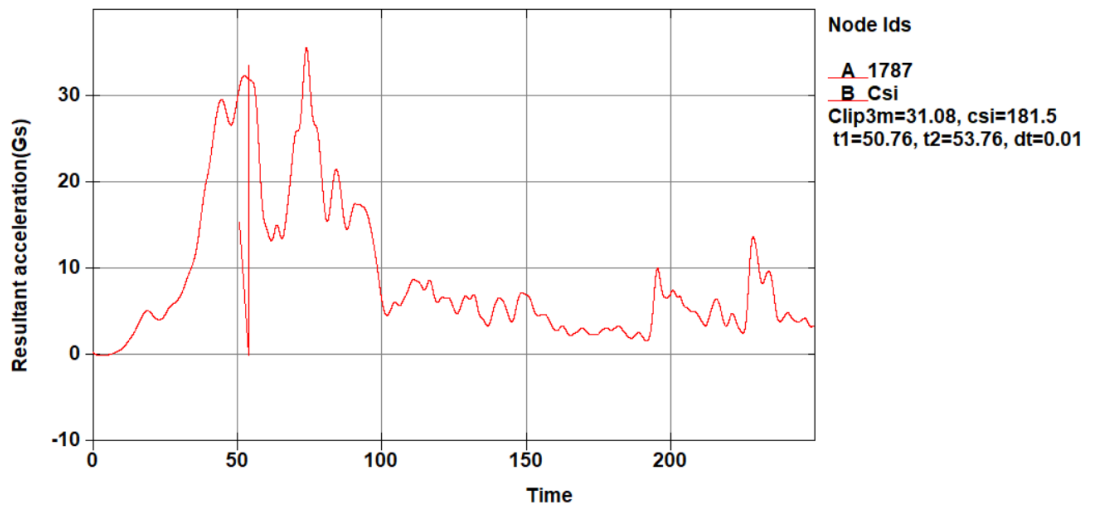


(b)

**Figura 44:** Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello.

### 3.6.3 Índice de severidad en el pecho

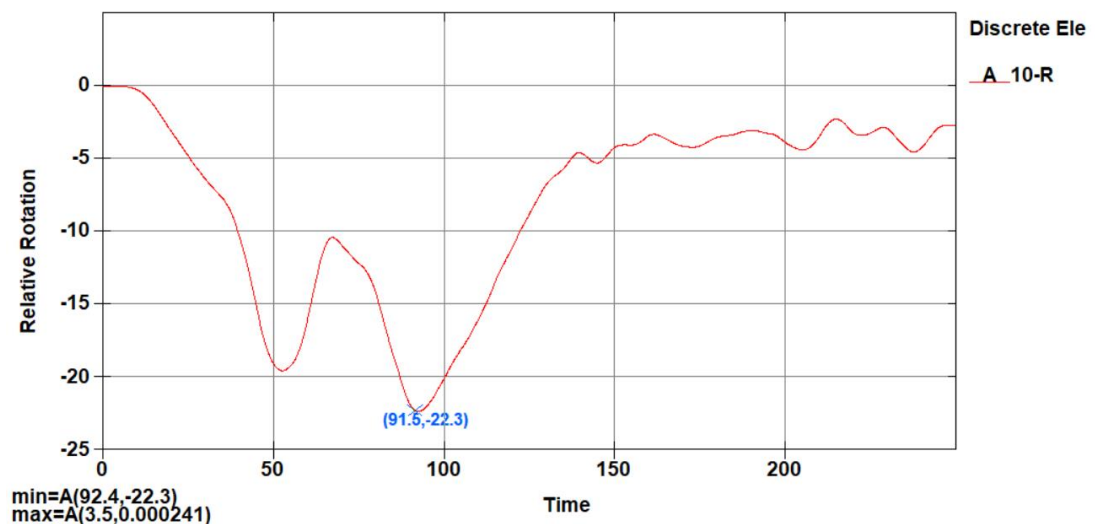
Con la Figura 45, se determina que el valor de csi no sobrepasó los 1000 que establece el reglamento de las Naciones Unidas, teniendo un valor para un impacto frontal con airbag tipo A de 181.5, determinando que el uso de este tipo de bolsa de aire no es necesario para lesiones en el pecho.



**Figura 45:** Curva de índice de severidad del pecho.

### 3.6.4 Desplazamiento del tórax

Con la Figura 46 se puede verificar que para un impacto frontal con airbag tipo A se tiene un desplazamiento del tórax de 22.3 mm que no sobrepasa los 42 mm establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que no es necesario el uso de este tipo de bolsa de aire en un impacto frontal.



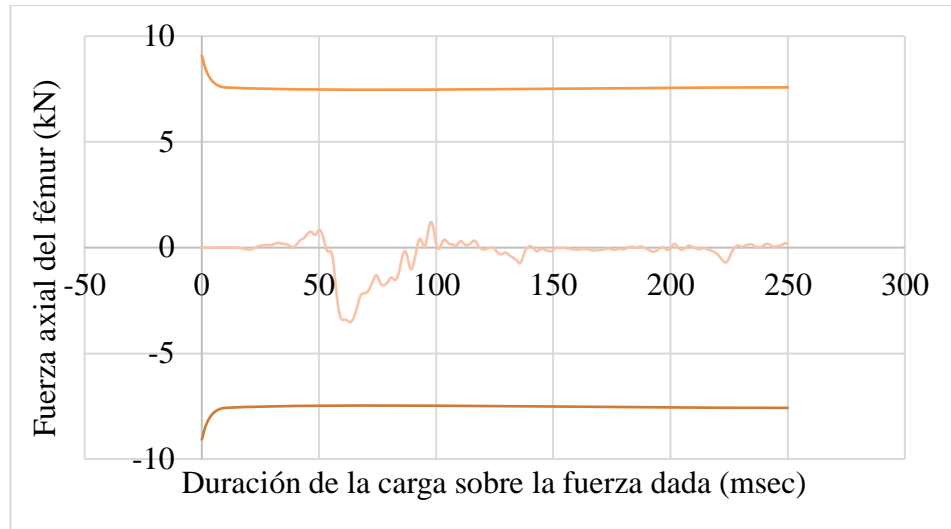
**Figura 46:** Curva de desplazamiento del tórax.

### 3.6.5 Fuerza en los fémures

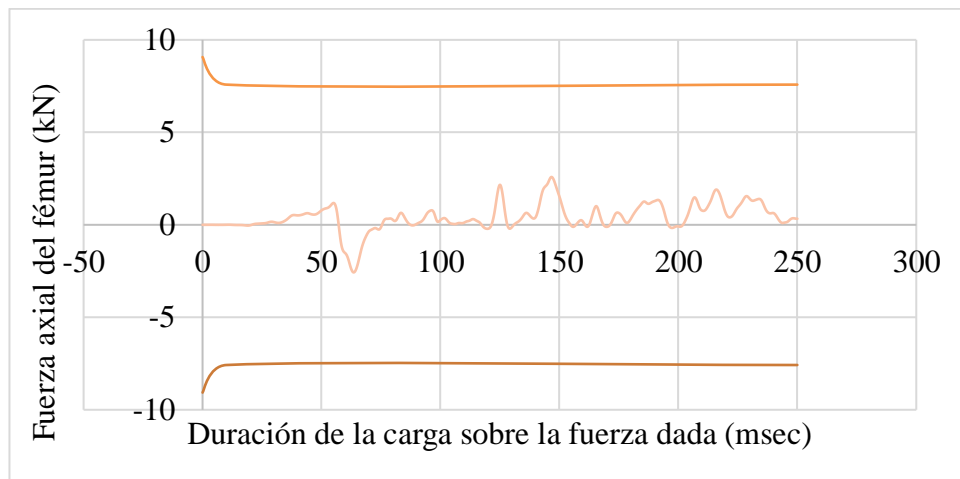
Dados los resultados mostrados en las curvas de la Figura 47, se verifica que la fuerza axial respecto a la duración de la carga sobre la fuerza dada, no sobrepasan los rangos



establecidos por las Naciones Unidas, comprobando que el uso del airbag tipo A cumple el reglamento.



(a)

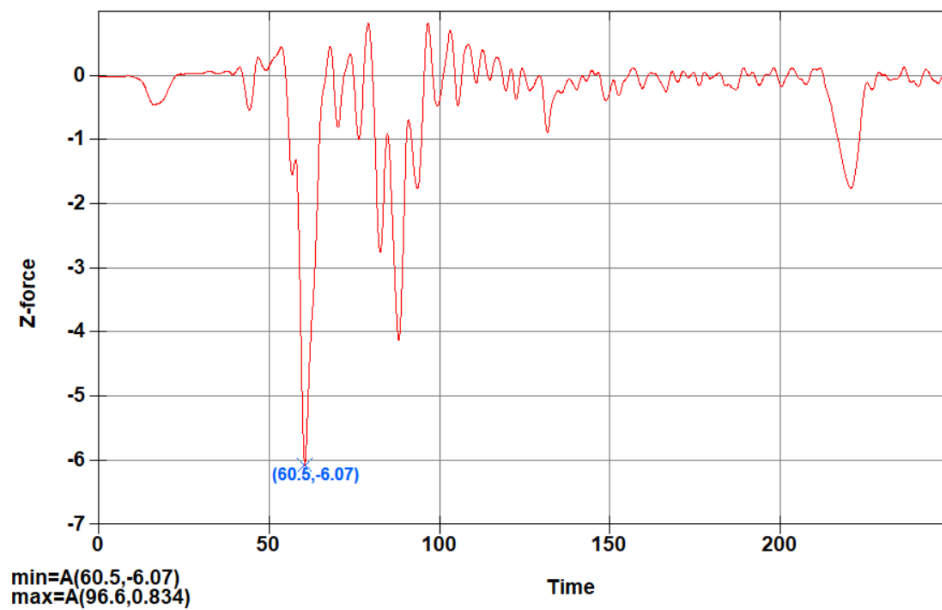


(b)

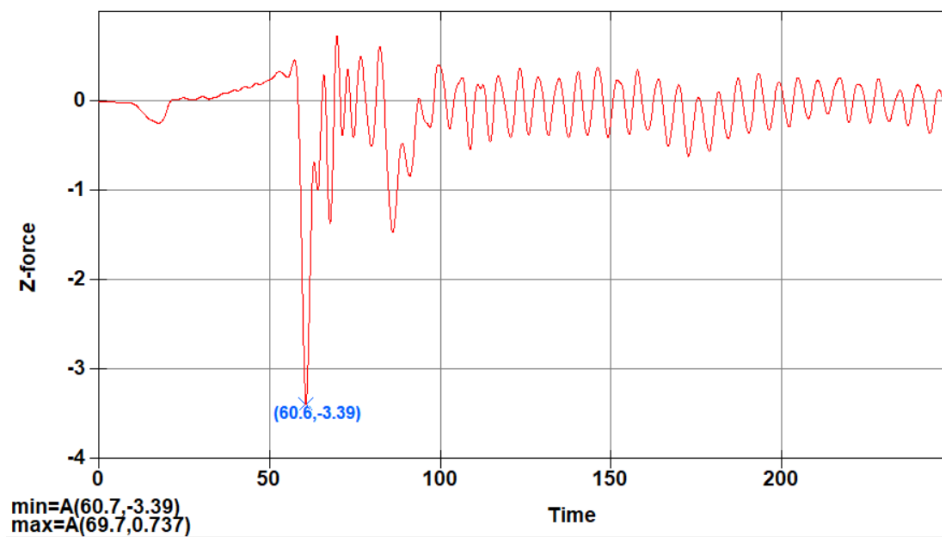
**Figura 47:** Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b).

### 3.6.6 Fuerzas de compresión en las tibias

Dada la Figura 48, se puede apreciar que existen fuerzas de compresión para la tibia izquierda de 6.07 kN y para la derecha de 3.39 kN. Tomando en cuenta que ninguno sobrepasa los 8 kN establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, prediciendo que no existen lesiones graves.



(a)



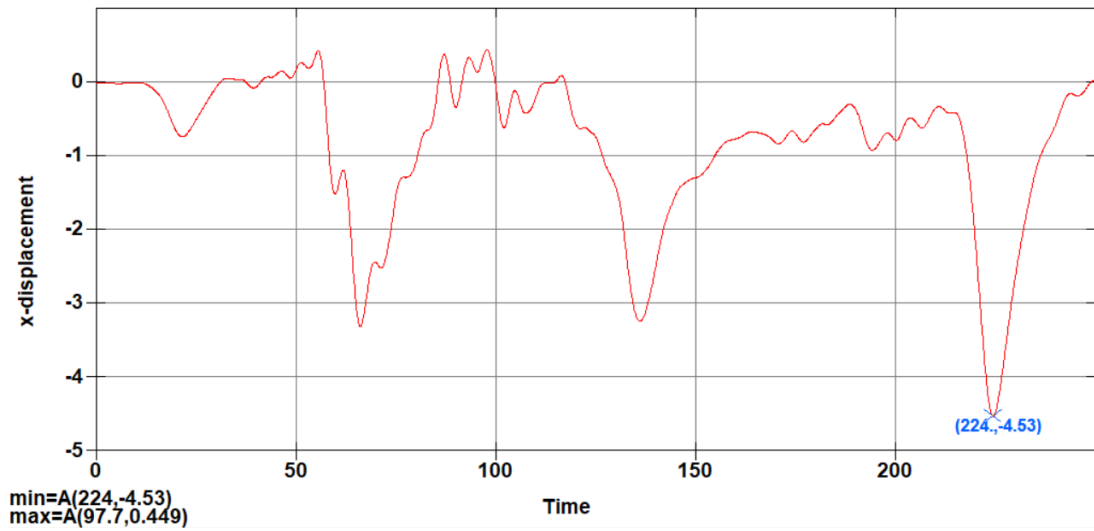
(b)

**Figura 48:** Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b).

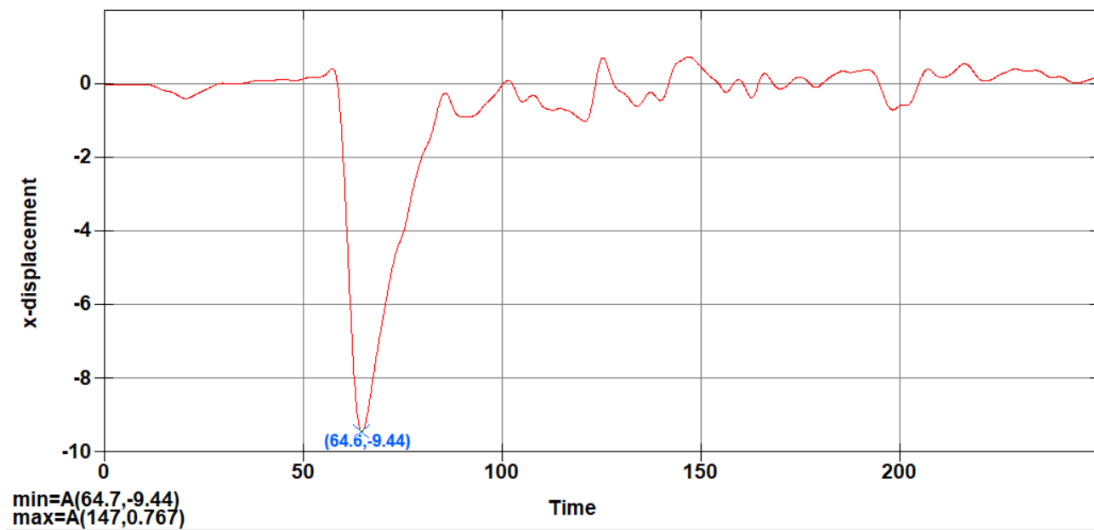
### 3.6.7 Desplazamiento de las rodillas

Dada la Figura 49 se observa que existe un desplazamiento de 4.53 mm en la rodilla izquierda y 9.44 mm en la rodilla derecha, los cuales no sobrepasan los 15 mm

establecidos por las Naciones Unidas, determinando que no existen lesiones graves en la zona de las rodillas en impactos frontales con el uso del airbag tipo A.



(a)



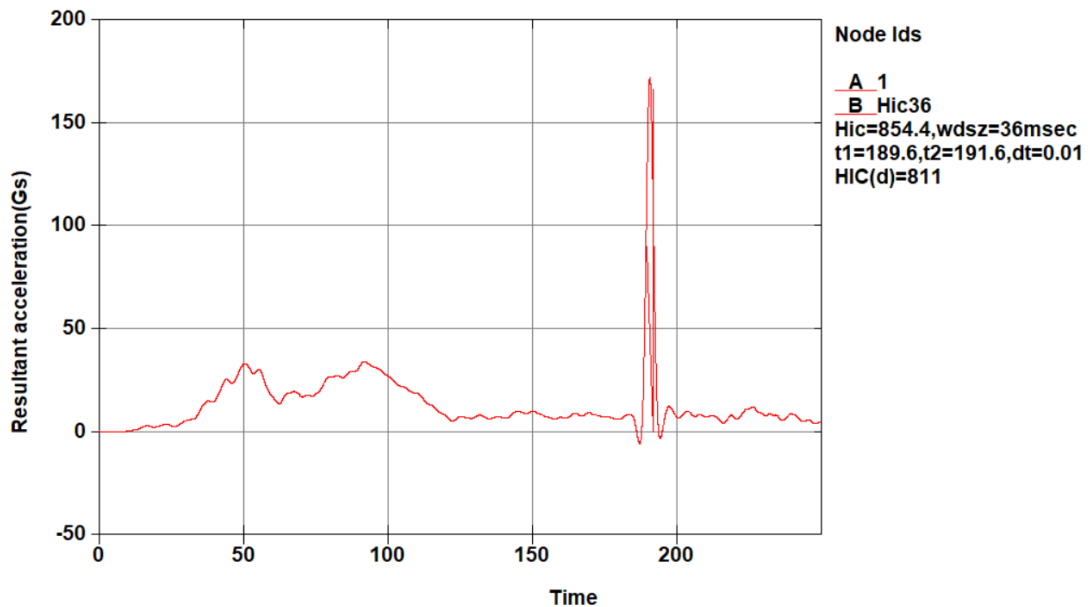
(b)

**Figura 49:** Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b).

### 3.7 Criterios de lesiones en un impacto frontal con airbag B

#### 3.7.1 Criterio de lesión en la cabeza (HIC)

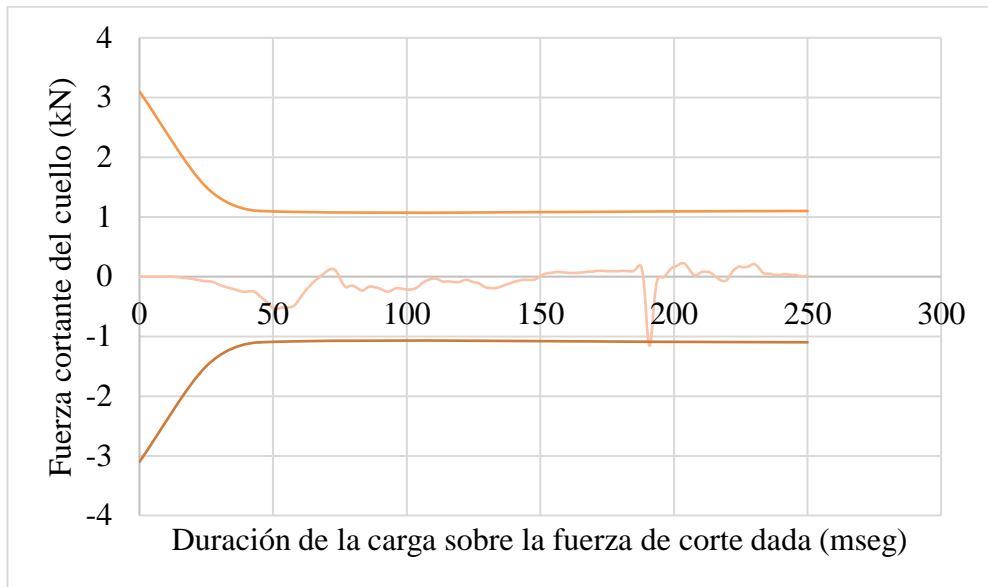
Obtenidos los resultados en la Figura 50, se tiene HIC con el uso del airbag B de 854.4, indicando que no supera el valor de 1000 según lo establecido en el reglamento de las Naciones Unidas.



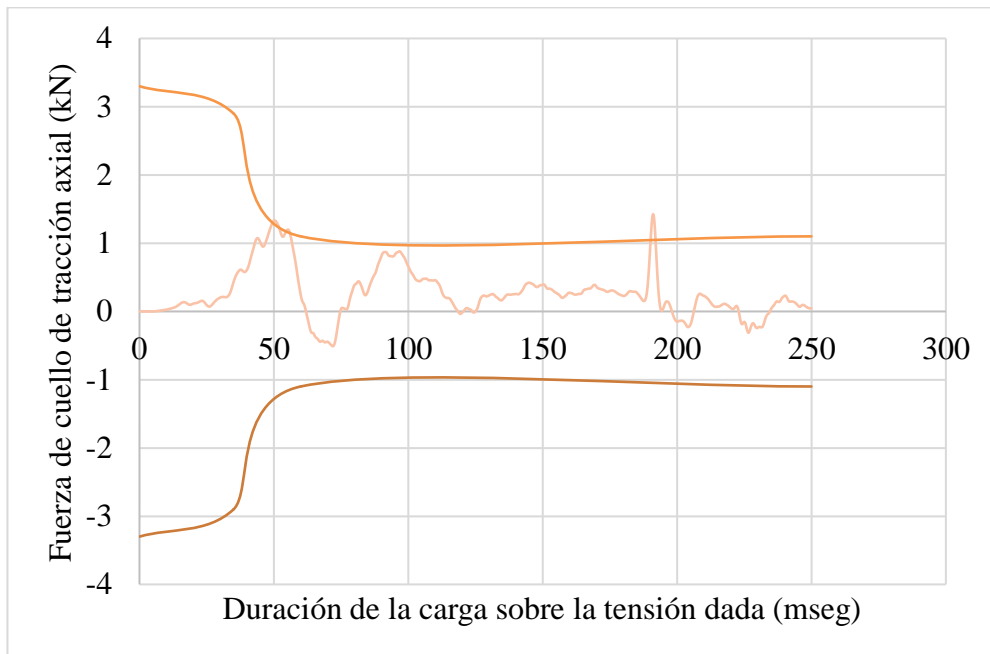
**Figura 50:** Curva de aceleración resultante vs Tiempo.

#### 3.7.2 Criterio de lesiones en el cuello

Obtenidas las curvas de la Figura 51, se deduce que en un impacto frontal el criterio de fuerza cortante y el de tensión en el cuello durante un impacto frontal sobrepasan los rangos permitidos por el reglamento de las naciones unidas, determinando que el uso de este tipo de airbag produce más lesiones en el cuello en vez de proteger al conductor.



(a)



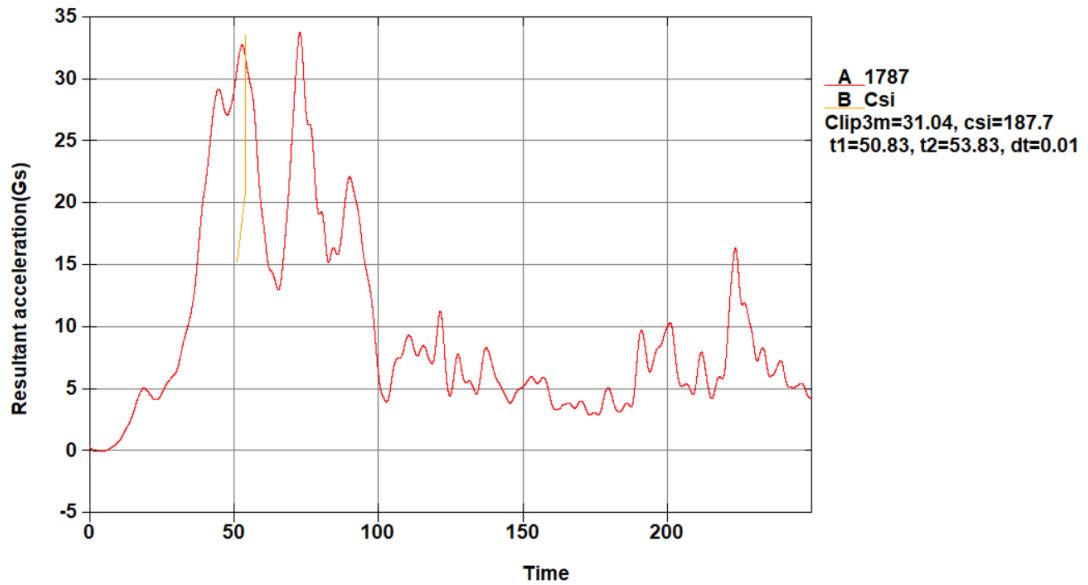
(b)

**Figura 51:** Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello.

### 3.7.3 Índice de severidad en el pecho

Con la Figura 52, se determina que el valor de csi no sobrepasó los 1000 que establece el reglamento de las naciones, teniendo un valor para un impacto frontal con el airbag

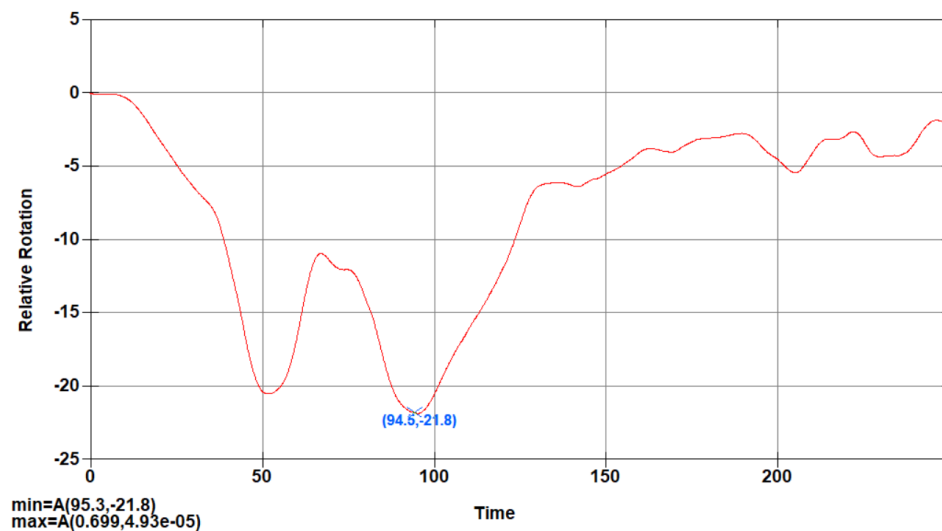
tipo B de 187.7, determinando que el uso de airbag no es necesario para lesiones en el pecho.



**Figura 52:** Curva del índice de severidad del pecho.

### 3.7.4 Desplazamiento del tórax

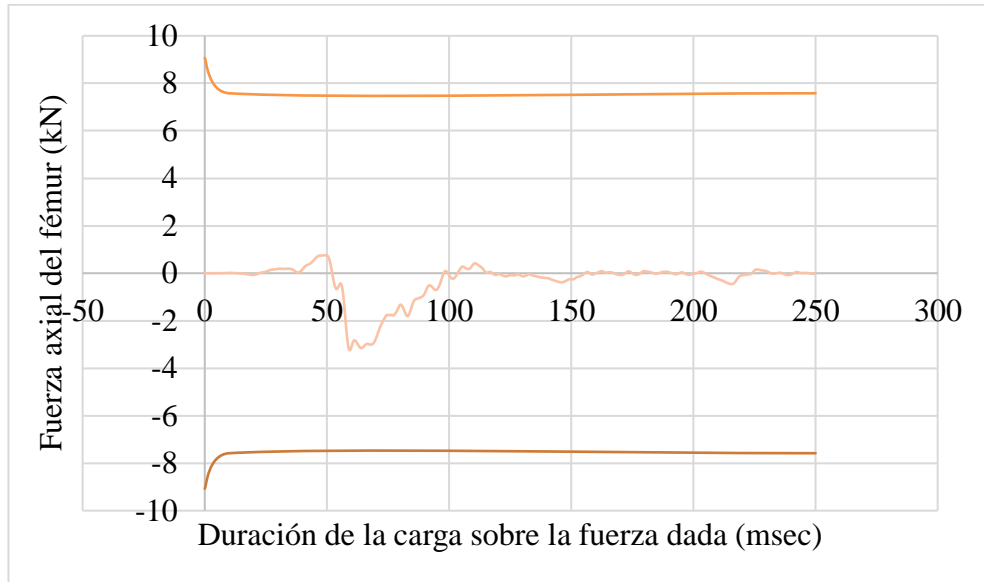
En la Figura 53, se puede verificar que para un impacto frontal con airbag tipo B se tiene un desplazamiento del tórax de 21.8 mm que no sobrepasa los 42 mm establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que no es necesario el uso del airbag B en un impacto frontal.



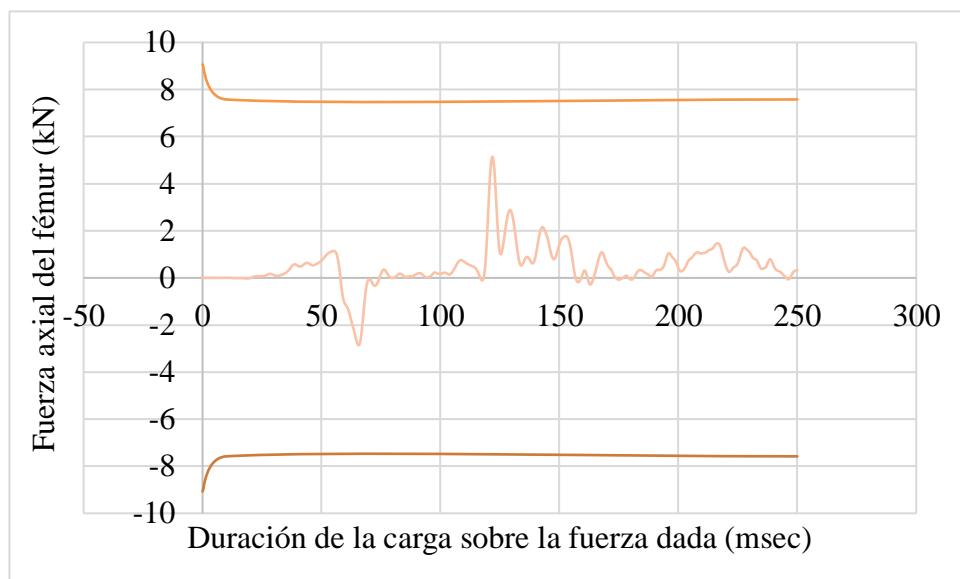
**Figura 53:** Curva de desplazamiento del tórax.

### 3.7.5 Fuerza en los fémures

En los resultados mostrados en las curvas de la Figura 54, se verifica que la fuerza axial respecto a la duración de la carga sobre la fuerza dada, no rebasan los rangos establecidos por las Naciones Unidas, comprobando que el uso del airbag tipo B cumple el reglamento.



(a)

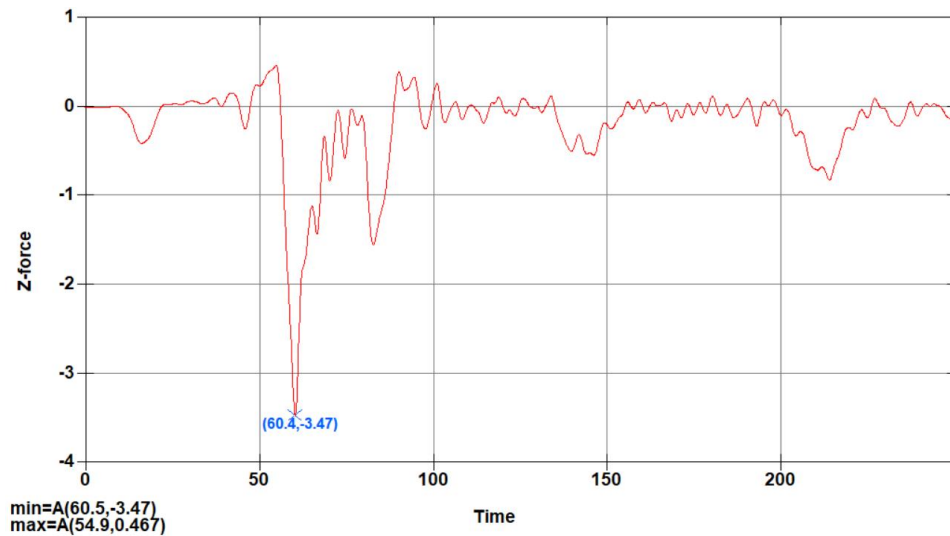


(b)

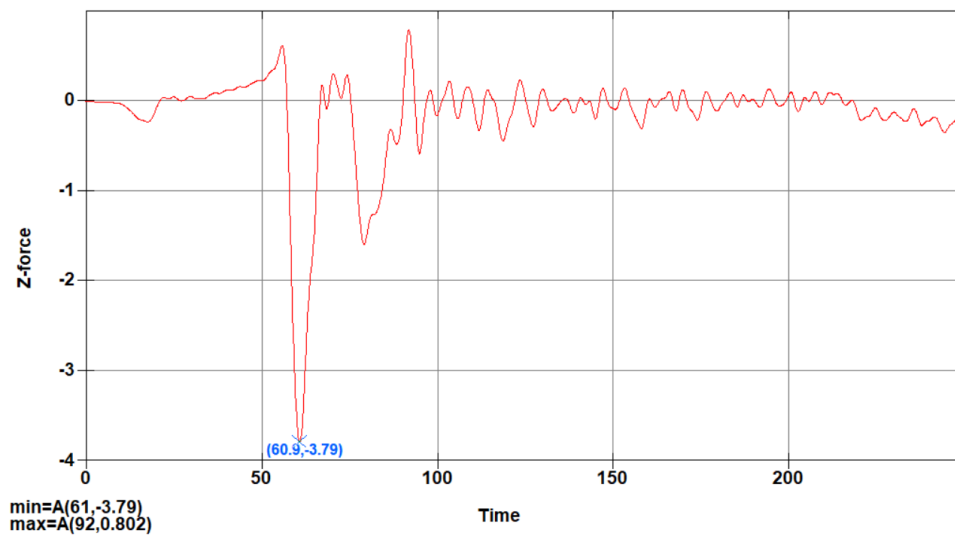
**Figura 54:** Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b).

### 3.7.6 Fuerzas de compresión en las tibias

En la Figura 55 se predijo que existe fuerzas de compresiones para la tibia izquierda de 3.47 kN y para la derecha de 3.79 kN. Tomando en cuenta que ninguno sobrepasa los 8 kN establecidos por el reglamento de las Naciones unidas, no existen lesiones graves con el uso del airbag tipo B.



(a)



(b)

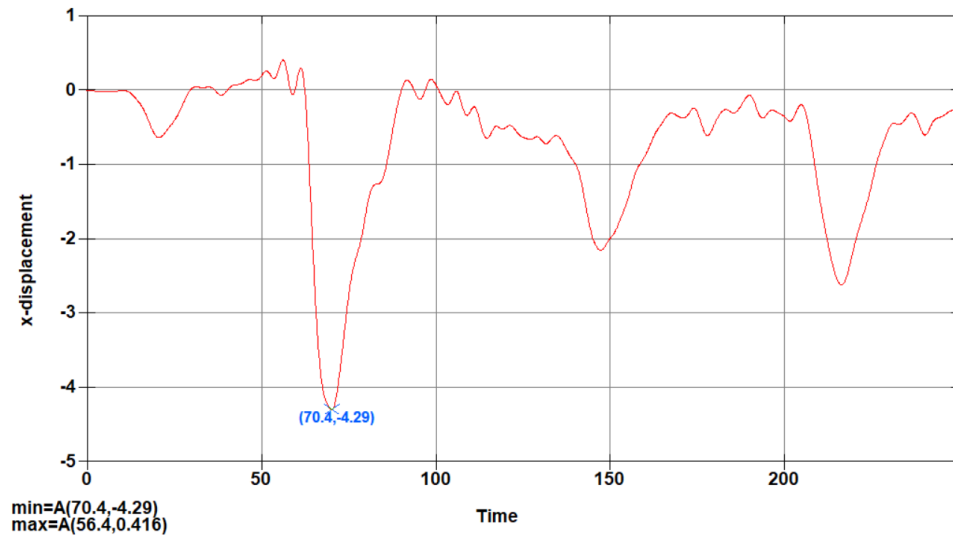
**Figura 55:** Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b).

### 3.7.7 Desplazamiento de las rodillas

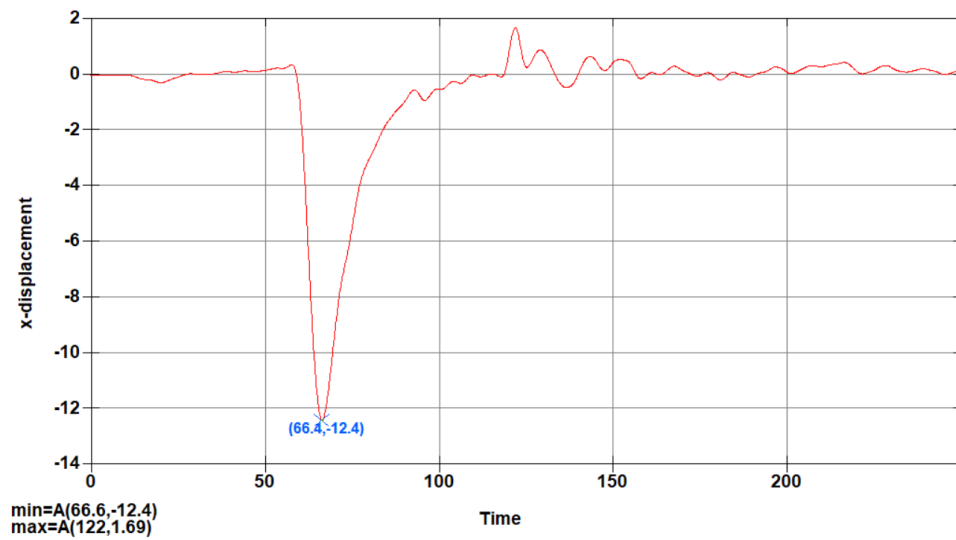
Dada la Figura 56 se observa que existe un desplazamiento de 4.29 mm en la rodilla izquierda y 12.4 mm en la rodilla derecha, los cuales no sobrepasan los 15 mm



establecidos por las Naciones Unidas, determinando que no existen lesiones graves en la zona de las rodillas en impactos frontales con el uso del airbag tipo B.



(a)



(b)

**Figura 56:** Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b).

### 3.8 Criterios de lesiones en impacto Oblicuo sin airbag

#### 3.8.1 Criterio de lesión en la cabeza (HIC)

En los resultados en la Figura 57, de impacto oblicuo se tiene un HIC sin el uso del airbag de 36.49 sin superar el valor de 1000 según lo establecido en el reglamento de las Naciones Unidas.

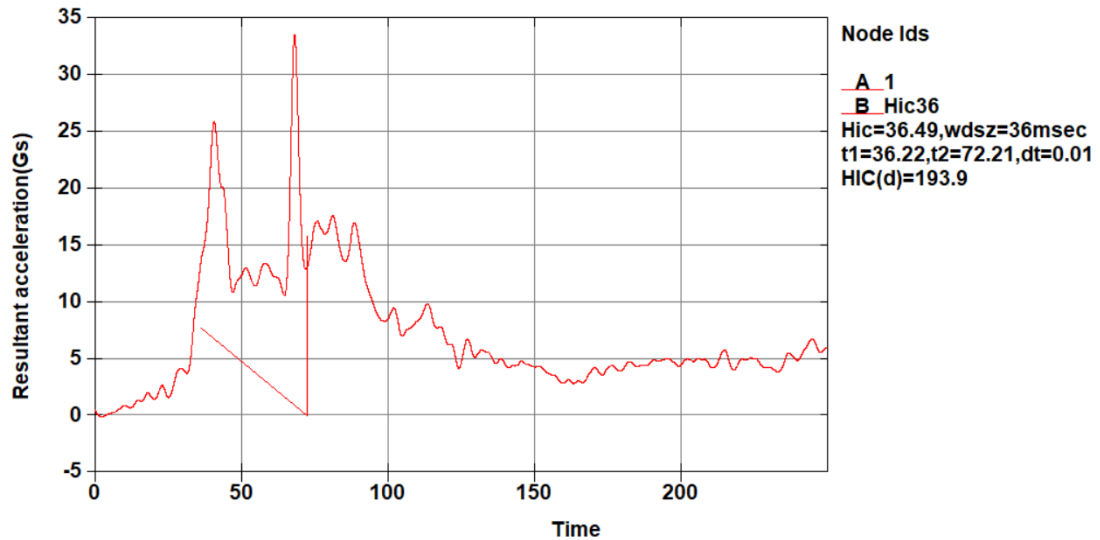


Figura 57: Curva de aceleración resultante vs Tiempo.

#### 3.8.2 Criterio de lesión cerebral (BRIC)

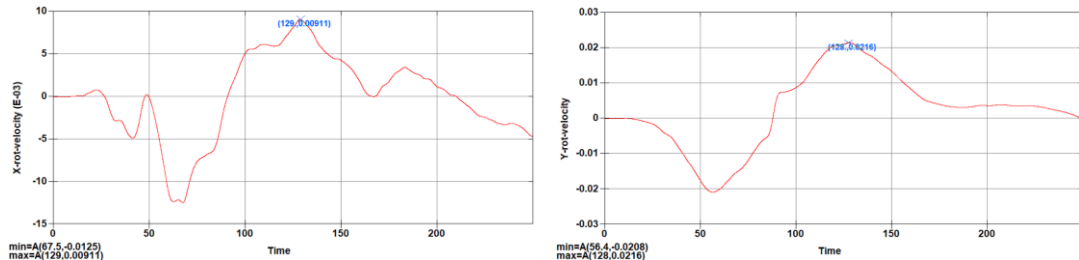
La NHTSA establece que para el cálculo del criterio de lesión del cerebro se mide considerando las velocidades angulares producidas en el acelerómetro de la cabeza del maniquí, dichos valores se calculan con la fórmula mostrada y que el resultado no sobrepase de 1 [39].

$$BrIC = \sqrt{\left(\frac{\max(|\omega_x|)}{\omega_{xc}}\right)^2 + \left(\frac{\max(|\omega_y|)}{\omega_{yc}}\right)^2 + \left(\frac{\max(|\omega_z|)}{\omega_{zc}}\right)^2} \quad [39]$$

Con las velocidades obtenidas en la Figura 58, se obtiene un valor de 1.73 de BrIC en un impacto oblicuo sin airbag, prediciendo que la lesión en el cerebro es elevada debido a que sobrepasa la unidad establecida por la NHTSA.

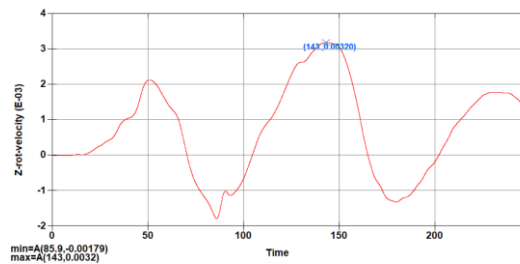
$$BrIC = \sqrt{\left(\frac{\max(|0.00911|)}{0.00911}\right)^2 + \left(\frac{\max(|0.0216|)}{0.0216}\right)^2 + \left(\frac{\max(|0.0032|)}{0.0032}\right)^2}$$

$$BrIC = 1.73$$



(a)

(b)

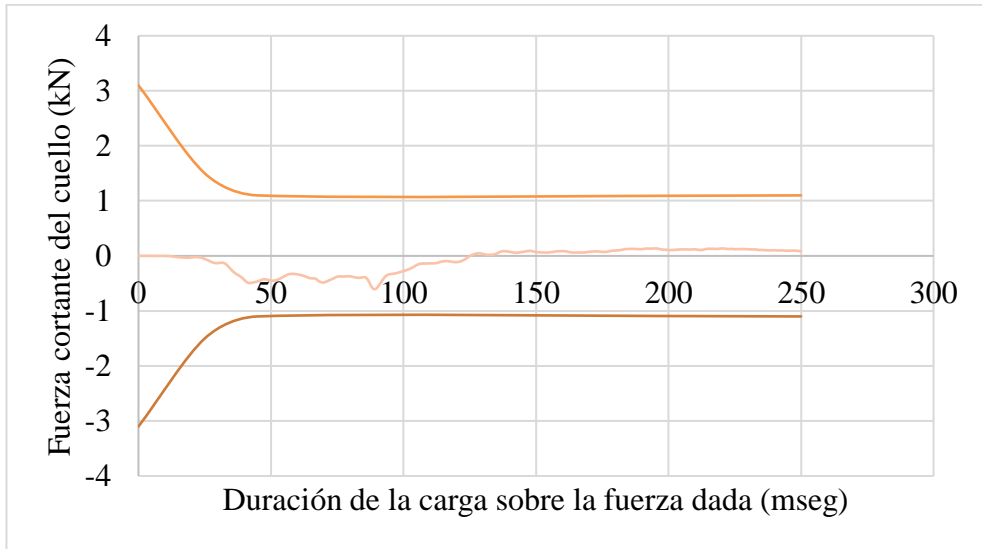


(c)

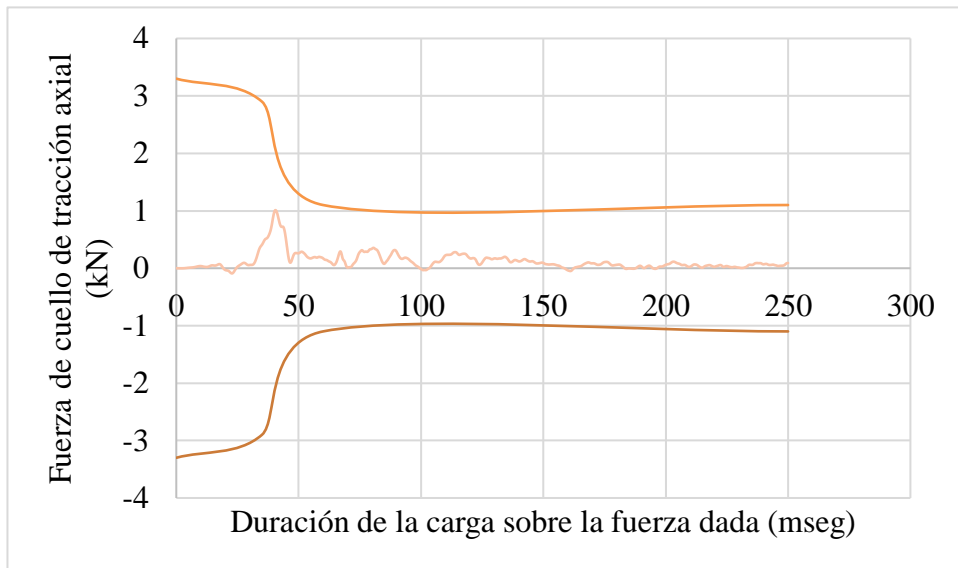
**Figura 58:** Velocidades rotacionales en x (a), y (b), z (c).

### 3.8.3 Criterio de lesiones en el cuello

En la Figura 59, se predijo que en un impacto frontal oblicuo el criterio de tensión y el criterio de fuerza cortante en el cuello durante un impacto frontal oblicuo no sobrepasa el rango establecido por el reglamento de las Naciones Unidas.



(a)

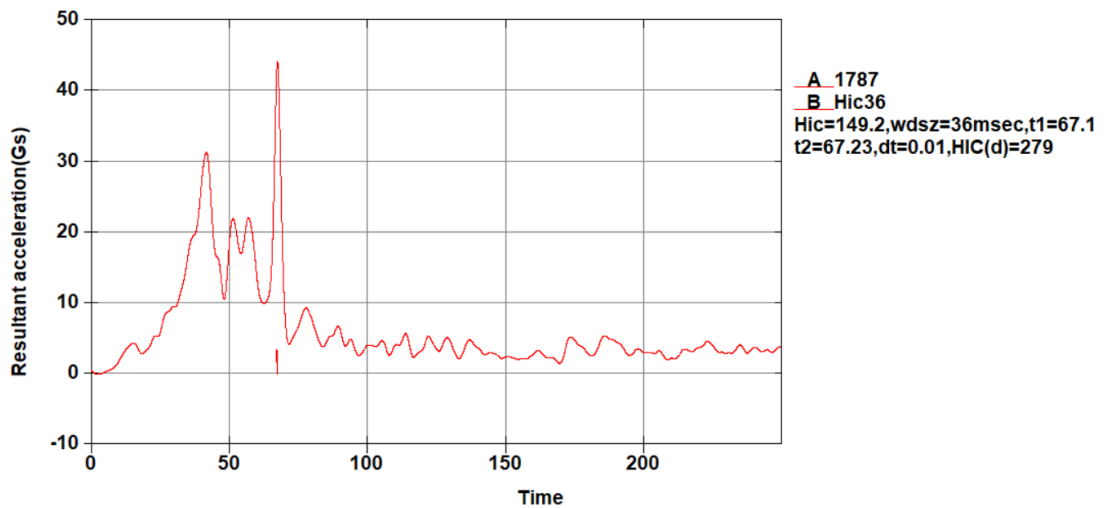


(b)

**Figura 59:** Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión en el cuello (b).

### 3.8.4 Índice de severidad en el pecho

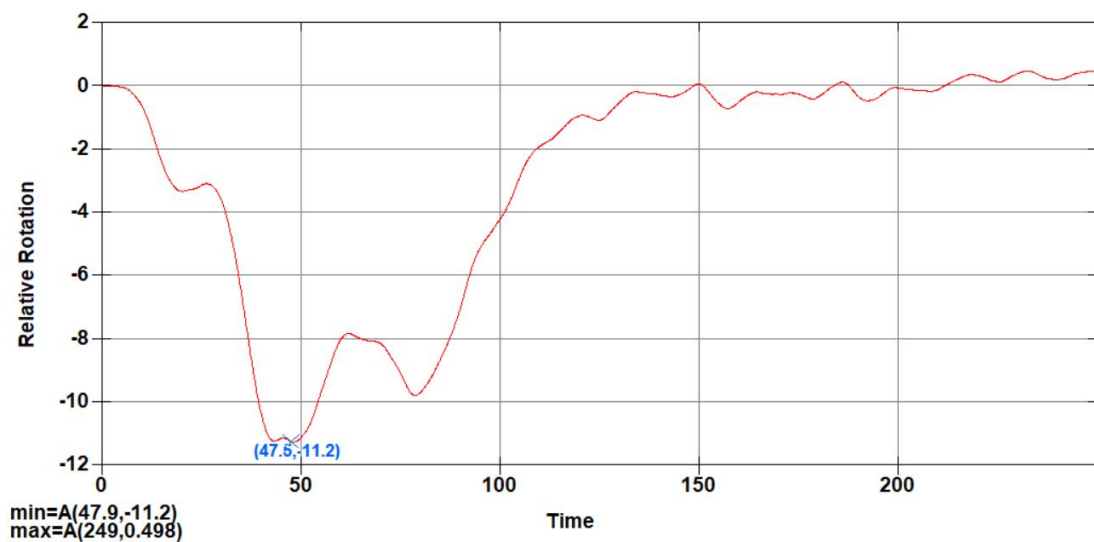
Con la Figura 60, se predijo que el valor de csi no sobrepasó los 1000 que establece el reglamento de las Naciones Unidas teniendo un valor para un impacto oblicuo sin airbag de 109.9, determinando que el uso de bolsa de aire no es necesario.



**Figura 60:** Curva de índice de severidad del pecho.

### 3.8.5 Desplazamiento del tórax

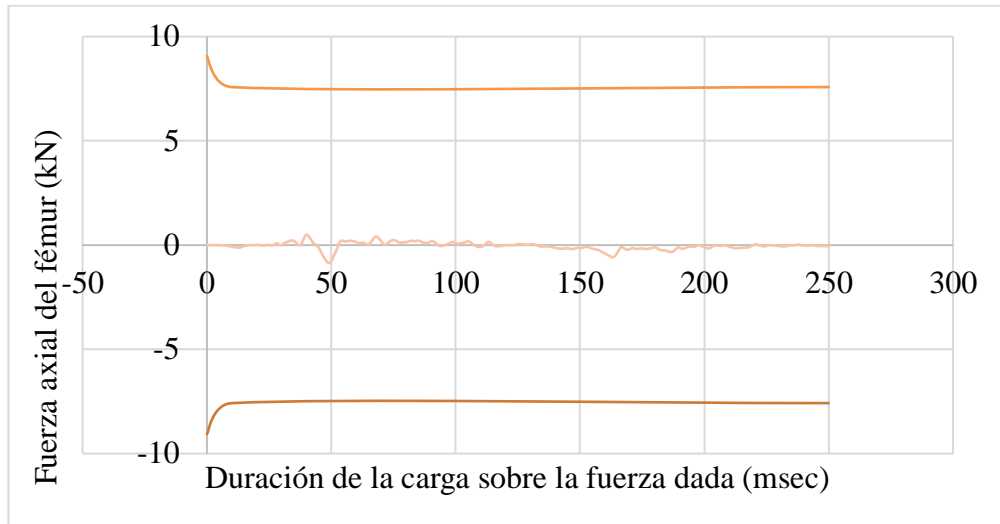
En la Figura 61, se puede verificar que para un impacto oblicuo sin airbag se tiene un desplazamiento del tórax de 11.2 mm que no sobrepasa los 42 mm establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que no es necesario el uso airbag en un impacto oblicuo.



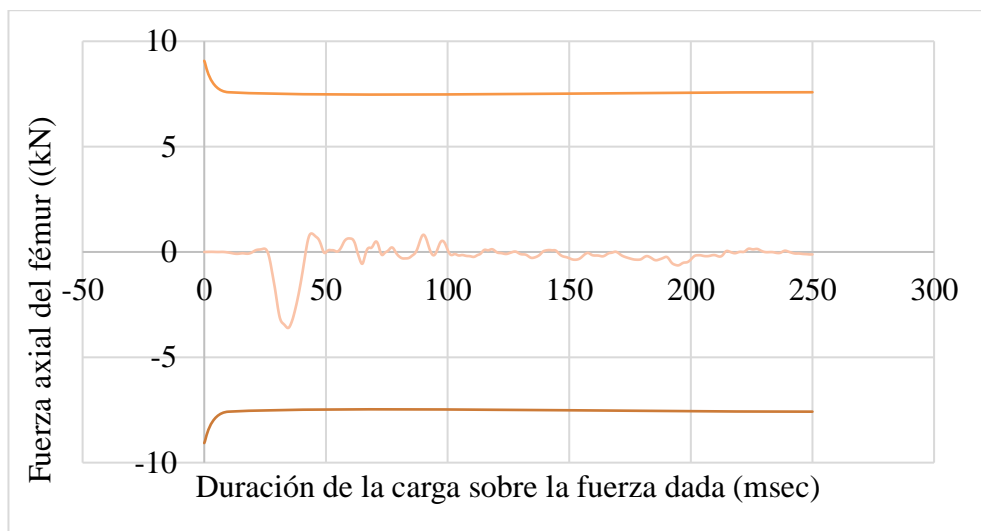
**Figura 61:** Curva de desplazamiento del tórax.

### 3.8.6 Fuerza en los fémures

En la Figura 62 se predijo que la fuerza axial respecto a la duración de la carga sobre la fuerza dada no sobrepasa los rangos establecidos por las Naciones Unidas, comprobando que sin el uso del airbag no se tiene lesiones graves.



(a)

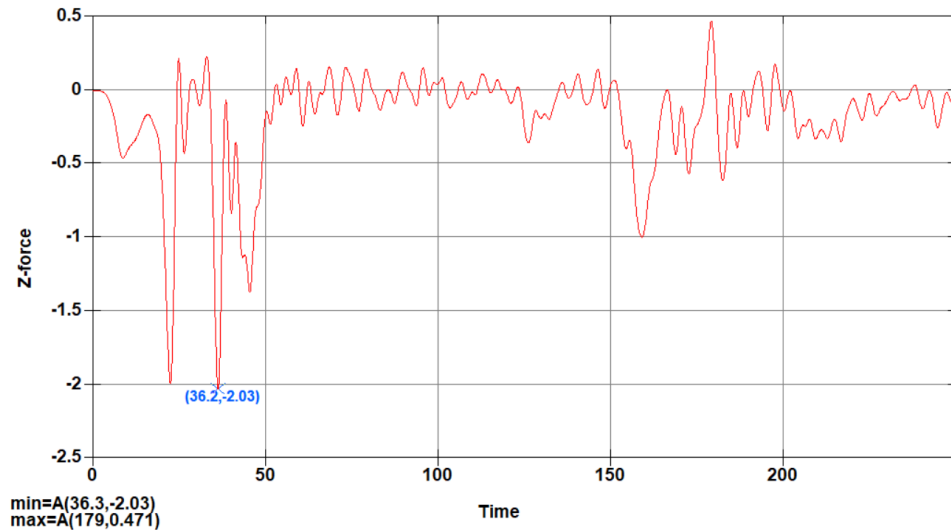


(b)

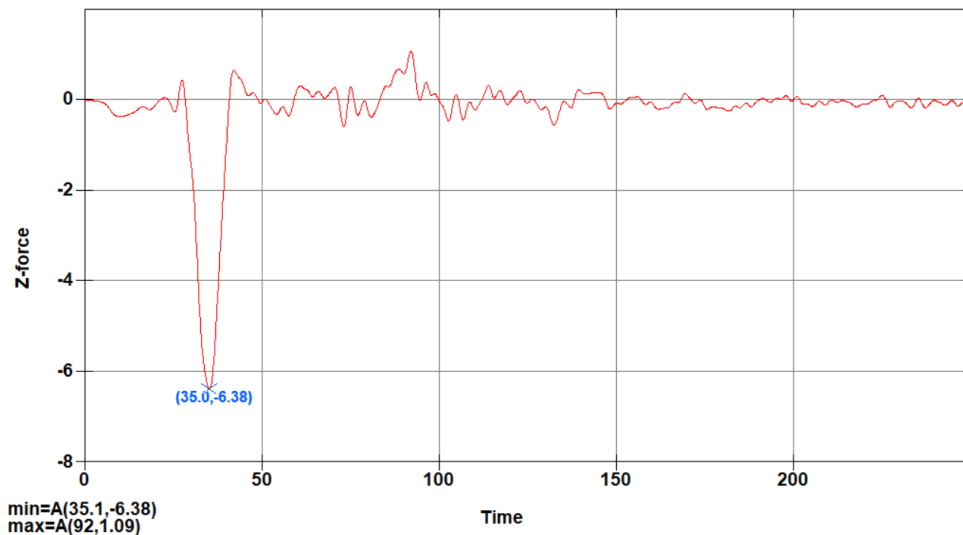
**Figura 62:** Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b).

### 3.8.7 Fuerzas de compresión en las tibias

En la Figura 63, se predijo que existen fuerzas de compresiones para la tibia izquierda de 2.03 kN y para la derecha de 6.38 kN. Tomando en cuenta que ninguno sobrepasa los 8 kN establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, no existen lesiones graves sin el uso de airbag.



(a)

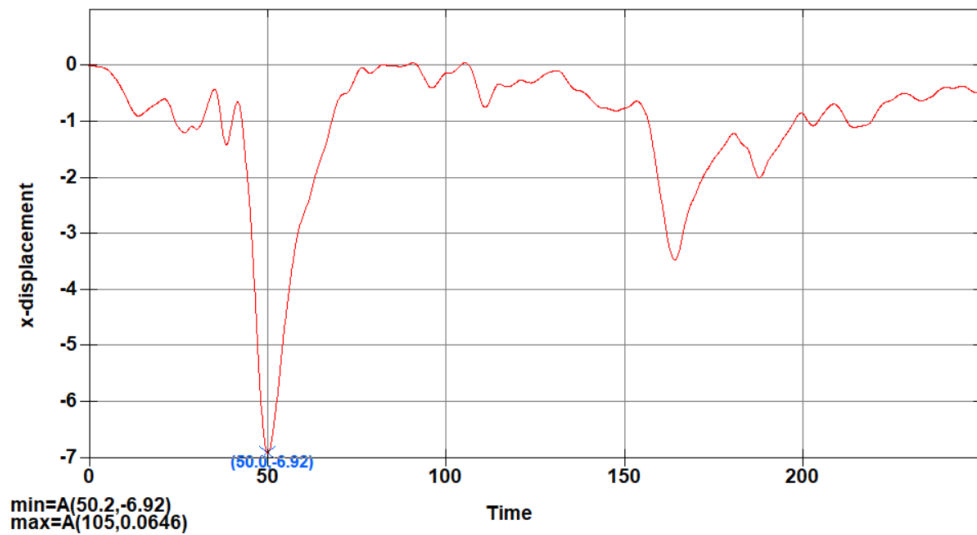


(b)

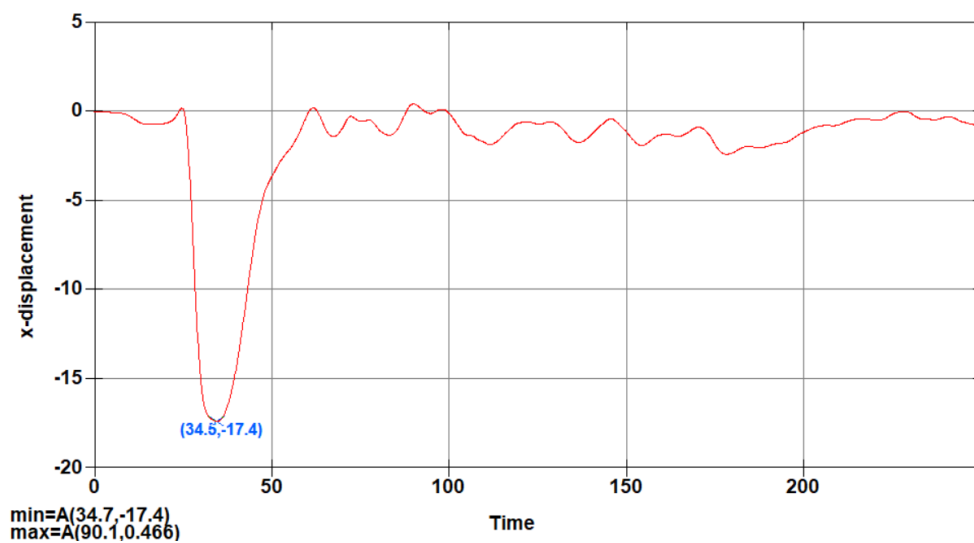
**Figura 63:** Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b).

### 3.8.8 Desplazamiento de las rodillas

En la Figura 64 se tiene un desplazamiento de 6.92 mm en la rodilla izquierda y 17.4 mm en la rodilla derecha, de los cuales el desplazamiento de la rodilla derecha sobrepasa los 15 mm establecidos por las Naciones Unidas, determinando que existe riesgo de lesiones graves en esta zona durante impactos frontales oblicuos sin el uso del airbag.



(a)



(b)

**Figura 64:** Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b).



### 3.9 Criterios de lesiones en un impacto Oblicuo con Airbag A

#### 3.9.1 Criterio de lesión en la cabeza (HIC)

Obtenidos los resultados en la Figura 65, de impacto oblicuo se predijo un HIC con el uso del airbag A de 33.85 sin superar el valor de 1000 según lo establecido en el reglamento de las Naciones Unidas, concluyendo que para este tipo de impactos se puede hacer uso del airbag A.

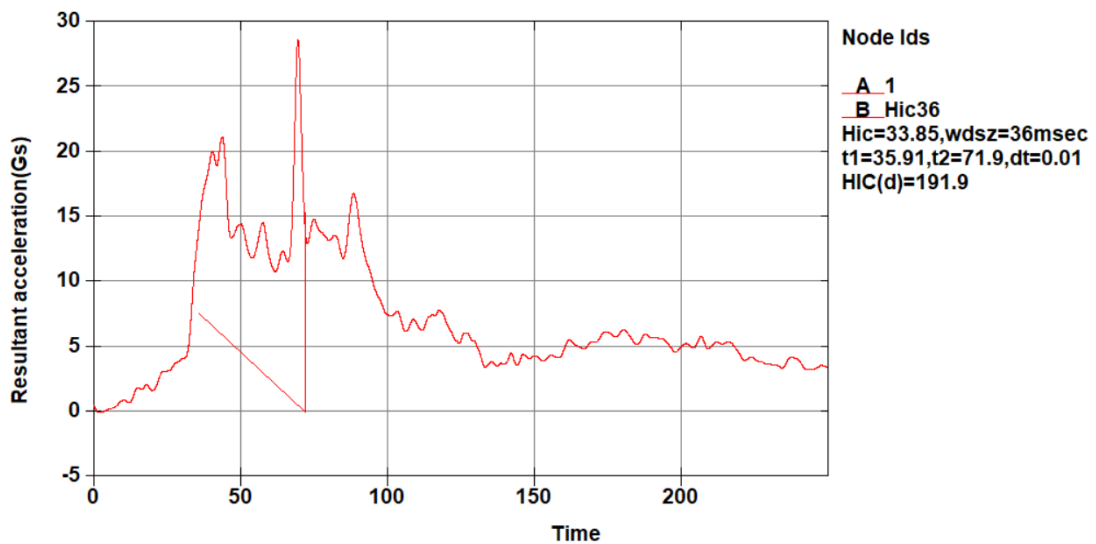


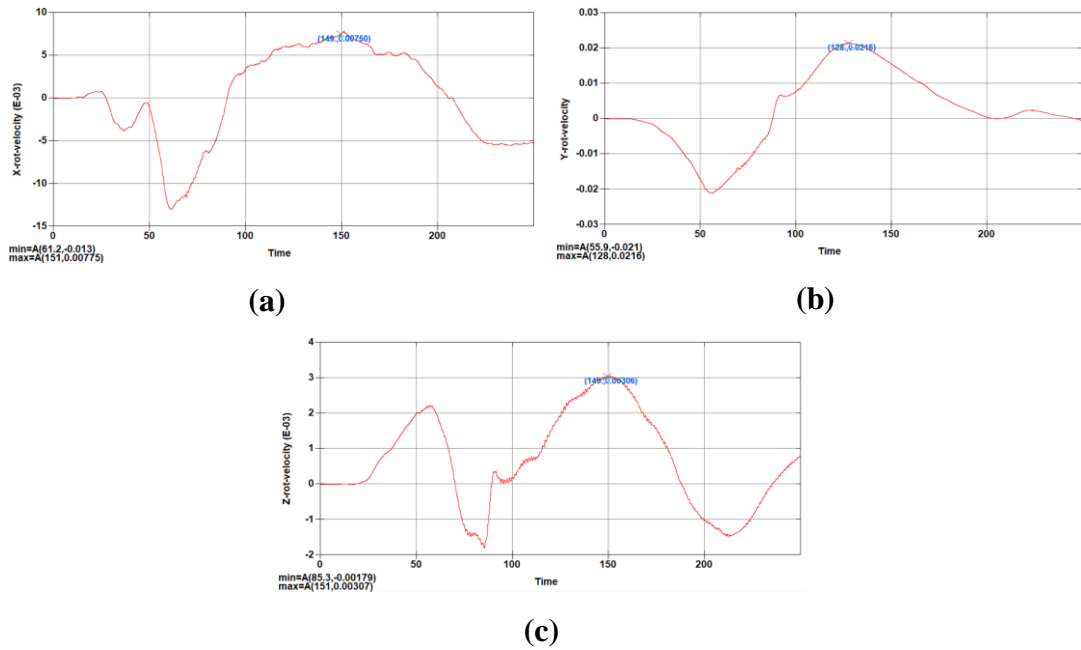
Figura 65: Curva de aceleración resultante vs Tiempo.

#### 3.9.2 Criterio de lesión cerebral (BRIC)

Con las velocidades obtenidas en la Figura 66, se obtiene un valor de 1.73 de BrIC en un impacto oblicuo con el airbag A, prediciendo que la lesión en el cerebro es elevada debido a que sobrepasa la unidad establecida por la NHTSA.

$$BrIC = \sqrt{\left(\frac{\max(|0.00775|)}{0.00775}\right)^2 + \left(\frac{\max(|0.0216|)}{0.0216}\right)^2 + \left(\frac{\max(|0.00307|)}{0.00307}\right)^2}$$

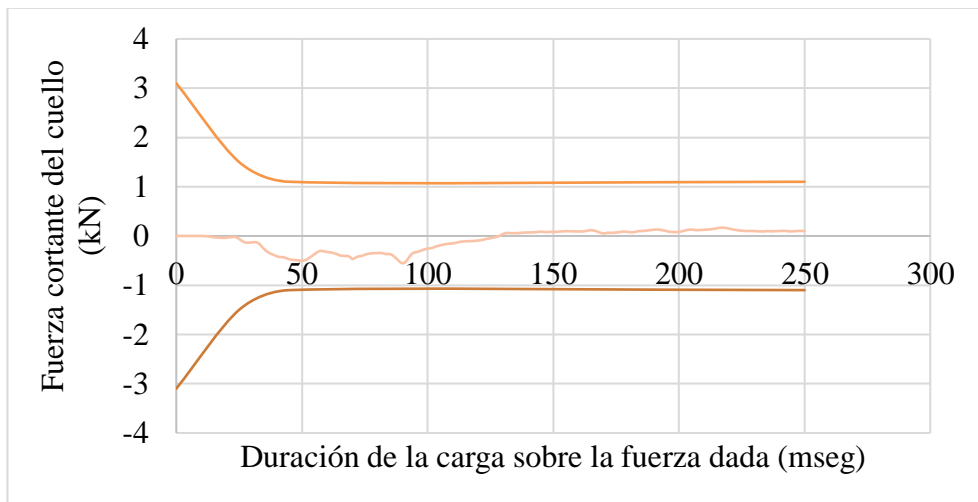
$$BrIC = 1.73$$



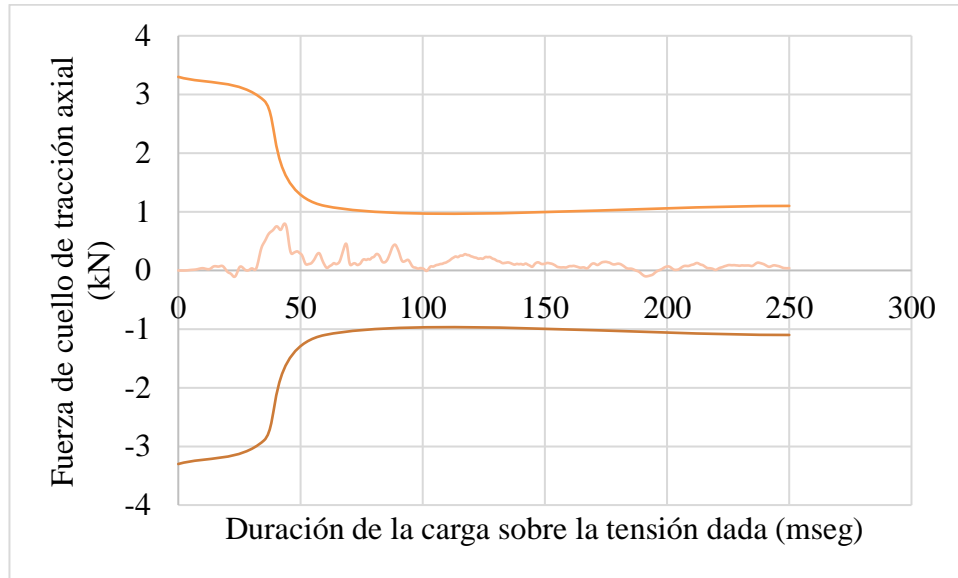
**Figura 66:** Velocidades rotacionales en x (a), y (b), z (c).

### 3.9.3 Criterio de lesiones en el cuello

Obtenidas las curvas de la Figura 67, se deduce que en un impacto frontal el criterio de fuerza cortante y el de tensión en el cuello durante un impacto frontal no sobrepasan los rangos permitidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que el uso de esta bolsa de aire protege al conductor en este tipo de choques.



(a)

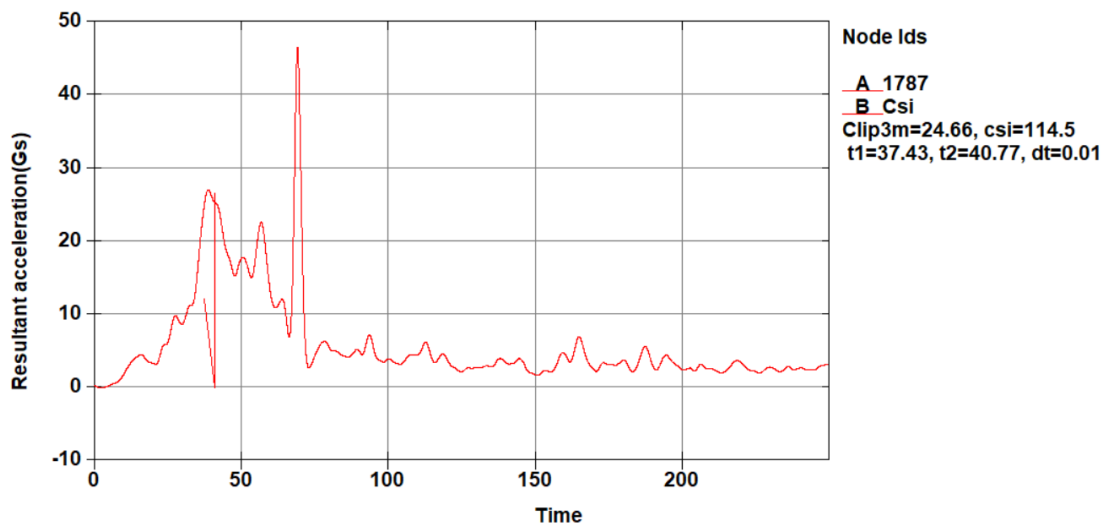


(b)

**Figura 67:** Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello.

### 3.9.4 Índice de severidad en el pecho

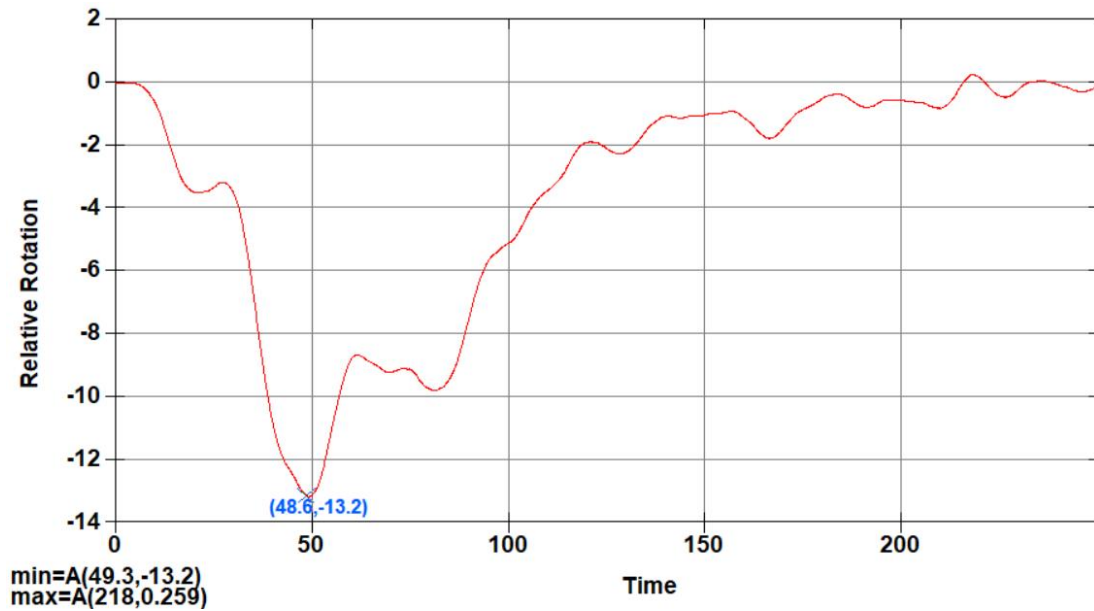
Con la Figura 68, se determina que el valor de csi no sobrepasó los 1000 que establece el reglamento de las Naciones Unidas teniendo un valor para un impacto oblicuo con airbag A de 114.5, determinando que el uso de airbag no es necesario para lesiones en el pecho.



**Figura 68:** Curva de índice de severidad del pecho.

### 3.9.5 Desplazamiento del tórax

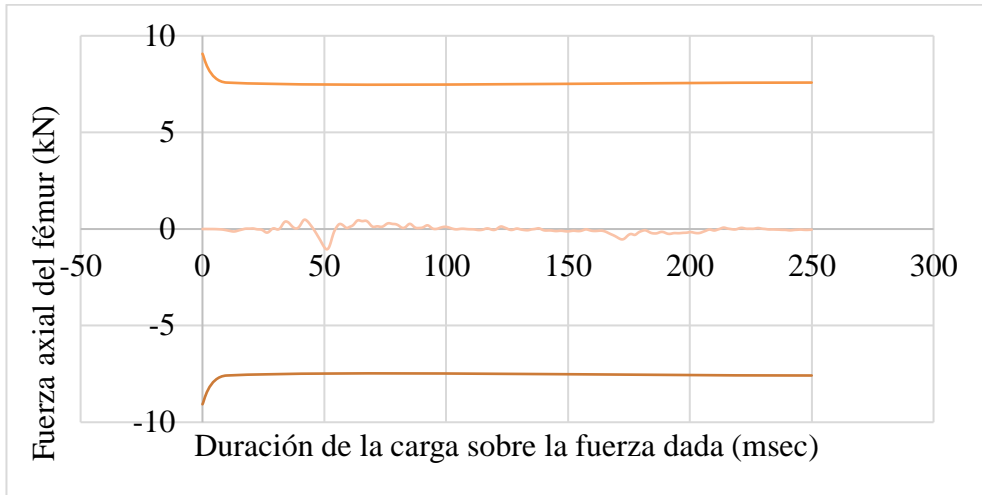
Dada la Figura 69, se puede verificar que para un impacto oblicuo con airbag A se tiene un desplazamiento del tórax de 13.2 mm que no sobrepasa los 42 mm establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que se puede hacer uso de este tipo de airbag en un impacto oblicuo.



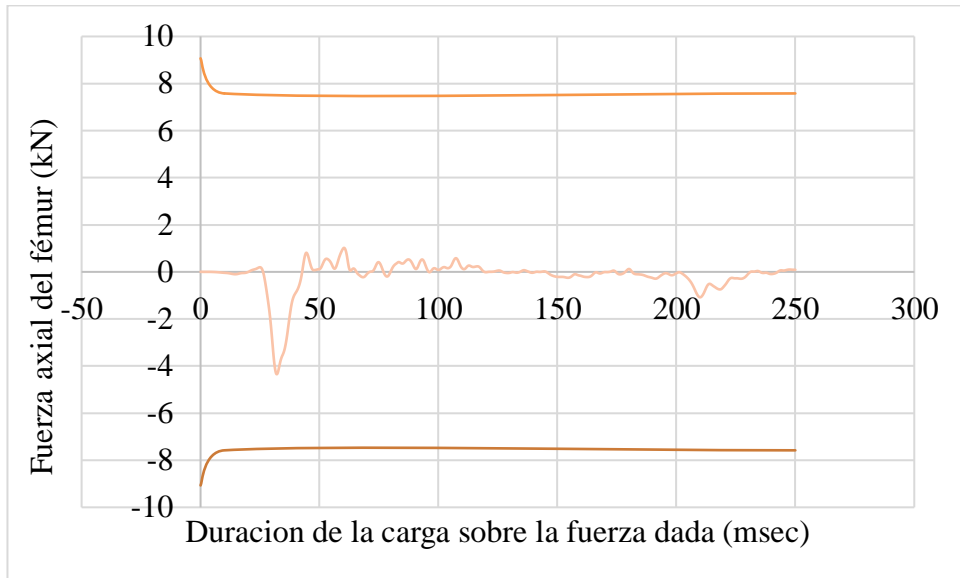
**Figura 69:** Curva de desplazamiento del tórax.

### 3.9.6 Fuerza en los fémures

Dados los resultados mostrados en las curvas de la Figura 70, se verifica que la fuerza axial respecto a la duración de la carga sobre la fuerza dada, no rebasan los rangos establecidos por las Naciones Unidas, comprobando que el uso del airbag tipo A cumple el reglamento.



(a)

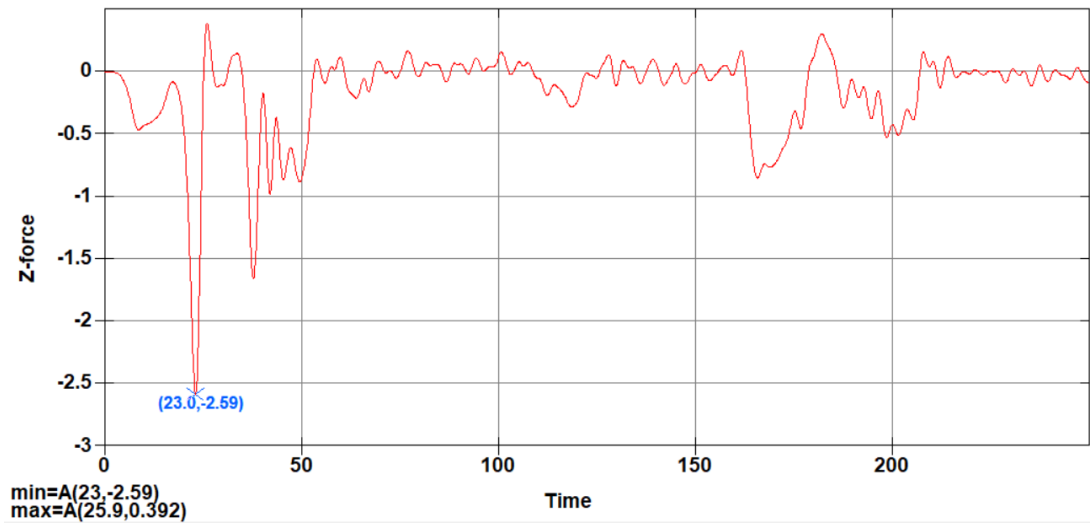


(b)

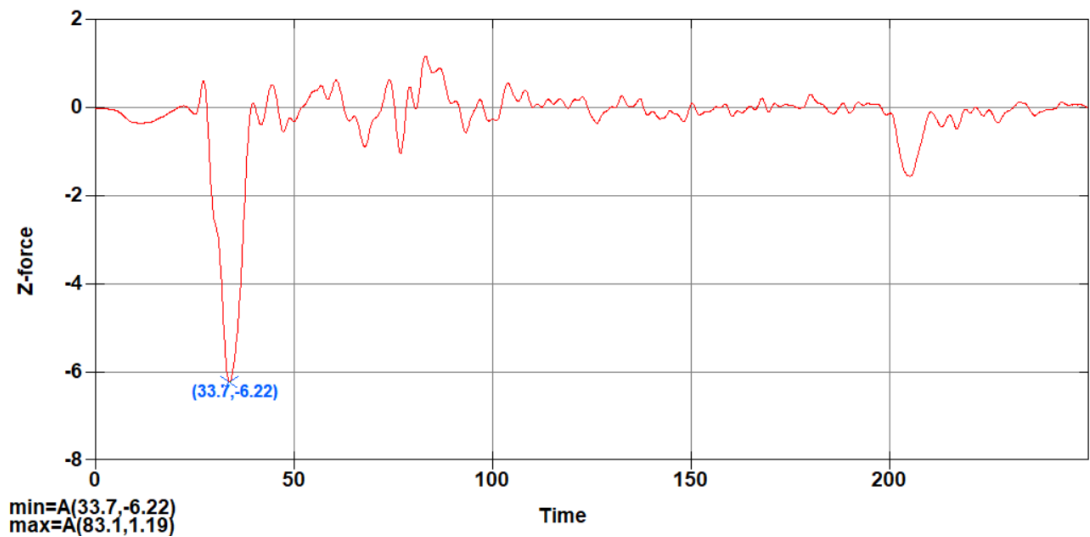
**Figura 70:** Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b).

### 3.9.7 Fuerzas de compresión en las tibias

Con las gráficas de la Figura 71, se puede verificar que existe fuerzas de compresiones para la tibia izquierda de 2.59 kN y para la derecha de 6.22 kN. Tomando en cuenta que ninguno sobrepasa los 8 kN establecidos por el reglamento de las Naciones unidas, no existen lesiones graves con el uso del airbag tipo A.



(a)

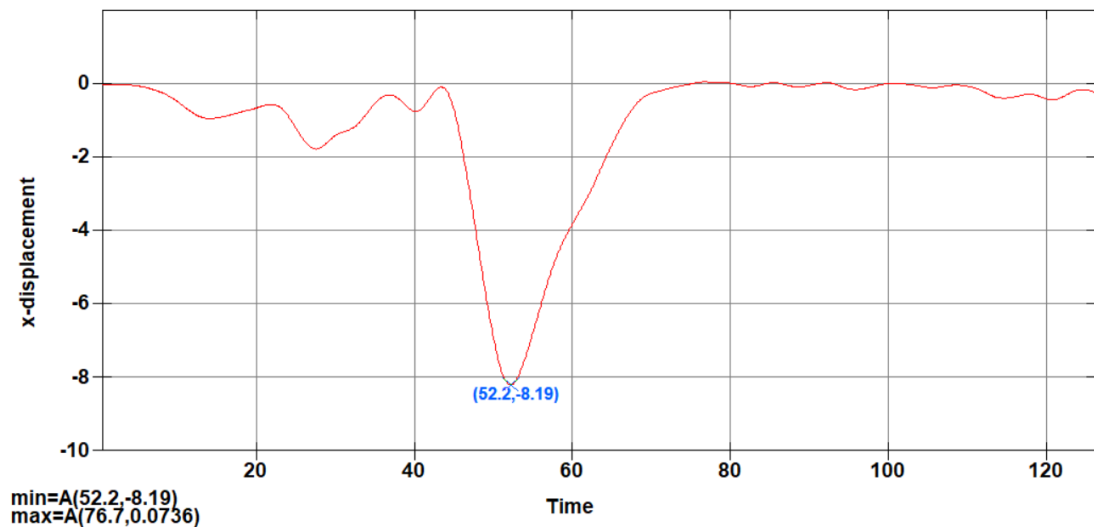


(b)

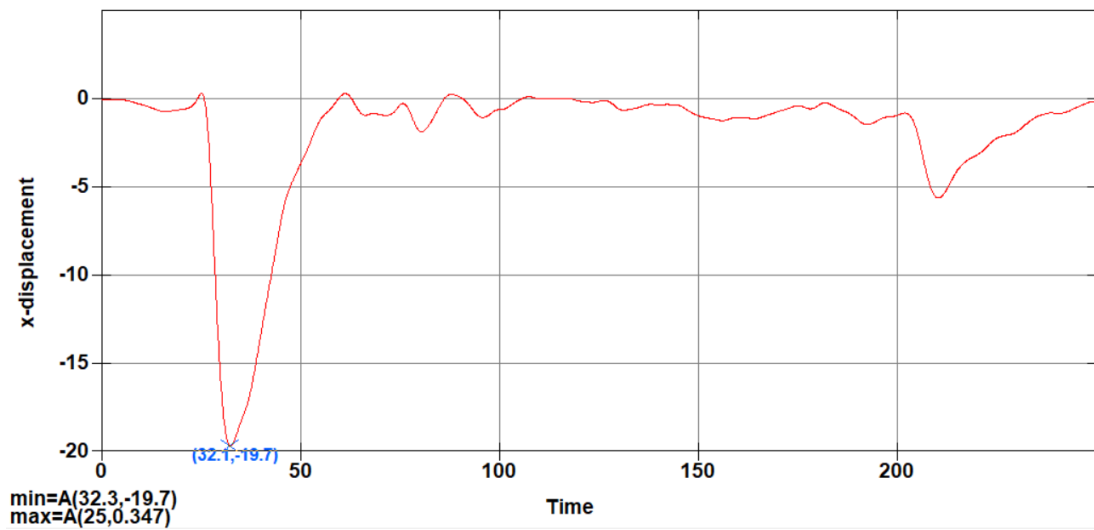
**Figura 71:** Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b).

### 3.9.8 Desplazamiento de las rodillas

La Figura 72, predijo un desplazamiento de 8.19 mm en la rodilla izquierda y 19.7 mm en la rodilla derecha, de los cuales el desplazamiento de la rodilla derecha sobrepasa los 15 mm establecidos por las Naciones Unidas, determinando que existe riesgo de lesiones graves en la zona de las rodillas en impactos frontales oblicuos con el uso del airbag tipo A.



(a)



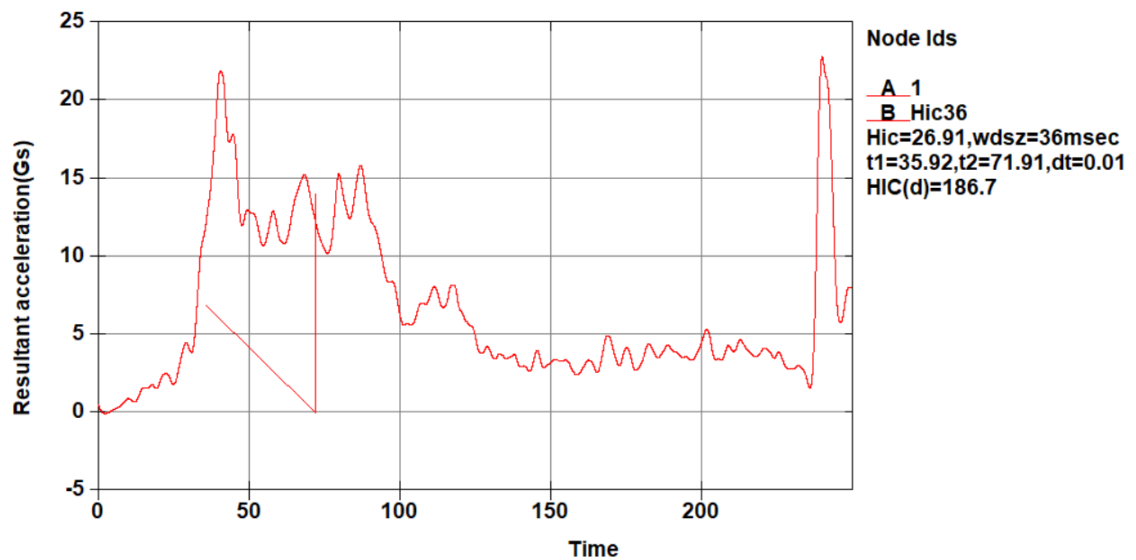
(b)

**Figura 72:** Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b).

### 3.10 Criterios de lesiones en un impacto Oblicuo con Airbag B

#### 3.10.1 Criterio de lesión en la cabeza (HIC)

Obtenidos los resultados en la Figura 73, de impacto oblicuo se tiene un HIC con el uso del airbag B de 26.91 que no supera el valor de 1000 según lo establecido en el reglamento de las Naciones Unidas.



**Figura 73:** Curva de aceleración resultante vs Tiempo.

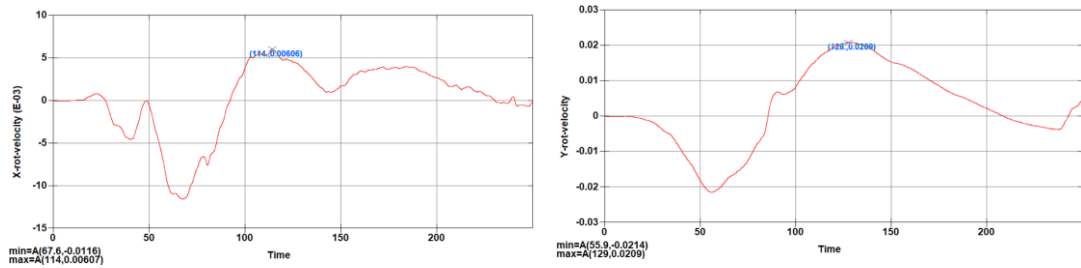
### 3.10.2 Criterio de lesión cerebral (BRIC)

Con las velocidades obtenidas en la Figura 74, se obtiene un valor de 1.73 de BrIC en un impacto oblicuo con el airbag A, prediciendo que la lesión en el cerebro es elevada debido a que sobrepasa la unidad establecida por la NHTSA.

$$BrIC = \sqrt{\left(\frac{\max(|0.00607|)}{0.00607}\right)^2 + \left(\frac{\max(|0.0209|)}{0.0209}\right)^2 + \left(\frac{\max(|0.00531|)}{0.00531}\right)^2}$$

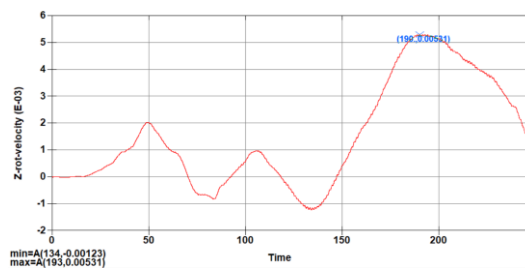
$$BrIC = 1.73$$





(a)

(b)

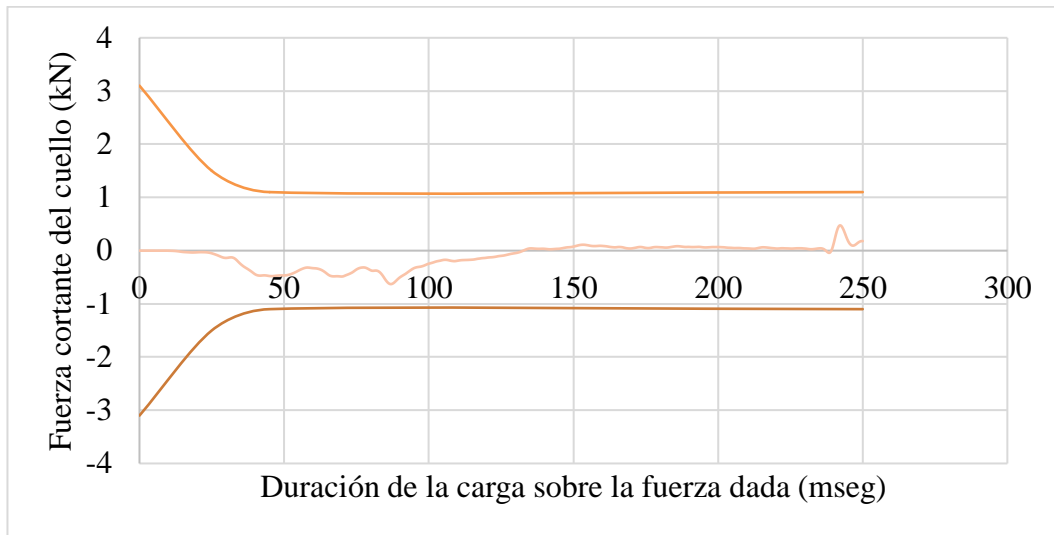


(c)

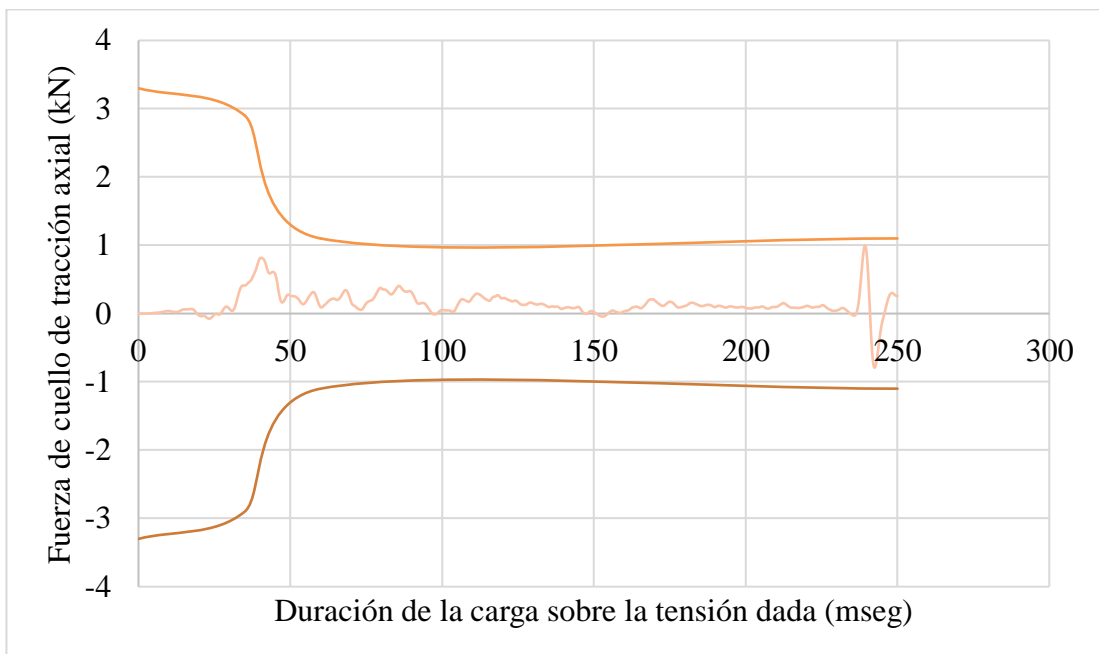
**Figura 74:** Velocidades rotacionales en x (a), y (b), z (c).

### 3.10.3 Criterio de lesiones en el cuello

En la Figura 75, se predijo que en un impacto oblicuo el criterio de fuerza cortante y el de tensión en el cuello durante un impacto frontal no sobrepasan los rangos permitidos por el reglamento de las naciones unidas, determinando que el uso de este tipo de airbag al igual que el anterior pueden reducir lesiones graves en el conductor.



(a)

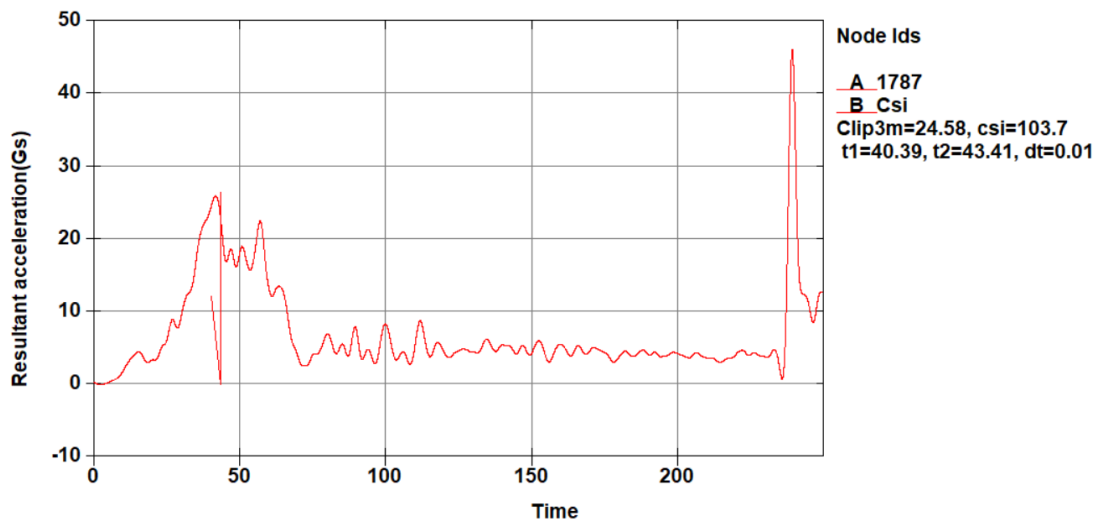


(b)

**Figura 75:** Curvas de criterio de fuerza cortante (a) y tensión (b) en el cuello.

### 3.10.4 Índice de severidad en el pecho

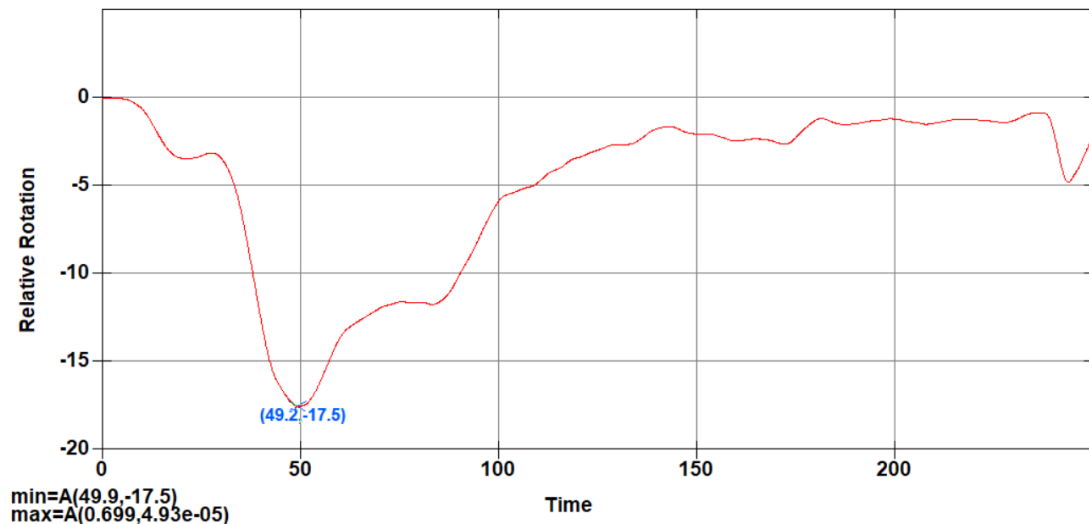
Con la Figura 76, se determina que el valor de csi no sobrepasó los 1000 que establece el reglamento de las naciones teniendo un valor para un impacto oblicuo con airbag B de 103.7, determinando que el uso de airbag no es necesario para lesiones en el pecho.



**Figura 76:** Curva de índice de severidad del pecho.

### 3.10.5 Desplazamiento del tórax

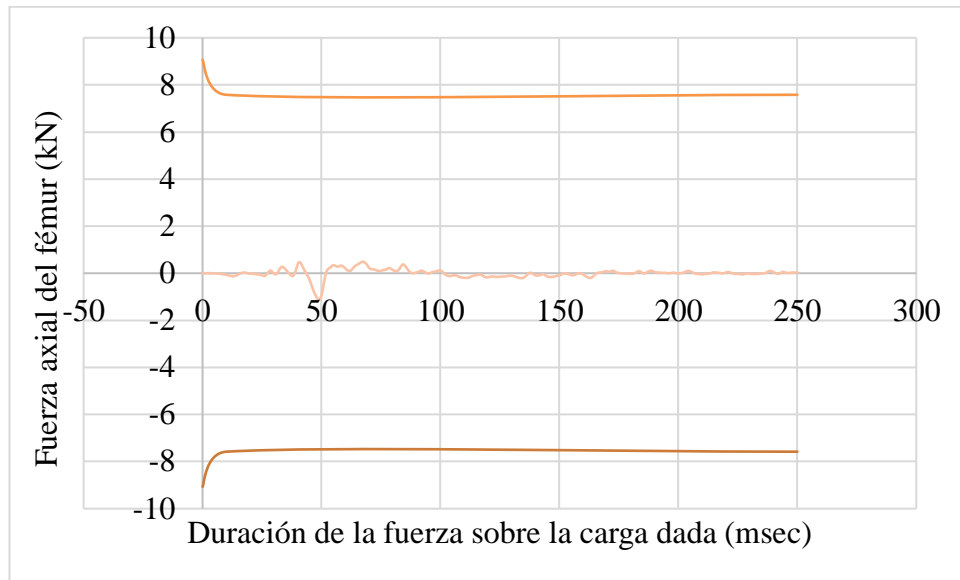
Dada la Figura 77, se puede verificar que para un impacto oblicuo con airbag B se tiene un desplazamiento del tórax de 17.5 mm que no sobrepasa los 42 mm establecidos por el reglamento de las Naciones Unidas, determinando que es posible el uso de este airbag en un impacto oblicuo.



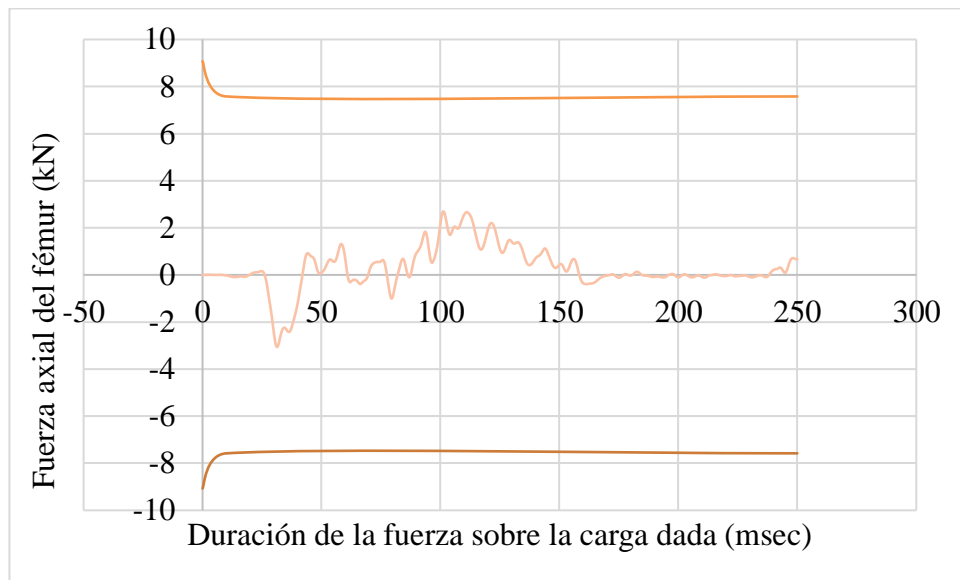
**Figura 77:** Curva de desplazamiento del tórax.

### 3.10.6 Fuerza en los fémures

En la Figura 78, se predijo que la fuerza axial respecto a la duración de la carga sobre la fuerza dada, no rebasan los rangos establecidos por las Naciones Unidas, comprobando que el uso del airbag tipo B cumple el reglamento.



(a)

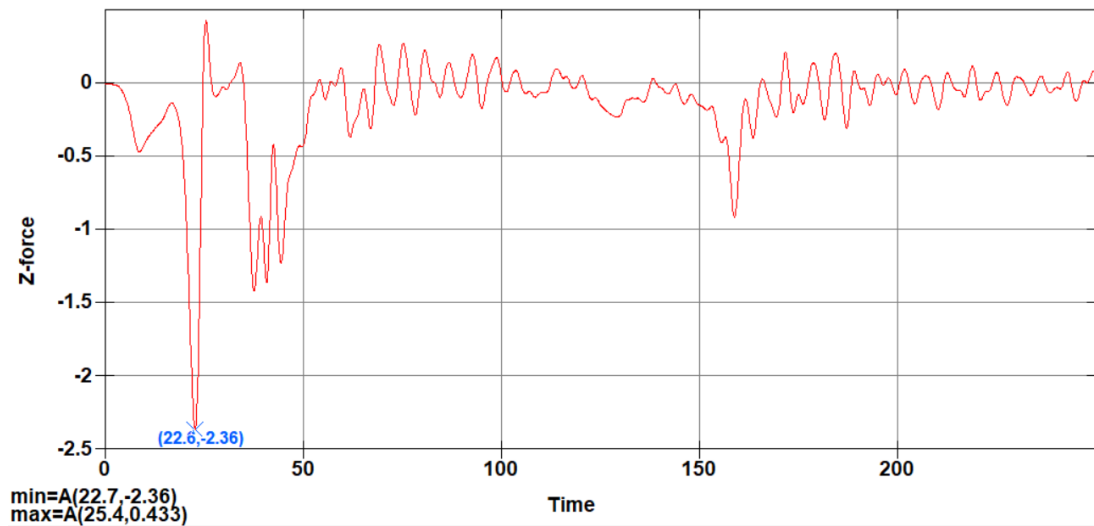


(b)

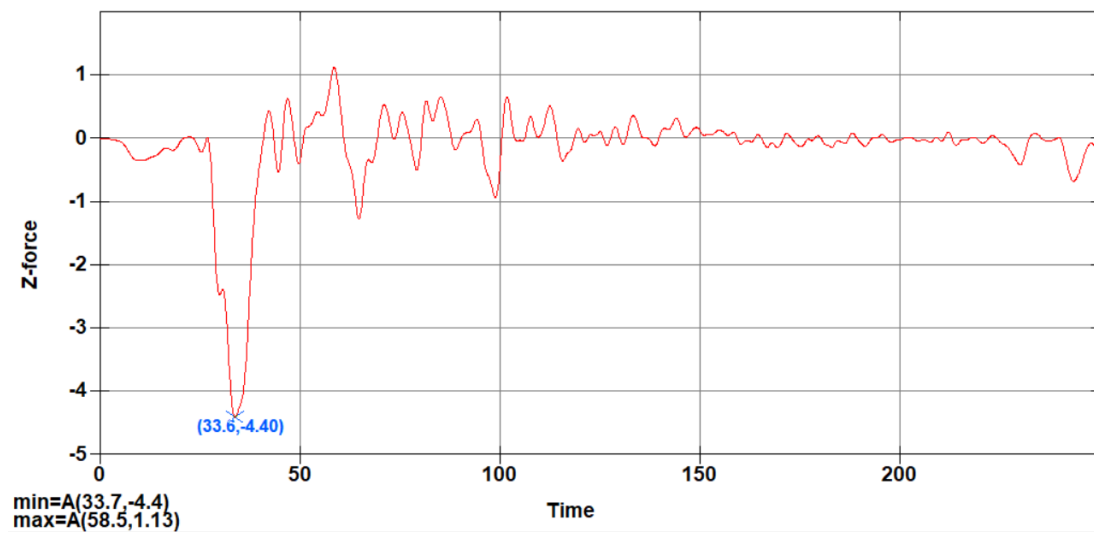
**Figura 78:** Curvas de criterio de fuerza del fémur izquierdo (a) y derecho (b).

### 3.10.7 Fuerza de compresión en las tibias

Con las curvas de la Figura 79, se predijo que existe fuerzas de compresiones para la tibia izquierda de 2.36 kN y para la derecha de 4.4 kN. Tomando en cuenta que ninguno sobrepasa los 8 kN establecidos por el reglamento de las Naciones unidas, no existen lesiones graves con el uso del airbag B.



(a)

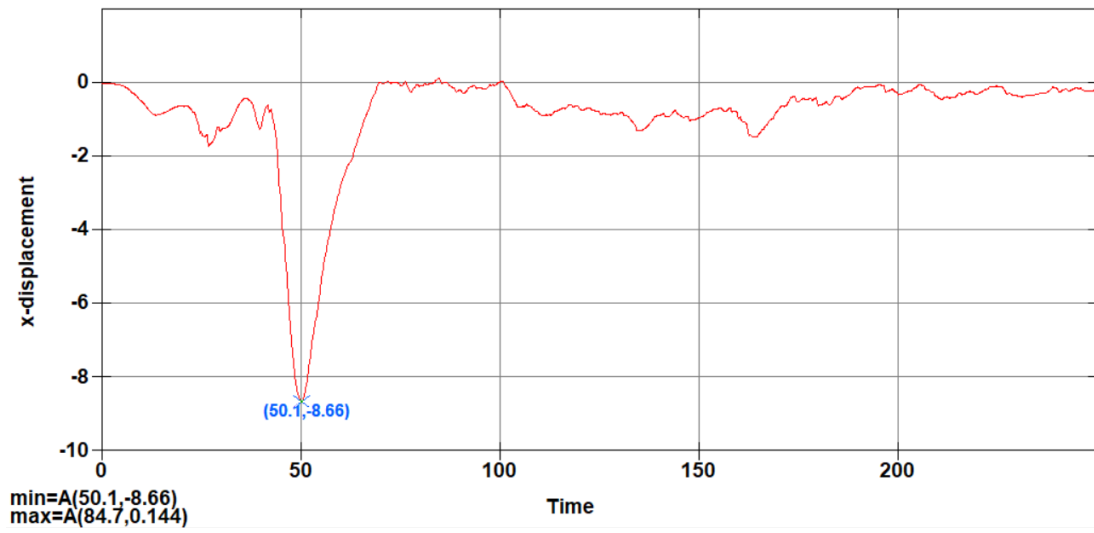


(b)

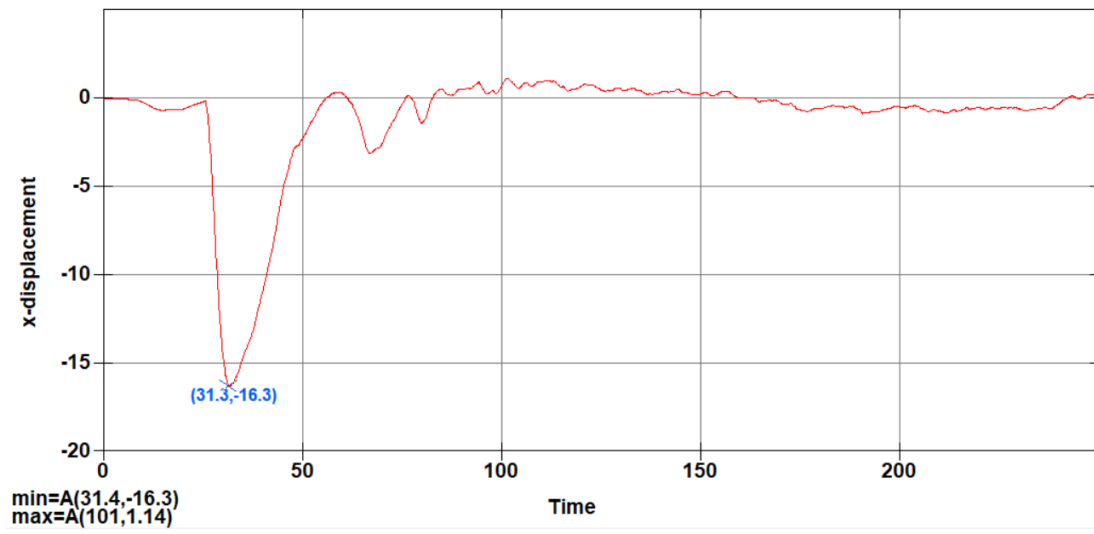
**Figura 79:** Curva de fuerza de compresión de la tibia izquierda (a) y derecha (b).

### 3.10.8 Desplazamiento de las rodillas

En la Figura 80 se tiene un desplazamiento de 8.66 mm en la rodilla izquierda y 16.3 mm en la rodilla derecha, de los cuales el desplazamiento de la rodilla derecha sobrepasa los 15 mm establecidos por las Naciones Unidas, determinando que existe riesgo de lesiones graves en la zona de las rodillas en impactos frontales oblicuos con el uso del airbag tipo B.



(a)



(b)

**Figura 80:** Curva de desplazamiento de rodilla izquierda (a) y derecha (b).

### 3.10.9 Resumen de resultados

**Tabla 12:** Tabla de resumen de resultados.

Impactos	Criterios		Resultado	Rango	Cumple/No cumple
Frontal sin Airbag	De lesión en la cabeza		406.5	No superar 1000	Cumple
	Lesiones en el cuello	Fuerza Cortante	Visualizar Figura 37	Visualizar Figura 37	Cumple
		Fuerza de tensión	Visualizar Figura 37	Visualizar Figura 37	No cumple
	Índice de severidad del pecho		164.1	No superar 1000	Cumple
	Deformación del pecho		21.4	No superar 42 mm	Cumple
	Fuerzas del fémur	Fémur izquierdo	Visualizar Figura 40	Visualizar Figura 40	Cumple
		Fémur derecho	Visualizar Figura 40	Visualizar Figura 40	Cumple
	Compresión de la tibia	Tibia izquierda	6.62 kN	No exceder en 8 kN	Cumple

<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
		Tibia derecha	3.24 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
	Desplazamiento de rodillas	Rodilla izquierda	5.78 mm	No exceder 15 mm	Cumple
		Rodilla derecha	8.87 mm	No exceder 15 mm	Cumple
Frontal con airbag tipo A	De lesión en la cabeza		800.2	No superar 1000	Cumple
	Lesiones en el cuello	Fuerza Cortante	Visualizar Figura 44	Visualizar Figura 44	No cumple
		Fuerza de tensión	Visualizar Figura 44	Visualizar Figura 44	No cumple
	Índice de severidad del pecho		181.5	No superar 1000	Cumple
	Deformación del pecho		22.3	No superar 42 mm	Cumple
	Fuerzas del fémur	Fémur izquierdo	Visualizar Figura 47	Visualizar Figura 47	Cumple



<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
		Fémur derecho	Visualizar Figura 47	Visualizar Figura 47	Cumple
	Compresión de la tibia	Tibia izquierda	6.07 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
		Tibia derecha	3.39 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
	Desplazamiento de rodillas	Rodilla izquierda	4.53 mm	No exceder 15 mm	Cumple
		Rodilla derecha	9.44 mm	No exceder 15 mm	Cumple
	Frontal con airbag tipo B	De lesión en la cabeza		854.4	No superar 1000
Lesiones en el cuello		Fuerza Cortante	Visualizar Figura 51	Visualizar Figura 51	No cumple
		Fuerza de tensión	Visualizar Figura 51	Visualizar Figura 51	No cumple
Índice de severidad del pecho		187.7	No superar 1000	Cumple	

<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
	Deformación del pecho		21.8	No superar 42 mm	Cumple
	Fuerzas del fémur	Fémur izquierdo	Visualizar Figura 54	Visualizar Figura 54	Cumple
		Fémur derecho	Visualizar Figura 54	Visualizar Figura 54	Cumple
	Compresión de la tibia	Tibia izquierda	3.47 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
		Tibia derecha	3.79 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
	Desplazamiento de rodillas	Rodilla izquierda	4.29 mm	No exceder 15 mm	Cumple
		Rodilla derecha	12.4 mm	No exceder 15 mm	Cumple
	Oblicuo sin airbag	De lesión en la cabeza		36.49	No superar 1000
De lesión cerebral		1.73	No superar la unidad	No cumple	

<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
	Lesiones en el cuello	Fuerza Cortante	Visualizar Figura 59	Visualizar Figura 59	Cumple
		Fuerza de tensión	Visualizar Figura 59	Visualizar Figura 59	Cumple
	Índice de severidad del pecho		109.9	No exceder 1000	Cumple
	Deformación del pecho		11.2 mm	No superar 42 mm	Cumple
	Fuerzas del fémur	Fémur izquierdo	Visualizar Figura 62	Visualizar Figura 62	Cumple
		Fémur derecho	Visualizar Figura 62	Visualizar Figura 62	Cumple
	Compresión de la tibia	Tibia izquierda	2.03 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
		Tibia derecha	6.38 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
	Desplazamiento de rodillas	Rodilla izquierda	6.92 mm	No exceder 15 mm	Cumple

<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
		Rodilla derecha	17.4 mm	No exceder 15 mm	No cumple
Oblicuo con airbag tipo A	De lesión en la cabeza		33.85	No superar 1000	Cumple
	De lesión cerebral		1.73	No superar la unidad	No cumple
	Lesiones en el cuello	Fuerza Cortante	Visualizar Figura 67	Visualizar Figura 67	Cumple
		Fuerza de tensión	Visualizar Figura 67	Visualizar Figura 67	Cumple
	Índice de severidad del pecho		114.5	No exceder 1000	Cumple
	Deformación del pecho		13.2 mm	No superar 42 mm	Cumple
	Fuerzas del fémur	Fémur izquierdo	Visualizar Figura 70	Visualizar Figura 70	Cumple
		Fémur derecho	Visualizar Figura 70	Visualizar Figura 70	Cumple

<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
	Compresión de la tibia	Tibia izquierda	2.59 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
		Tibia derecha	6.22 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
	Desplazamiento de rodillas	Rodilla izquierda	8.19 mm	No exceder 15 mm	Cumple
		Rodilla derecha	19.07 mm	No exceder 15 mm	No cumple
Oblicuo con airbag tipo B	De lesión en la cabeza		26.91	No superar 1000	Cumple
	De lesión cerebral		1.73	No superar la unidad	No cumple
	Lesiones en el cuello	Fuerza Cortante	Visualizar Figura 75	Visualizar Figura 75	Cumple
		Fuerza de tensión	Visualizar Figura 75	Visualizar Figura 75	Cumple
Índice de severidad del pecho		103.7	No exceder 1000	Cumple	

<b>Impactos</b>	<b>Criterios</b>		<b>Resultado</b>	<b>Rango</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
	Deformación del pecho		17.5 mm	No superar 42 mm	Cumple
	Fuerzas del fémur	Fémur izquierdo	Visualizar Figura 78	Visualizar Figura 78	Cumple
		Fémur derecho	Visualizar Figura 78	Visualizar Figura 78	Cumple
	Compresión de la tibia	Tibia izquierda	2.36 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
		Tibia derecha	4.4 kN	No exceder en 8 kN	Cumple
	Desplazamiento de rodillas	Rodilla izquierda	8.66 mm	No exceder 15 mm	Cumple
		Rodilla derecha	16.3 mm	No exceder 15 mm	No cumple

De la Tabla 12 en impactos frontales se puede observar que existen lesiones graves en el cuello, ya sea sin el uso del airbag o con los tipos A y B, pero se verificó que los resultados de este tipo de lesiones van aumentando con el uso de las bolsas de aire. Por otro lado, en impactos frontales oblicuos existen lesiones graves cerebrales y en la rodilla derecha sin el uso del airbag y con los tipos A y B.

**Tabla 13:** Porcentaje de cumplimiento de criterios de lesiones del maniquí en impactos frontales.

<b>Impacto frontal</b>			
	Sin airbag	Con airbag tipo A	Con airbag tipo B
Porcentaje de cumplimiento de criterios	90.91 %	81.82 %	81.82 %

Con datos extraídos de la Tabla 12 del presente trabajo investigativo, se realizó un conteo de 13 lesiones en total por cada impacto frontal según establece el reglamento R94, haciendo una equivalencia de cada lesión al 7.69% y que todas equivalgan al 100%, indicando en la Tabla 13 que en un impacto frontal sin airbag no se obtendrán lesiones en un 90.91%, con el airbag tipo A y tipo B en un 81.82%.

**Tabla 14:** Porcentaje de cumplimiento de criterios de lesiones del maniquí en impactos frontales oblicuos.

<b>Impacto frontal Oblicuo</b>			
	Sin airbag	Con airbag tipo A	Con airbag tipo B
Porcentaje de cumplimiento de criterios	83.33 %	83.33 %	83.33 %

De igual manera, con datos extraídos de la Tabla 12 del presente trabajo investigativo, se realizó un conteo de 14 lesiones en total por cada impacto oblicuo según establece el reglamento R94, haciendo una equivalencia de cada lesión al 7.69% y que todas equivalgan al 100%, indicando en la Tabla 14 que en un impacto oblicuo sin airbag, con el airbag tipo A y tipo B no se obtendrán lesiones en un 83.33%.

### 3.11 Verificación de energía de Hourglass

Esta energía permite verificar que la simulación esté realizada correctamente, para ello se puede tomar en cuenta dos parámetros, el primero es aproximando los valores de la energía a cero y el segundo es que la energía de hourglass debe ser menor al diez por ciento de la energía interna [29]. Por otro lado, el mallado también juega un factor importante, porque al tener un tamaño de malla elevado, el control sobre la simulación va a ser difícil. Para la presente investigación, se utilizó un tamaño de malla de 50 mm, con el cual se redujo el tiempo de simulación. A continuación, se muestra el comportamiento de la energía de hourglass para cada simulación.

#### 3.11.1 Energía de Hourglass en Impacto frontal sin airbag

Se tiene que la energía interna es de  $1.79 \times 10^5$  y que la energía de hourglass tiene un valor de  $4.38 \times 10^3$  siendo mucho menor al 10% de la energía interna que equivale al 17900, como se observa en la Figura 81.

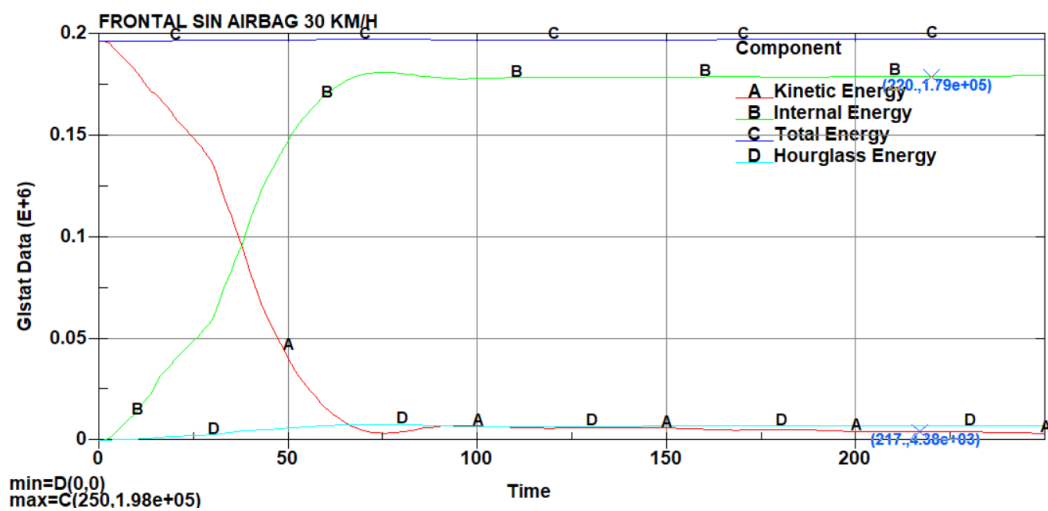
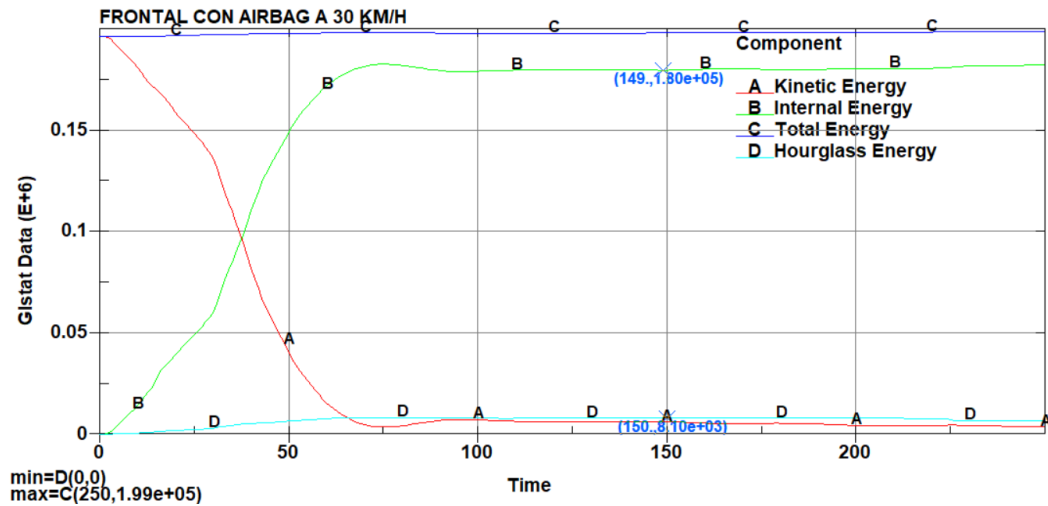


Figura 81: Gráfica de impacto frontal sin airbag de energías vs tiempo.

#### 3.11.2 Energía de Hourglass en Impacto frontal con airbag tipo A

Se tiene que la energía interna es de  $1.80 \times 10^5$  y que la energía de hourglass tiene un valor de  $8.10 \times 10^3$  siendo mucho menor al 10% de la energía interna que equivale al 18000, como se observa en la Figura 82.

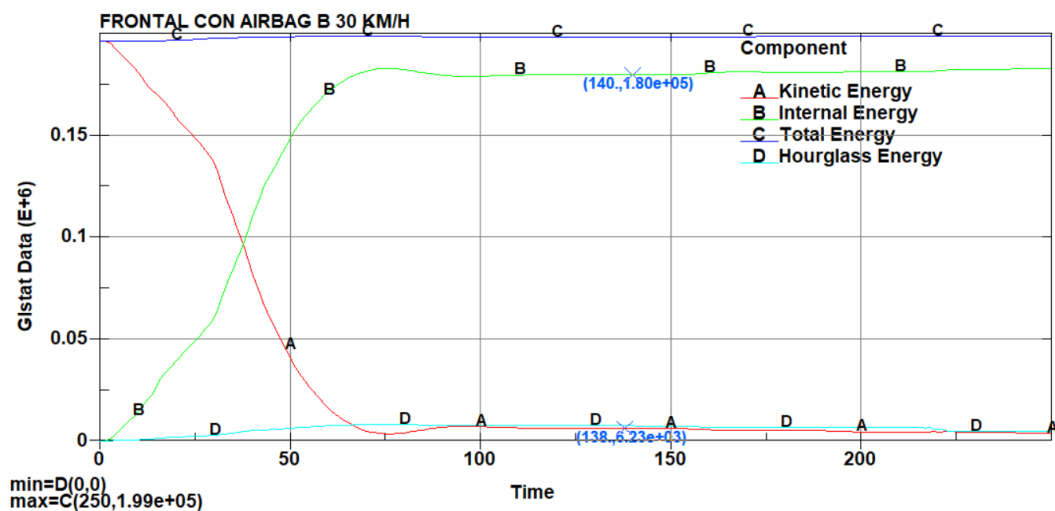




**Figura 82:** Gráfica de impacto frontal con airbag tipo A de energías vs tiempo.

### 3.11.3 Energía de Hourglass en Impacto frontal con airbag tipo B

Se tiene que la energía interna es de  $1.80 \times 10^5$  y que la energía de hourglass tiene un valor de  $6.23 \times 10^3$  siendo mucho menor al 10% de la energía interna que equivale al 18000, como se observa en la Figura 83.



**Figura 83:** Gráfica de impacto frontal con airbag tipo B de energías vs tiempo.

### 3.11.4 Energía de Hourglass en Impacto oblicuo sin airbag

Se tiene que la energía interna es de  $1.78 \times 10^5$  y que la energía de hourglass tiene un valor de  $6.47 \times 10^3$  siendo mucho menor al 10% de la energía interna que equivale al 18000, como se observa en la Figura 84.

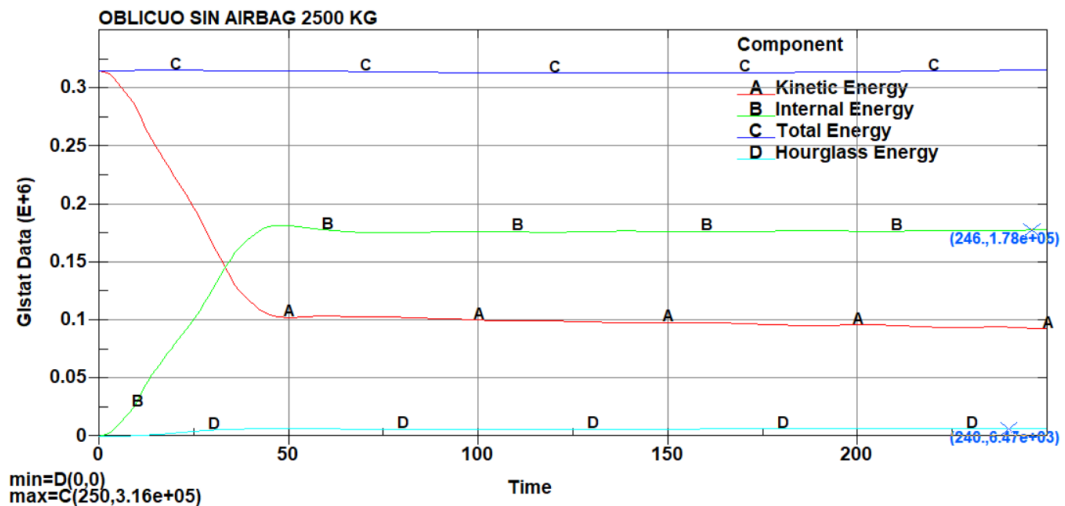


Figura 84: Gráfica de impacto oblicuo sin airbag de energías vs tiempo.

### 3.11.5 Energía de Hourglass en Impacto oblicuo con airbag tipo A

Se tiene que la energía interna es de  $1.83 \times 10^5$  y que la energía de hourglass tiene un valor de  $1.77 \times 10^3$  siendo mucho menor al 10% de la energía interna que equivale al 18300, como se observa en la Figura 85.

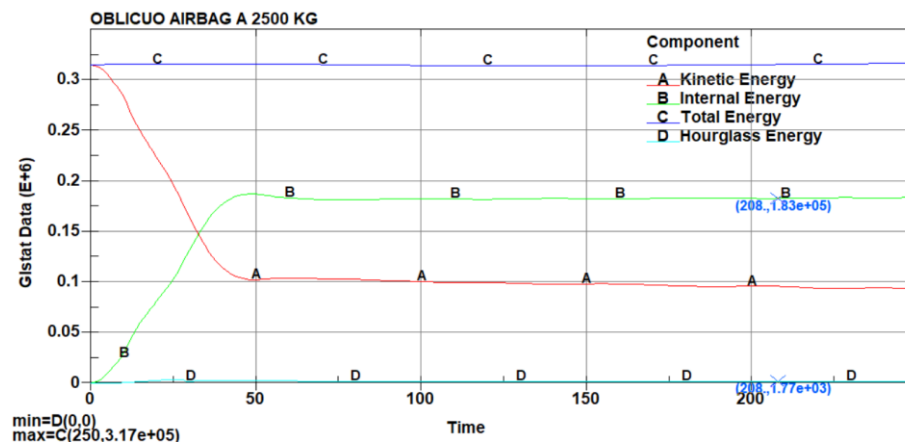
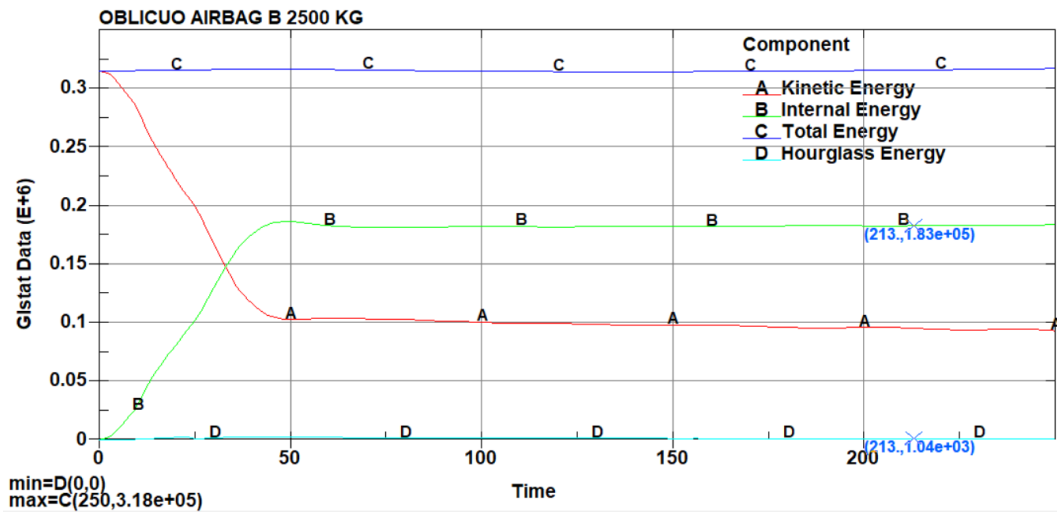


Figura 85: Gráfica de impacto oblicuo con airbag tipo A de energías vs tiempo.

### 3.11.6 Energía de Hourglass en Impacto oblicuo con airbag tipo B.

Se tiene que la energía interna es de  $1.83 \times 10^5$  y que la energía de hourglass tiene un valor de  $1.04 \times 10^3$  siendo mucho menor al 10% de la energía interna que equivale al 18300, como se observa en la Figura 86.



**Figura 86:** Gráfica de impacto oblicuo con airbag tipo B de energías vs tiempo.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Como resultado de la investigación se concluye que es posible trasladar la estructura de un autobús Cita Express modelo 2022 a software CAD con medidas precisas cumpliendo la normativa INEN 1668, para simulaciones de colisiones frontales que permiten el estudio de lesiones sobre el conductor.
- Como consecuencia de las simulaciones, se concluye que, al simular dos modelos de airbags, el convencional tipo A y el tipo B que varía del primero por su geometría, no se debe hacer uso de ninguna configuración de bolsa de aire, debido al incremento de lesiones del conductor en el cerebro, cuello y rodillas.
- Como resultado de la investigación experimental, es posible concluir que mediante simulaciones de impactos frontales de autobús basados en reglamento R94 de las Naciones Unidas, sin el uso de airbag y con airbags tipo A y B, se predicen lesiones en el cuello consideradas graves sobre el conductor.
- Tras el análisis realizado en las simulaciones de impacto frontal oblicuo establecido por la NHTSA y Euroncap, se concluye que existen lesiones graves sobre el conductor en el cerebro y el desplazamiento de la rodilla derecha, ya sea sin el uso del airbag o con los tipos A y B.

## 4.2 Recomendaciones

- Al realizar el modelado CAD de la estructura del autobús, verificar que no existan interferencias en la estructura y que se haya usado el sistema de superficies correctamente.
- Comprobar que el mallado cumpla con la regla del Jacobiano, el cual establece tener una constante en el rango de 0.3 a 0.6.
- Verificar que la energía de hourglass cumpla con los parámetros establecidos por el programa, para que con la simulación se puedan obtener resultados coherentes cercanos a la realidad.
- Ingresar todos los parámetros correctamente como material, velocidad, posición, presión, temperatura, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Kwan Suh, B. Ryeol Ham y S. Gil Hong, “Occupant Simulation of SUV by LS-DYNA”*SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, p. 8, 2003.
- [2] S. Alekseev, A. Tarasov, A. Borovkov, M. Aleshin y O. Klyvin, “VALIDATION OF EURONCAP FRONTAL IMPACT OF FRAME OFF-ROAD VEHICLE: ROAD TRAFFIC ACCIDENT SIMULATION”*Materials Physics and Mechanics*, vol. 34, pp. 2-11, 2017.
- [3] P. C. Zi Lu, “Finite Element Simulation Study of Airbag Load Phenomena”*SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, p. 16, 2005.
- [4] M. Ali Güler, M. Emin Cerit, S. Jocaoglan y E. Acar, “Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions”*Sage Journals*, vol. 234, pp. 3026-3041, 2020.
- [5] Z. Li, “The Initial Velocity Value of Coach in Frontal Impact Research”*Springer*, vol. 9, p. 789, 2013.
- [6] Z. Li, “The Initial Velocity Value of Coach in Frontal Impact Research”*Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, vol. 9, p. 189, 2013.
- [7] Z. Chan y P. Lu, “Finite Element Model Simulation of Airbag-Dummy Interaction”*The national Academies of SCIENCES ENGINEERING MEDICINE*, vol. 9, pp. 2-24, 2021.
- [8] M. B. Feng Yang, “CAE Analysis of Passenger Airbag Bursting through Instrumental Panel Based on Corpuscular Particle Method”*Semantic Scholar*, vol. 10, pp. 1-10, 2015.
- [9] A. R. B. P. A. R. Krystoffer Mroz, “MATHEMATICAL MODELLING OF THE EARLY PHASE DEPLOYMENT OF A PASSENGER AIRBAG – FOLDING USING ORIGAMI THEORY AND INFLATION USING LS-DYNA PARTICLE METHOD”*dynalook*, Vols. %1 de %26th European LS-DYNA, pp. 1-16, 2022.

- [10] NHTSA, “Crash Simulation Vehicle Models” National Highway Traffic Safety Administration, 2021. [En línea]. Available: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>.
- [11] DYNA More, “2019 Europ. LS-DYNA Conference” 12th European LS-DYNA Conference 2019, 2019. [En línea]. Available: [https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/copy\\_of\\_european-ls-dyna-conference](https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/copy_of_european-ls-dyna-conference).
- [12] Euro NCAP, “Euro NCAP” CONFERENCE PROCEEDINGS, 2021. [En línea]. Available: <https://www.euroncap.com/es/para-ingenieros/technical-papers/>.
- [13] Euro NCAP, “Pedestrian Human Model Certification” Technical Bulletin, 2021.
- [14] SAE, “SAE International” 2021. [En línea]. Available: <https://www.sae.org/search/?qt=lsdyna+>.
- [15] L. G. Bonilla Panimboza y F. L. Rojas Placencia, “Diseño y construcción de una máquina dobladora semiautomática de tubos cuadrado de 50x50x2 mm utilizados como cerchas de estructuras de carrocerías de buses” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 201.
- [16] E. I. Ayala Yunga y L. E. Tacuri Tacuri, “Análisis de la implementación de un sistema de airbag en autobuses en la seguridad del conductor durante un impacto frontal” Universidad Politécnica Salesiana. Sede Cuenca, Cuenca, 2021.
- [17] L. E. Villafuerte Buñay, “Análisis estructural de una carrocería autoparte para un bus interprovincial mediante elementos finitos para la producción en serie” ESPE, Latacunga, 2017.
- [18] NTE INEN 1668: 2015, “Vehículos de transporte público de pasajeros intrarregional, interprovincial e intraprovincial. Requisitos” Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2015.
- [19] Toyocosta, “Constitución de una bolsa de aire” 2014. [En línea]. Available: <http://www.toyocosta.com/blog/constitucion-de-una-bolsa-de-aire/>.
- [20] Buscador de talleres, “buscadordealleres.com” 15 5 2016. [En línea]. Available: <https://buscadordealleres.com/blog/funcionamiento-de-un-airbag-con-video/>. [Último acceso: 3 4 2022].

- [21] C. Gonzales, “¿Qué es un airbag y cómo funciona?”Motor.es, [En línea]. Available: <https://www.motor.es/que-es/airbag>.
- [22] S. Young-Duk, K. Gun-Woo, H. Bum-Suk y K. Jin-Ho, “Automotive Airbag Inflator Analysis Using Measured Properties of Modern Propellants”*Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 18, nº 6, pp. 1395-1401, 2010.
- [23] Loctite Teros On, “Tipos de airbag, componentes y funcionamiento”El Blog de los Profesionales del Taller, s.f.. [En línea]. Available: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/tipos-de-airbag>.
- [24] RACE, “Descubre los diferentes tipos de airbag, ¿te pueden salvar la vida!”RACE, 09 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.race.es/tipos-airbag-coche-moto-bicicleta>.
- [25] Catarina, “Investigación acerca de los dummies”UDLAP, 2005.
- [26] Reglamento R94, “Reglamento no 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE)”Comisión Económica para Europa, Unión Europea, 2010.
- [27] Latin NCAP, “Impacto Frontal”2021. [En línea]. Available: <https://www.latinncap.com/es/nuestros-ensayos/pasajero-adulto/impacto-frontal>.
- [28] J. Saunders y M. J. Craig , “NHTSA’S Test procedure evaluations for small overlap/oblique crashes”*Proceedings*, vol. 22, pp. 1-15, 2011.
- [29] LSTC Lsdyna, “<https://www.dynasupport.com/manuals>”24 9 2021. [En línea]. Available: [https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna\\_manual\\_volume\\_i\\_r13.pdf](https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r13.pdf). [Último acceso: 3 4 2022].
- [30] E. Lee, “NHTSA Oblique Test Data Analysis Method by LS-DYNA Modeling”*25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2017.
- [31] M. Büyük, A. Osman Atahan y K. Kurucuoğlu, “Impact Performance Evaluation of a Crash Cushion Design Using Finite Element Simulation and Full-Scale Crash Testing”*Safety*, vol. 4, nº 4, p. 48, 2018.
- [32] O. Micó, “¿Qué es el Euro NCAP?”Motor.es, 2019. [En línea]. Available: <https://www.motor.es/que-es/euro-ncap>.

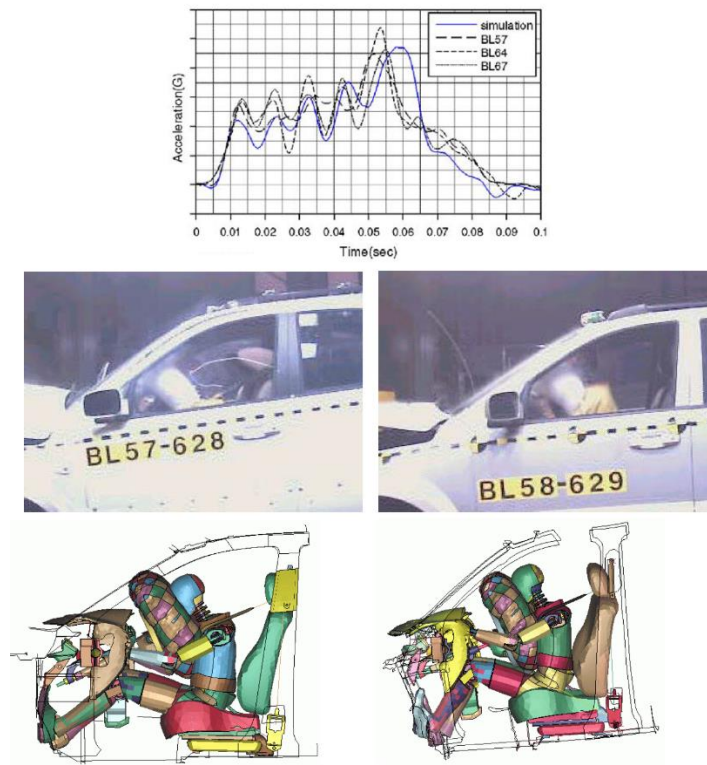


- [33] P. C. Zi Lu, "Finite Element Simulation Study of"SAE100, n° 2005-01-0301, pp. 1-16, 2018.
- [34] J. J. N. Muñoz., "https://repositorio.uta.edu.ec/"2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/33704/1/Tesis%20I.%20M.%20652%20-%20Niachimba%20Mu%C3%B1oz%20Joselyn%20Jessenia.pdf>. [Último acceso: 3 4 2022].
- [35] EURONCAP, "www.euroncap.com"EURONCAP, 22 5 2020. [En línea]. Available: <https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-de-ocupantes-adultos/pruebas-antteriores/barrera-deformable-con-solape-parcial/>. [Último acceso: 3 5 2022].
- [36] U. Noticias, "www.ultimasnoticias.ec"últimas noticias, 2 5 2018. [En línea]. Available: <https://www.ultimasnoticias.ec/las-ultimas/choque-buses-muertos-guayas-accidente.html>. [Último acceso: 19 6 2022].
- [37] El Comercio, "www.elcomercio.com"El Comercio, 11 6 2022. [En línea]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/choque-frontal-camioneta-bus-fallecido-cuenca.html>. [Último acceso: 19 6 2022].
- [38] L. A. Edison Ayala, "https://dspace.ups.edu.ec/"8 3 2022. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21255/1/UPS-CT009349.pdf>. [Último acceso: 3 5 2022].
- [39] M. J. C. K. M. J. M. Erik G. Takhounts, "Development of Brain Injury Criteria"*Stapp Car Crash Journal*, vol. 57, pp. 243-266, 2013.
- [40] S. H. C. J. Y. Young Duk, "Automotive airbag inflator analysis using the measured properties"*ELSEVIER*, vol. 90, n° 1395-1401, pp. 1-7, 2011.
- [41] D. W. E. B. W. G. S. Nusholtz, "An Evaluation of Airbag Tank-Test Results"*SAE*, n° 980864, pp. 1-10, 2018.
- [42] Livermore Software Technology, "www.lstc.com"Ansys, 2017 9 23. [En línea]. Available: [https://www.lstc.com/download/dummy\\_models..](https://www.lstc.com/download/dummy_models..) [Último acceso: 8 11 8].

- [43] F. R. Hernández Sampieri, R. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, “Metodología de la investigación” McGraw-Hill, 2010.
- [44] S. A. López Ortiz, “Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos” Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2016.
- [45] Y. X. W. Z. a. H. Z. Zhaokai Li, “The Safety of Body Structure and Occupant Protection Research of Medium Bus Under Three Kinds of Frontal Impact Forms” *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, p. 789, 2013.
- [46] A. T. A. B. M. A. O. K. S. Alekseev\*, “VALIDATION OF EURONCAP FRONTAL IMPACT OF FRAME OFF-ROAD VEHICLE: ROAD TRAFFIC ACCIDENT SIMULATION” *Materials Physics and Mechanics 34*, p. 11, 2017.
- [47] M. E. C. S. K. M. E. A. Mehmet Ali Guler, “Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions” *Journal of Automobile engineering*, p. 16, 2020.
- [48] Q. Y. J. C. Q. L. G. Z. a. Zhaokai Li, “The Initial Velocity Value of Coach in Frontal Impact Research” *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, p. 789, 2013.
- [49] C. E. p. E. d. I. N. U. CEPE, *R94 Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal*, 2012.
- [50] Z. L. a. P. Chan, “Finite Element Simulation Study of” *SAE International*, vol. 100, n° 2005-01-0301, pp. 3-16, 2018.
- [51] S. H. C. a. J. J. Y. Young-Duk Seo, “Automotive airbag inflator analysis using the measured properties” *Elsevier*, n° 1395-1401, pp. 1-7, 2011.
- [52] D. W. E. B. W. G. S. Nusholtz, “An Evaluation of Airbag Tank-Test Results” *SAE INTERNATIONAL*, n° 980864, pp. 3-10, 2018.
- [53] Livermore Software Technology, “www.lstc.com” ANSYS, 23 9 2017. [En línea]. Available: [https://www.lstc.com/download/dummy\\_models](https://www.lstc.com/download/dummy_models). [Último acceso: 8 11 2021].

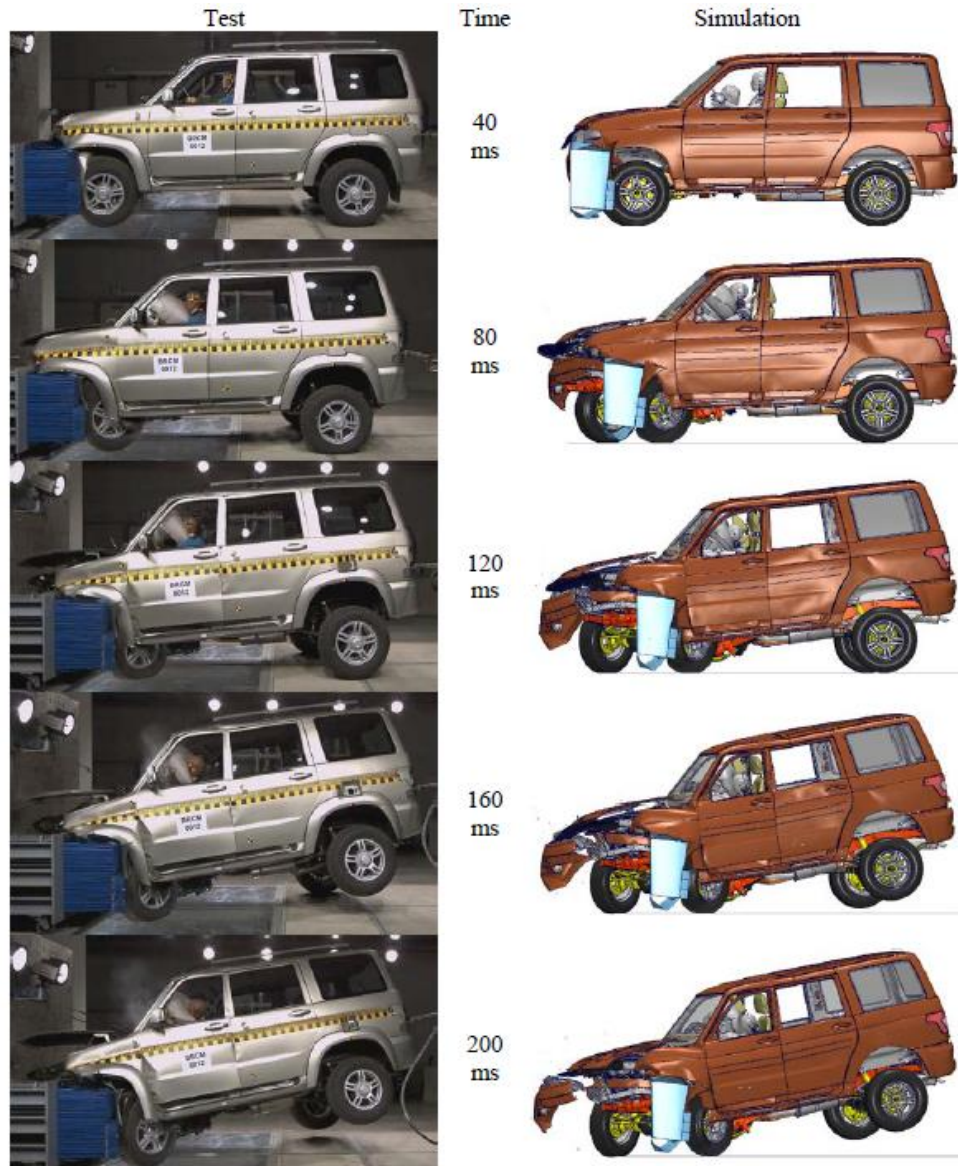
# **ANEXOS**

## Anexo 1



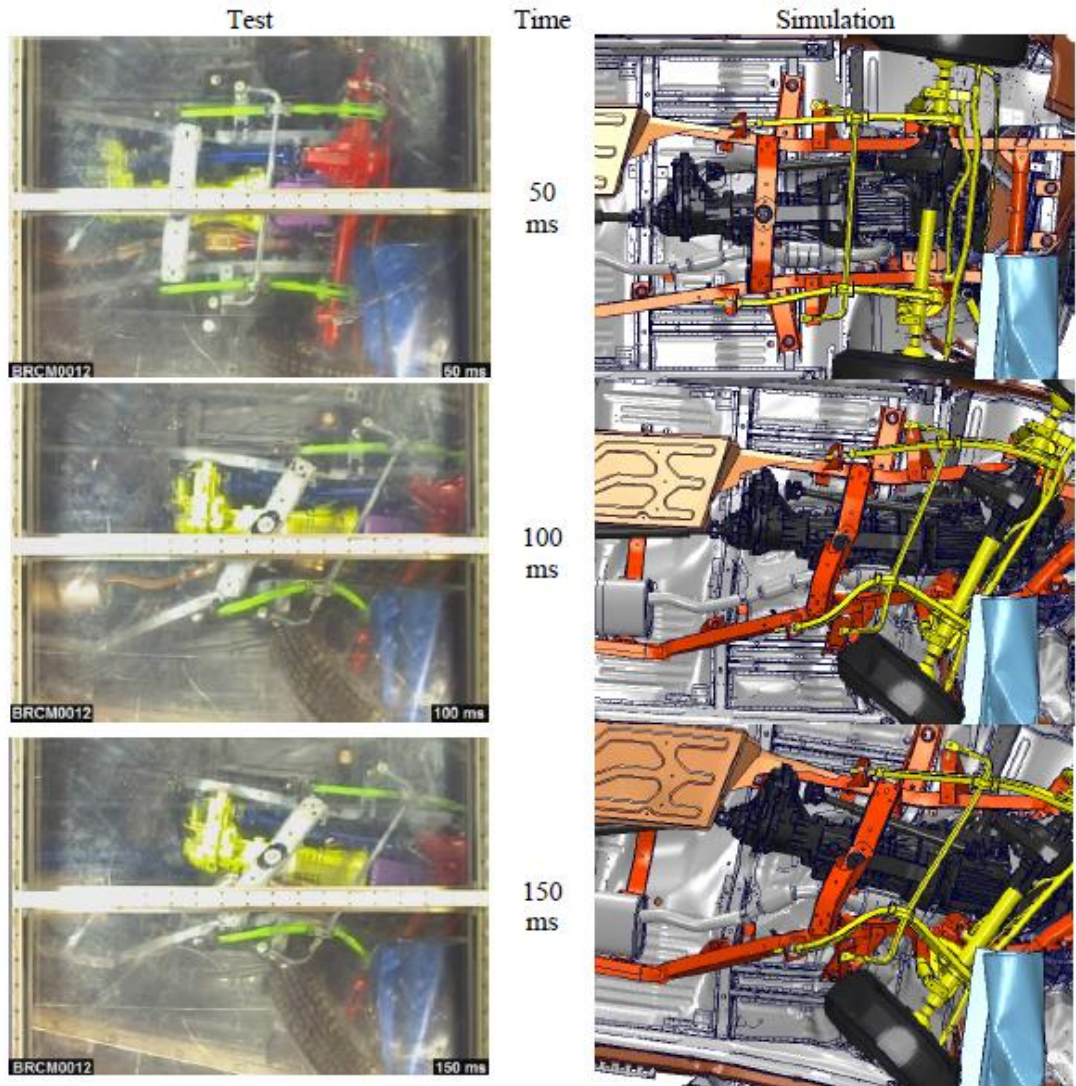
**Figura 87:** Movimientos de maniquí en impacto frontal para dos tipos de condiciones, grafico superior pulso de aceleración medido en impacto real y simulado, grafico intermedio modelo real, grafico inferior simulación [1].

## Anexo 2



**Figura 88:** Vistas laterales secuenciales de la prueba de barrera deformable frontal EuroNCAP real simulada para el vehículo todo terreno [2].

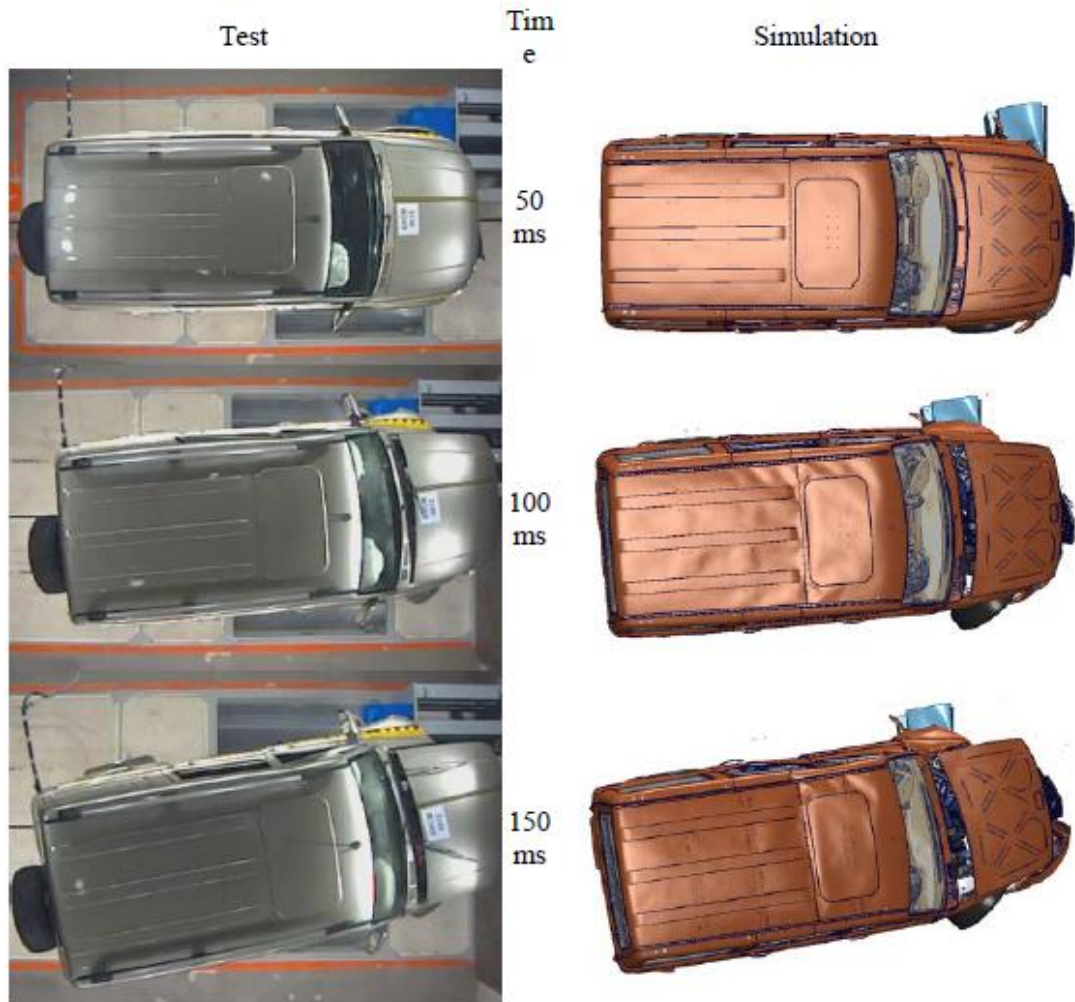
### Anexo 3



**Figura 89:** Vistas secuenciales desde abajo de la prueba de barrera deformable frontal EuroNCAP real y simulada para el vehículo todo terreno [2].

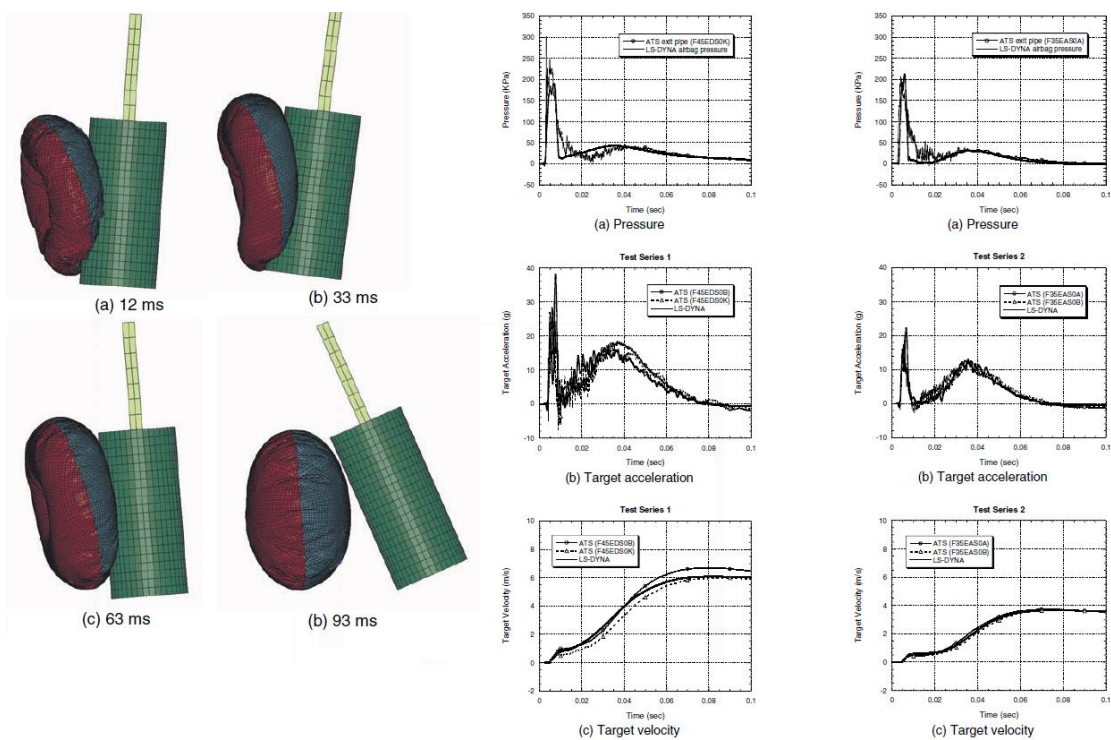


## Anexo 4



**Figura 90:** Vistas secuenciales desde arriba de la prueba de barrera deformable frontal EuroNCAP real y simulada para el bastidor del vehículo todoterreno [2].

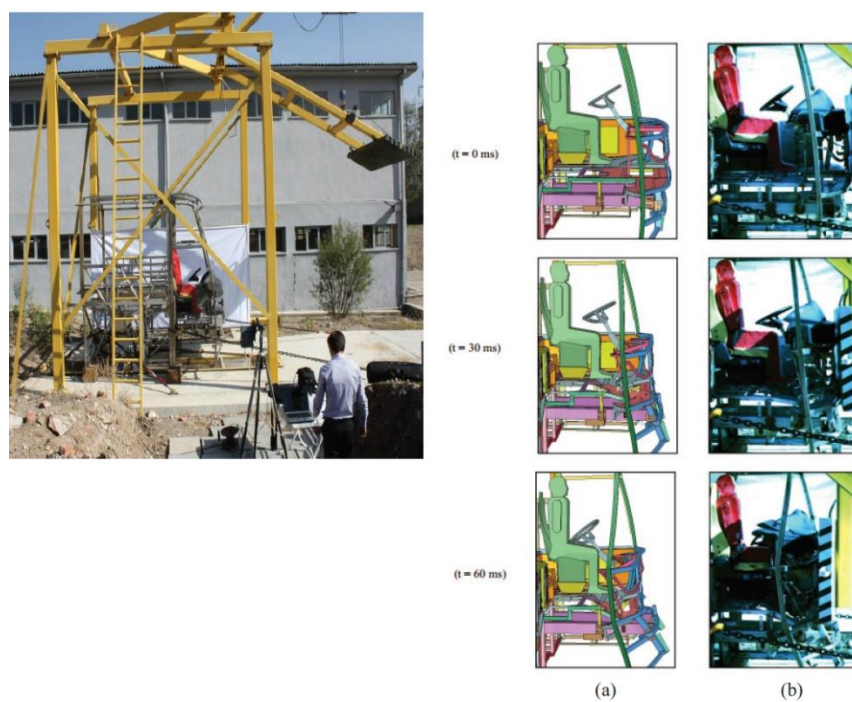
## Anexo 5



**Figura 91:** Validación de modelo inflador de airbag utilizando el programa ANSYS LSDYNA [3].

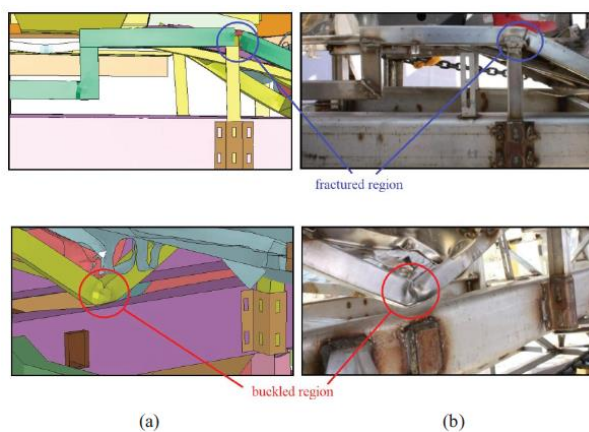


## Anexo 6












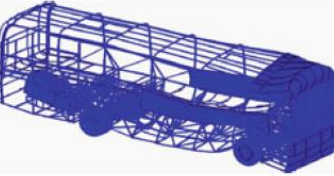


**Figura 92:** Gráfico izquierda banco de pruebas físico para ensayo ECE-R29, gráfico derecha secuencia de simulación y ensayo ECE-29 tiempo máximos 60ms [4].

## Anexo 7



**Figura 93:** Comparación de resultados de ensayo y simulación ECE-R29, Gráfico izquierda resultados simulados, gráfico derecho resultados de ensayo real [4].

## Anexo 8

IV	The coach's stress status and deformation	The deformation of the coach	
		In the collision	After the collision
20km/h			
30km/h			
40km/h			
50km/h			

**Figura 94:** Deformación de estructura en diferentes velocidades iniciales en impacto frontal [5].

## Anexo 9

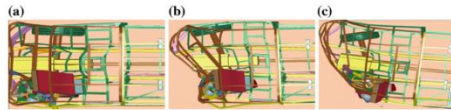
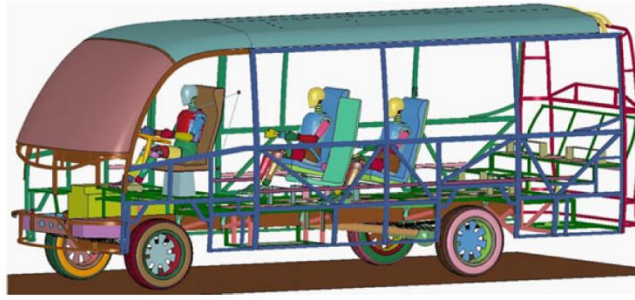
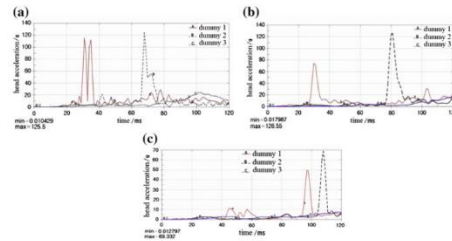
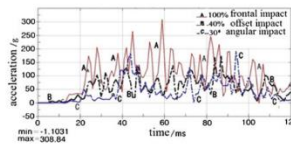


Fig. 6 The deformation of frontal structure under three collision forms a 100 % overlap rate frontal impact b 40 % overlap rate offset impact c 30° angular impact

Fig. 7 The acceleration curve of vehicle under three collision forms



**Figura 95:** Análisis de impacto frontal de 3 maniqués de pruebas de impacto que representan afectación en niños, grafico superior modelo FEM de autobús, grafico inferior izquierda estructura deformada, grafico inferior derecho aceleraciones en cabeza de los 3 maniqués [6].

## **Anexo 10**

### **INFORME DE VALIDACIÓN DE MODELO COMPUTACIONAL DE AIRBAG CON EL PROGRAMA ANSYS LS-DYNA RESEARCH.**

#### **Objetivos**

##### **Objetivo General**

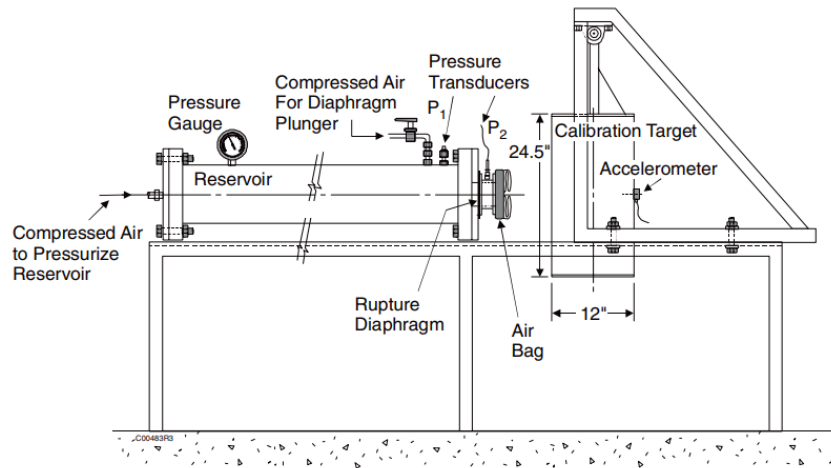
- Validar el modelo computacional de airbag con el programa ANSYS LS-DYNA RESEARCH para verificar que los resultados a reportar en la tesis se aproximen a la realidad, analizando las conclusiones dadas por ensayos físicos de investigaciones anteriores y comparándolas con el software.

##### **Objetivos Específicos**

- Validar el procedimiento de pre procesamiento de simulación del airbag utilizando las herramientas del software Ls-prepost para garantizar el correcto manejo en el desarrollo del proyecto.
- Demostrar la habilidad con el programa por medio del estudio para que los resultados reportados sean similares a la realidad garantizando el desarrollo del estudio mediante el programa ANSYS LS-DYNA RESEARCH.
- Evidenciar que se tienen todos los recursos necesarios para el desarrollo de la investigación mediante la validación del programa.

#### **Introducción**

Se toma como referencia un artículo publicado por SAE, en donde se realiza un estudio con una máquina ATS, que realiza prueba de inflado de airbag con aire comprimido de manera controlada, la cual permite medir resultados obtenidos durante la inflación del airbag que posteriormente impacta a un cilindro, los cuales tienen sensores que permiten medir la presión, velocidad y aceleración, como se representa en la Figura 96 [3].



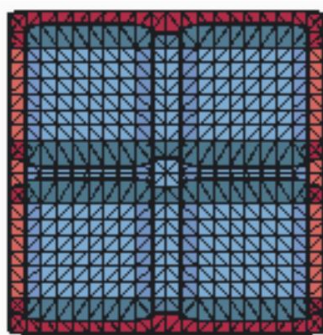
**Figura 96:** Esquema de la máquina ATS, donde se inyecta aire comprimido al airbag mediante un reservorio de aire y posteriormente colisiona con un cilindro calibrado correctamente a un acelerómetro [3].

Posteriormente se utiliza el programa ANSYS LS-DYNA RESEARCH para realizar una simulación similar y obtener resultados cercanos a la realidad y así lograr validar el uso del programa.

## Procedimiento

### 1. Modelo de airbag y cilindro a utilizar

El modelo de airbag a utilizar cuenta con 16 dobleces en forma de acordeon, 8 en forma vertical y 8 en horizontal, como se muestra en la Figura 977 [3].



(a) Bag A top view



(b) Bag A side view



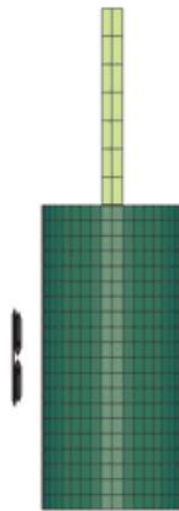
(c) Bag A inflated partially

**Figura 97:** Vistas del airbag [3].

El modelo de cilindro a impactar tiene las siguientes características en la Tabla 15 y en la Figura 98:

**Tabla 15:** Características del cilindro [3].

<b>Features</b>	<b>Small size target</b>
Height (mm)	508
Width (mm)	254
Weight (kg)	20.3



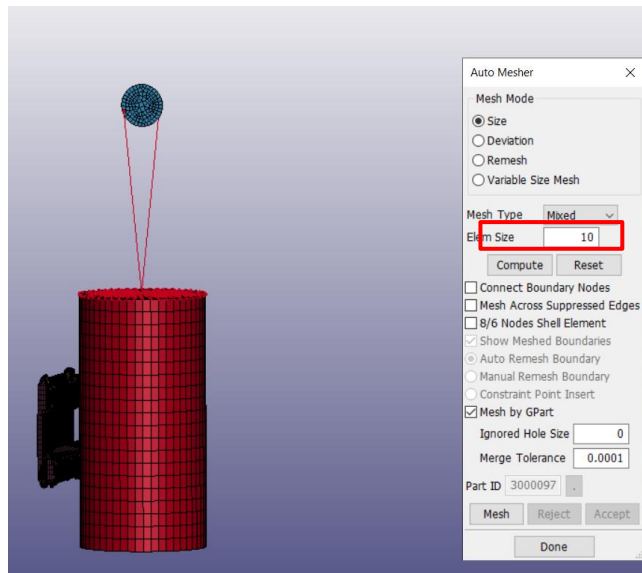
(b) Small size target

### Cylindrical surrogate test targets.

**Figura 98:** Cilindro a simular [3].

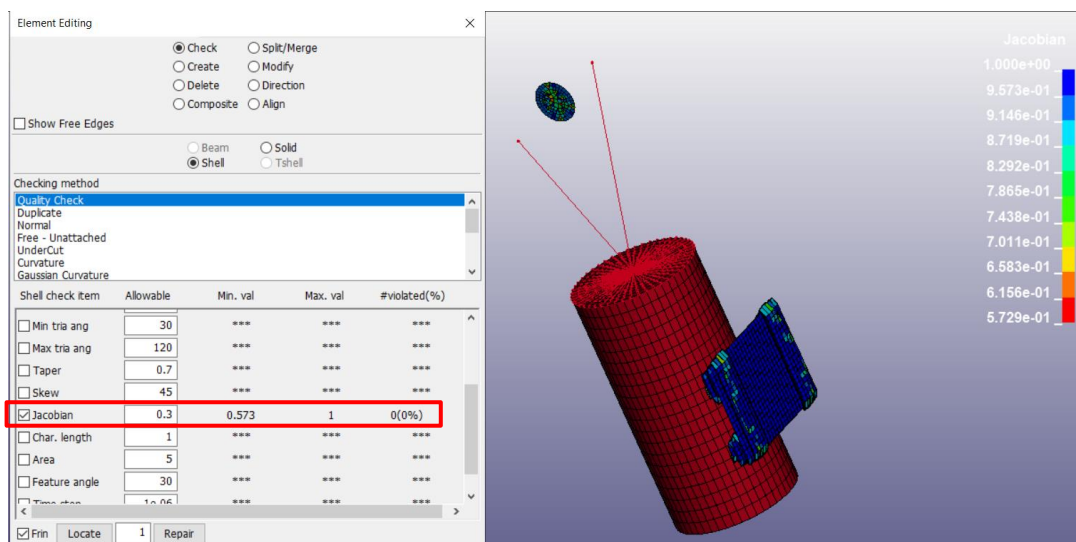
## 2. Malla FEM

Se genera un mallado mediante Ls Prepost de 10 mm, como se muestra en la Figura 98:



**Figura 99:** Mallado general.

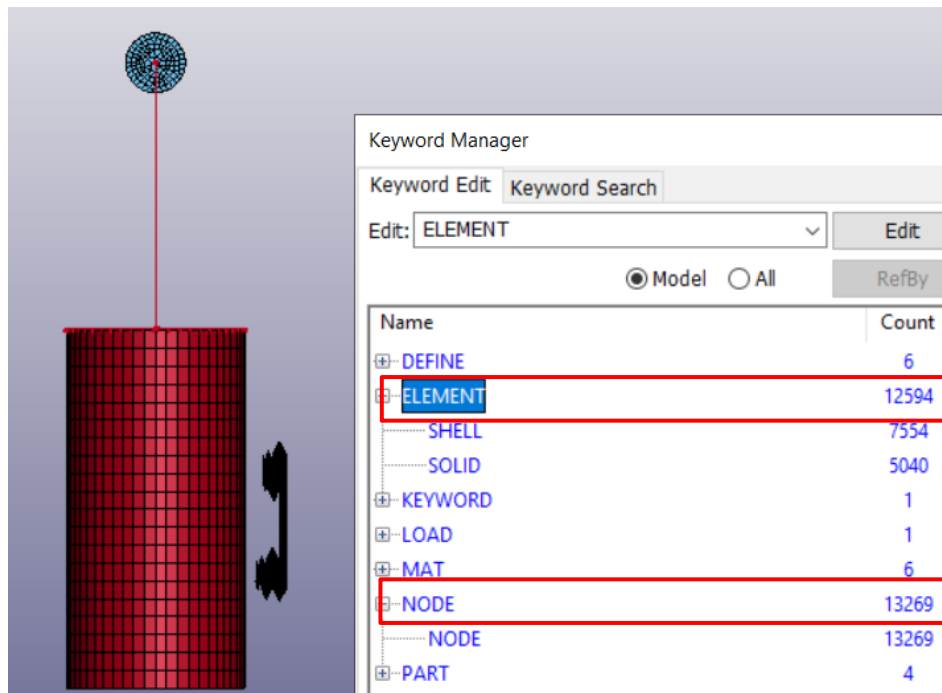
Se verifica la calidad de malla mediante el Jacobiano, donde se indica que al tener un valor de 0.3 no existe ningún porcentaje de falla, demostrando que existe un buen mallado, como se muestra en la Figura 100.



**Figura 100:** Calidad de la malla, con valor de Jacobiano mínimo de 5.729e-1 y valor máximo de 1.



Se verifica el número de elementos y nodos en la Figura 101.



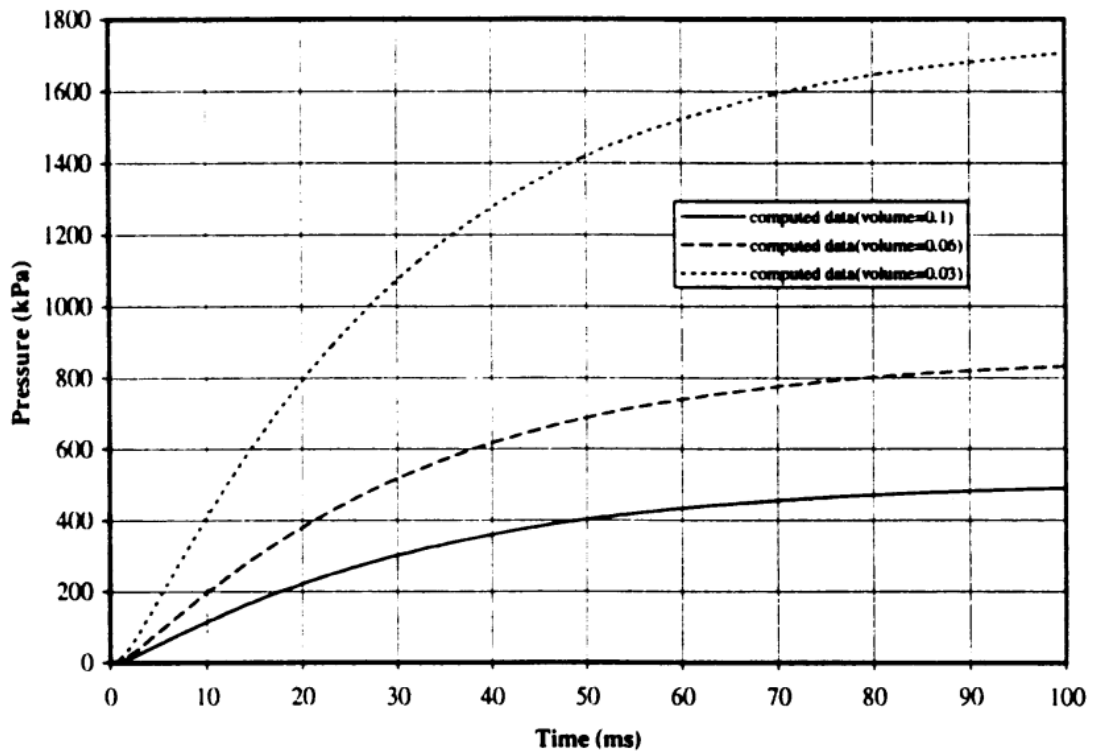
**Figura 101:** Existen 12594 elementos y 13269 nodos en total.

### 3. Curva de inflado del airbag

Para la simulación se utilizó un airbag que se infla mediante pirotecnia que usa propellants [40], para ello usamos la carta de control para activar el modelamiento de airbag en ANSYS LS-DYNA RESEARCH descrita en AIRBAG\_WANG\_NEFSKE\_ID que se implementó también en el artículo [3] e ingresamos la curva de explosión del airbag cuando se expande el gas.

A continuación, se muestra una gráfica en dónde se verifica que la presión de inflado de airbag llega a 1.7MPa o 1700 kPa, y que se encuentra publicado y validado en la investigación [41], que se muestra en la Figura 102.





**Figura 102:** Gráfica presión vs tiempo de la explosión del airbag, donde se muestran resultados de presiones para volúmenes del tanque de 0.1, 0.06 y 0.03 sin transferencia de calor [41].

La presión de inflado del airbag producido por el gas generado en la explosión pirotécnica utilizando el propelente más común se detalla en los datos publicados para los talleres de entrenamiento de LSTC, que se encuentran disponibles en [42]. que representan un comportamiento real y adecuado para simulaciones de este tipo.

#### 4. Materiales

Para realizar la validación se utilizó el material FABRIC, que es un modelo de material ortotrópico utilizado para la tela del airbag, el cual tiene las siguientes propiedades mostradas en la Tabla 16:

**Tabla 16:** Datos del airbag para ingreso al programa [3].

Propiedad	Valor
Young's modulus (E11 y E22)	200 MPa
Poisson's ratio	0.3
Shear modulus (G12, G23 y G31)	38 MPa
Densidad del material	8.76e-07 kg/mm <sup>3</sup>

De los datos anteriores tomados de la investigación [3], ingreso en el programa, como se muestra en la Figura 103:

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick

Use \*Parameter  Comment

\*MAT\_FABRIC\_(TITLE) (034) (3)

1	MID	RO	EA	EB	=	PRBA	PRAB	=
	6000189	8.760e-07	0.2000000	0.2000000	0.0	0.3000000	0.3000000	0.0
2	GAB	=	=	CSE	EL	PRL	LRATIO	DAMP
	0.0380000	0.0	0.0	1.0	0.0600000	0.3500000	0.1000000	0.2000000
3	AOPT	FLC	FAC	ELA	LNRC	FORM	EVOPT	TSRFAC
	3.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0
4	UNUSED	RGBRTH	AOREF	A1	A2	A3	X0	X1
	0	0.0	0	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0
5	V1	V2	V3	=	=	=	BETA	ISREFG
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

**Figura 103:** Ingreso de datos del airbag al programa.

Se ingresó las propiedades del material para el cilindro mostradas en la Figura 104:

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick

Use \*Parameter  Comment

\*MAT\_ELASTIC\_(TITLE) (001) (2)

TITLE

cilindro

1	MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT USED
	3000096	7.910e-07	200.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.0

**Figura 104:** Ingreso de datos del cilindro al programa.

Ingresamos las propiedades del airbag con WANG\_NEFSKE mostradas en la Figura 105:

Keyword Input Form

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 P5 peso 20 Kg.k)

\*AIRBAG\_WANG\_NEFSKE\_ID (1)

1	ID	TITLE						
	1							
2	SID	SIDTYP	RBID	VSCA	PSCA	VINI	MWD	SPSE
	2	1	0	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0
3	CV	CP	I	LCT	LCMT	TVOL	LCDT	IABT
	1023.0000	1320.0000	781.90002	0	6000040	0.0	0	0.0
4	C23	LCC23	A23	LCA23	CP23	LCCP23	AP23	LCAP23
	1.0000000	0	0.0	6000041	1.0000000	0	0.0	0
5	PE	RO	GC	LCEFR	POVER	PPOP	OPT	KNKDN
	1.013e-04	1.000e-09	1.0000000	0	0.0	0.0	1	0
6	IOC	IOA	IVOL	IRO	IT	LCBF		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0		

**Figura 105:** Ingreso de propiedades del airbag al programa.

Dónde:

RO: Densidad.

EA y EB: Young's modulus.

GAB: Shear modulus.

PRBA y PRAB: Poisson's ratio.

CV: Heat capacity at constant volume.

CP: Heat capacity at constant pressure.

T: Temperature of input gas .

LCMT: Load curve specifying input mass flow rate or tank pressure versus time:

**NOTA:** Si el casillero de TVOL es igual a cero la curva ingresada es la presión y si es igual a 1 se asume como flujo másico. Entonces al ser presión se añade el cero para usarla como pulso de inflado del airbag.

LCA23: Presión de salida del airbag.

PE: Ambient pressure.

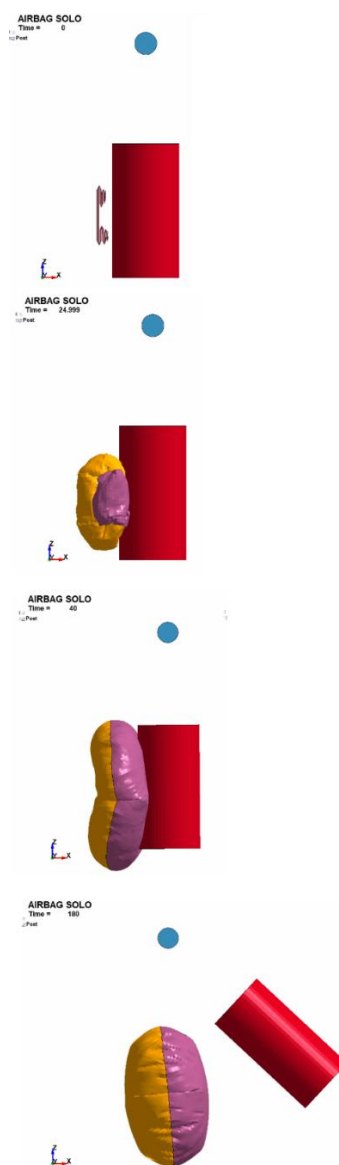
En la Tabla 17 se muestra las condiciones adicionales para ingreso de parámetros.

**Tabla 17:** Condiciones de simulación adicionales.

Condición	Magnitud
Separación airbag-cilindro.	25 mm
Diámetro de airbag.	686 mm
Altura de cilindro a eje de giro.	409 mm

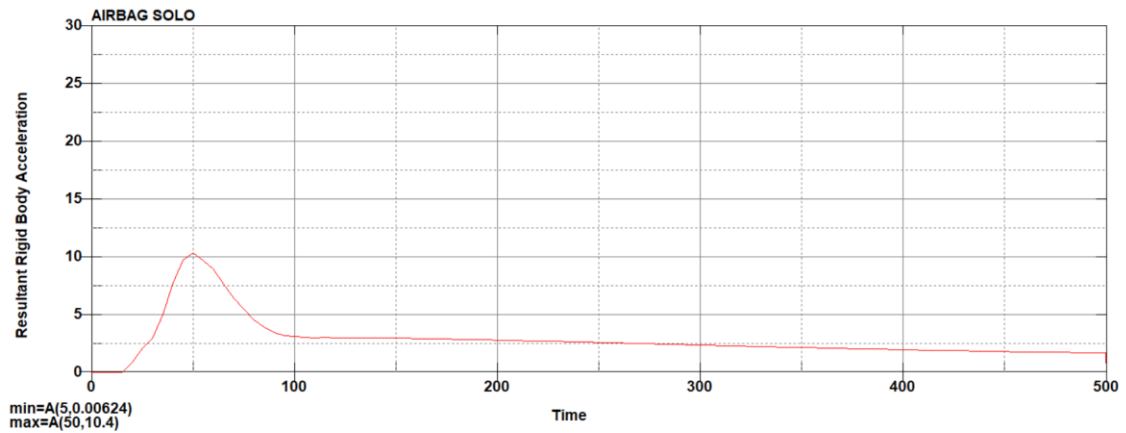
## 5. Resultados

En la Figura 106 se muestra la secuencia de simulación:

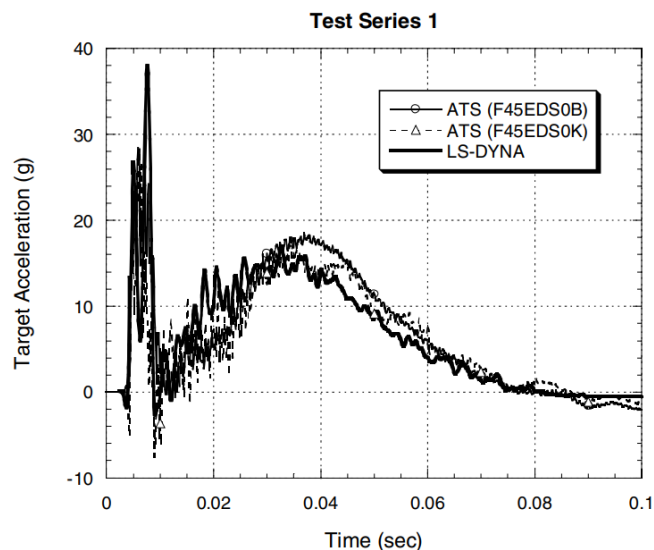


**Figura 106:** Secuencia de simulación en ANSYS LS-DYNA RESEARCH.

En la Figura 107 se muestra la gráfica de aceleración obtenida de la simulación, mientras que en la Figura 108 la real.



**Figura 107:** Gráfica aceleración (Gs) vs Tiempo del programa. Con 10.4 de fuerzas Gs máximas producidas en 50 ms.



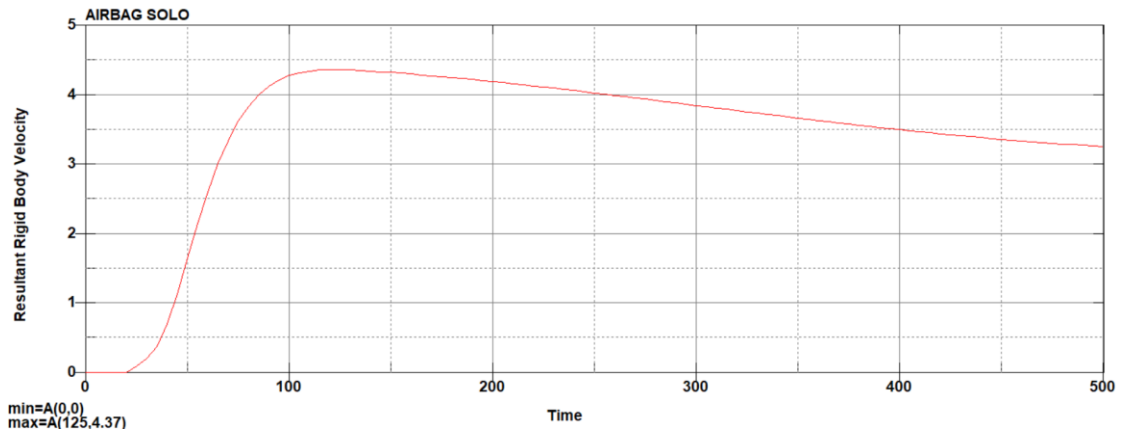
(b) Target acceleration

**Figura 108:** Gráfica aceleración (Gs) vs Tiempo del artículo [3].

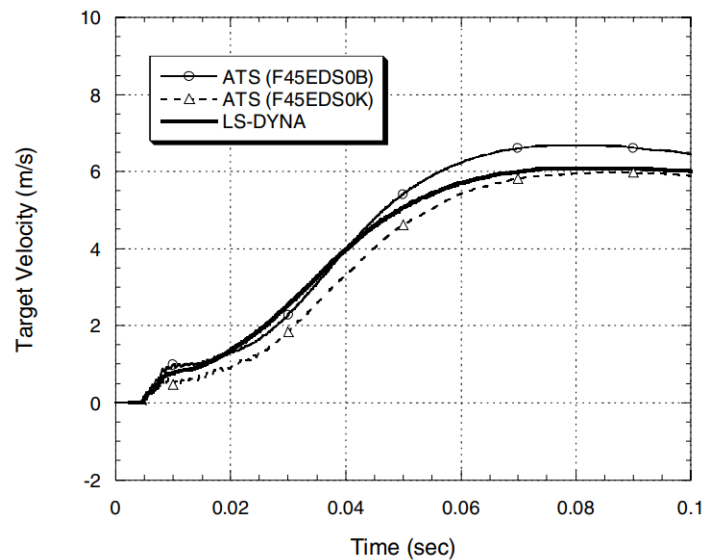
Como se observan en la gráfica de la simulación se tiene un pico de 10.4 Gs, mientras que en la gráfica del ensayo físico se tiene un pico de aproximadamente 14Gs, variando por 3.6 Gs, obviando los picos de aceleraciones iniciales por la precisión de los resultados, lo que significa que las soluciones son casi similares.

En la Figura 109 se muestra la gráfica de velocidad obtenida de la simulación, mientras que en la Figura 110 la real.

### Velocidad



**Figura 109:** Gráfica velocidad (m/s) vs Tiempo del programa. Velocidad máxima del cilindro basculante 4.37 m/s producidos en 125 ms.



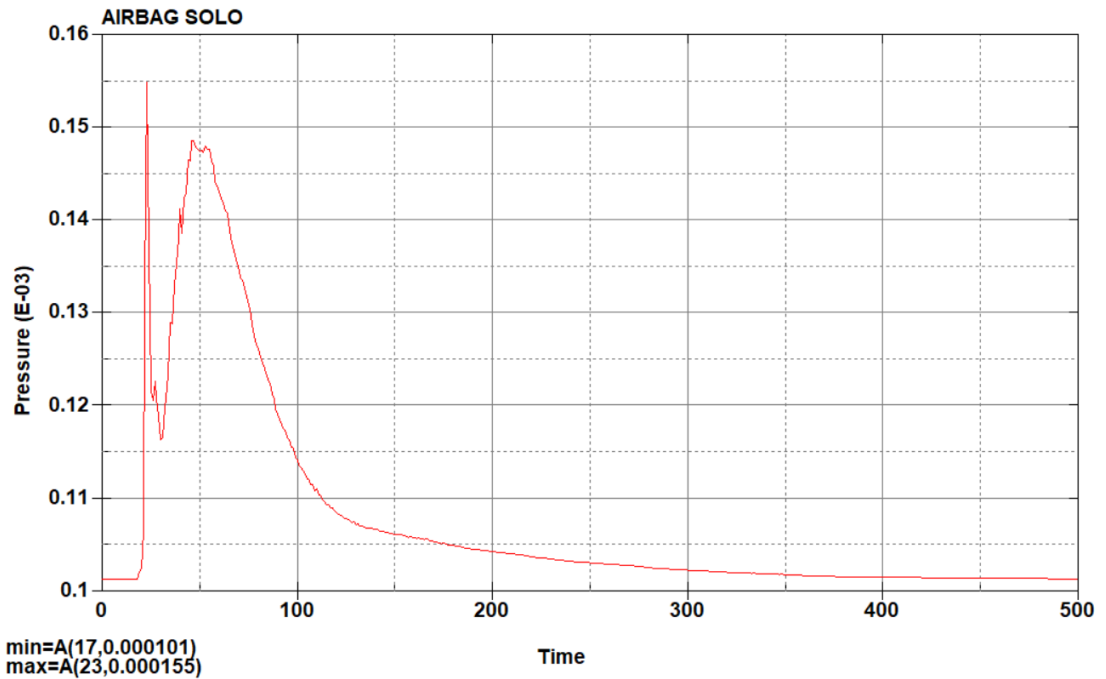
(c) Target velocity

**Figura 110:** Gráfica velocidad (m/s) vs Tiempo del artículo [3].

Como se observan en la gráfica de la simulación se tiene un pico de 4.37, mientras que en la gráfica del ensayo físico se tiene un pico de aproximadamente 6, variando por 1.63 m/s, lo que significa que los resultados son casi similares.

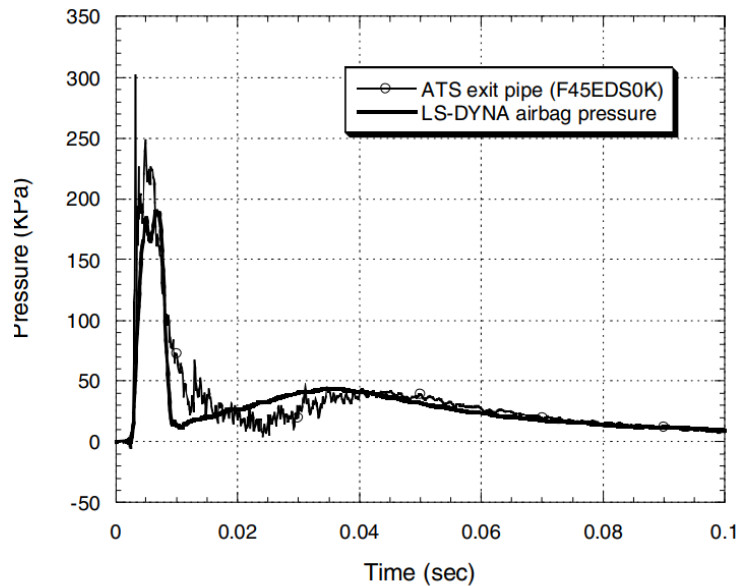
En la Figura 111 se muestra la gráfica de presión obtenida de la simulación, mientras que en la Figura 112 la real.

### Presión



**Figura 111:** Gráfica presión vs Tiempo del programa. Con un valor máximo de 155 kPa a 23 ms.

Tenemos un pico de 0.000155 Giga Pascales lo que equivale a 155 kPa, aproximándose considerablemente a la siguiente gráfica:



(a) Pressure

**Figura 112:** Gráfica presión (kPa) vs Tiempo del artículo [3].

**NOTA:** No se conoce la curva de explosión del airbag y otros datos adicionales que se están usando, solo los resultados, pero con los datos actuales se pudo obtener resultados muy conservadores que se aproximan a un modelo real de airbag.

## 6. Conclusiones

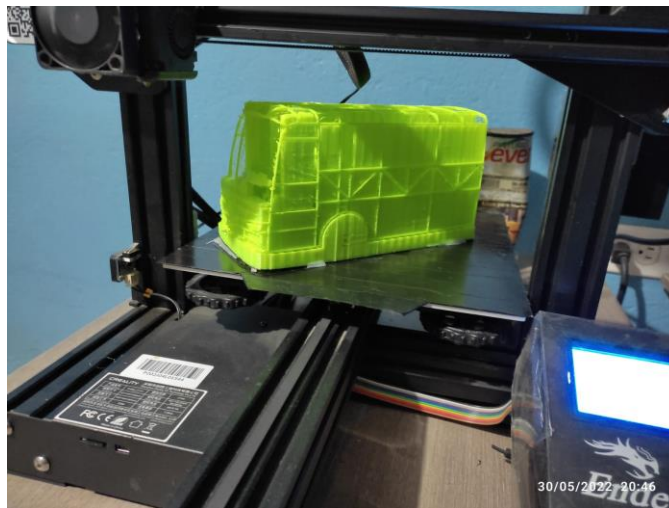
- Al utilizar el software Ls-prepost se garantizó el correcto manejo de la simulación mediante el ingreso y la búsqueda de datos adicionales para posteriormente obtener resultados similares a realidad.
- Con la simulación se muestra que todos los resultados presentados en el informe tienen un factor de corrección de 3.6 G para aceleración, 1.3 m/s para velocidad y 50 kPa para la presión, con estos valores calculados se podrá reportar una incertidumbre de medición que permitirá tener resultados confiables en el estudio.
- Durante la realización de la simulación no se presentaron errores, logrando obtener resultados favorables durante el desarrollo del informe.



## 7. Recomendaciones

- Verificar que se esté trabajando con las unidades correctas.
- Tomar en cuenta la calidad de la malla.
- Revisar que los materiales ingresados sean los correctos.
- Durante la simulación comprobar si no existen errores o advertencias que puedan dar resultados erróneos.

### Anexo 11



**Figura 113:** Impresión a escala en 3D de la estructura del autobús.

### Anexo 12



**Figura 114:** Estructura a escala de autobús impreso en 3D.

### Anexo 13



**Figura 115:** Modelo de estructura de autobús impreso en 3D.

### Anexo 14



**Figura 116:** Entrega del trabajo de investigación a la empresa MIRAL.