



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE MECÁNICA**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MÉCANICO**

**TEMA:**

---

“ANÁLISIS DE LOS REFUERZOS ESTRUCTURALES NO CONVENCIONALES EN LA DEFORMACIÓN DE BISAGRA PLÁSTICA, EN COLISIONES DE VUELCO DE AUTOBUSES SEGÚN EL PROCEDIMIENTO DE LA CEPE R66, POR MEDIO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EMPLEANDO SOFTWARE CAE”

---

**Autor:** Santiago Alexander Caisaguano Moreano

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

**AMBATO - ECUADOR**

**Marzo - 2023**

## APROBACIÓN DE TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ANÁLISIS DE LOS REFUERZOS ESTRUCTURALES NO CONVENCIONALES EN LA DEFORMACIÓN DE BISAGRA PLÁSTICA, EN COLISIONES DE VUELCO DE AUTOBUSES SEGÚN EL PROCEDIMIENTO DE LA CEPE R66, POR MEDIO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EMPLEANDO SOFTWARE CAE”**, elaborado por el Sr. Santiago Alexander Caisaguano Moreano, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 0503959975, estudiante de la Carrera de 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, marzo 2023




Ing. Mg. César Hernán Arroba Arroba

TUTOR

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Yo, Santiago Alexander Caisaguano Moreano, con C.I. 0503959975 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“ANÁLISIS DE LOS REFUERZOS ESTRUCTURALES NO CONVENCIONALES EN LA DEFORMACIÓN DE BISAGRA PLÁSTICA, EN COLISIONES DE VUELCO DE AUTOBUSES SEGÚN EL PROCEDIMIENTO DE LA CEPE R66, POR MEDIO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EMPLEANDO SOFTWARE CAE”**, así como también tablas, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, marzo 2023



---

**Santiago Alexander Caisaguano Moreano**

**C.I. 0503959975**


**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, marzo 2023



---

**Santiago Alexander Caisaguano Moreano**

**C.I. 0503959975**

**AUTOR**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el estudiante Santiago Alexander Caisaguano Moreano de la Carrera de Mecánica bajo el tema: **“ANÁLISIS DE LOS REFUERZOS ESTRUCTURALES NO CONVENCIONALES EN LA DEFORMACIÓN DE BISAGRA PLÁSTICA, EN COLISIONES DE VUELCO DE AUTOBUSES SEGÚN EL PROCEDIMIENTO DE LA CEPE R66, POR MEDIO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EMPLEANDO SOFTWARE CAE”**.

Ambato, marzo 2023

Para constancia firman:

Ing. Mg. Jorge Enrique López Velástegui

**MIEMBRO CALIFICADOR**

Ing. Mg. Diego Fernando Núñez Núñez

**MIEMBRO CALIFICADOR**

## **DEDICATORIA**

*A mis queridos abuelos José Leónidas Moreano y María Salome Basantes, quienes son un constante recordatorio del amor y la fortaleza. Sus enseñanzas y experiencias han moldeado quién soy hoy y me han brindado el valor y la determinación para continuar adelante.*

*A mi madre María Luzmila Moreano, por su constante amor, apoyo incondicional y sacrificio en todos los aspectos de mi vida. Gracias por creer en mí y motivarme a alcanzar mis sueños, a mis hermanos por brindarme su cariño y apoyo constante durante mi proceso de formación. Este logro es para ellos, como muestra de mi amor y agradecimiento por todo lo que han hecho por mí. Los quiero con todo mi corazón.*

*Santiago Caisaguano*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios por darme la fuerza y valentía para salir adelante en los momentos difíciles.*

*A mi madre y hermanos por apoyo incondicional durante mi vida universitaria y por ser mi pilar constante de amor y motivación.*

*A la Universidad Técnica de Ambato, la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por brindarme una sólida formación académica y por darme las herramientas necesarias para desempeñarme como un profesional competente.*

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

*A mis amigos por ser una fuente constante de motivación y diversión. Gracias por estar a mi lado en los momentos buenos y malos, por animarme a seguir adelante y por hacer que mi vida universitaria fuera más llevadera y emocionante. Sin su ayuda, no habría sido posible culminar con éxito mi carrera.*

*Santiago Caisaguano*

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DE TUTOR .....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Antecedentes investigativos .....	1
1.1.1 Justificación.....	2
1.1.2 Fundamentación teórica .....	4
1.1.2.1 Bisagras Plásticas (PH) .....	4
1.1.2.2 Modos de colapso de la estructura del autobús.....	4
1.1.2.3 Tipos de bisagra plástica .....	5
1.1.3 Celdas múltiples .....	6
1.1.4 Espuma de Aluminio.....	8
1.1.4.1 Estructura .....	8
1.2 Objetivos .....	10
1.2.1 Objetivo General .....	10
1.2.2 Objetivos Específicos.....	10
1.3 Hipótesis.....	10

1.3.1 Señalamiento de variable de la hipótesis .....	10
1.3.1.1 Variable Independiente .....	10
1.3.1.2 Variable dependiente.....	10
1.3.1.3 Termino de relación .....	10
CAPÍTULO II .....	11
2.1 Materiales.....	11
2.1.1 Recursos humanos.....	11
2.1.2 Recursos institucionales .....	11
2.1.3 Recursos materiales.....	11
2.2 Métodos.....	12
2.2.1 Operación de variables.....	13
2.2.1.1 Variable Independiente .....	13
2.2.1.2 Variable Dependiente.....	14
2.3 Procedimiento .....	15
2.3.1 Condiciones para la simulación de vuelco de la superestructura.....	15
2.3.2 Dimensiones generales de la superestructura.....	15
2.3.3 Modelado CAD de la estructura sin refuerzo.....	17
2.3.3.1 Configuración de unidades en LS-DYNA .....	19
2.3.3.2 Mallado del modelo.....	20
2.3.3.3 Criterio jacobiano.....	22
2.3.3.4 Asignación de materiales. ....	23
2.3.4 Entrada para propiedades mecánicas del material .....	25
2.3.4.1 Asignación curva esfuerzo – deformación unitaria del material ASTM A-500 GRADO A.....	27
2.3.4.2 Asignación de la sección “SECTION” .....	28
2.3.5 Sujeción.....	29
2.3.6 Centro de gravedad .....	30

2.3.7	Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral .....	31
2.3.8	Cálculo de la velocidad angular .....	33
2.3.9	Parámetros iniciales para la simulación. ....	36
2.3.9.1	Contactos y controles para generar la simulación.....	37
2.4	Pre-proceso simulación. ....	38
2.4.1	Pos-proceso de la simulación .....	39
2.5	Refuerzos estructurales no convencionales.....	39
2.5.1	Refuerzos con configuraciones estructurales .....	39
2.5.1.1	Configuración de unidades.....	41
2.5.1.2	Mallado de los modelos .....	41
2.5.1.3	Asignación del material .....	42
2.5.1.4	Centro de gravedad .....	42
2.5.1.5	Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral de los refuerzos estructurales....	43
2.5.1.6	Cálculo de la velocidad angular para los refuerzos estructurales .....	44
2.5.2	Refuerzo estructural con Multi-Cell.....	45
2.5.2.1	Mallado de la estructura con refuerzo Multi-cell.....	46
2.5.2.2	Asignación del material .....	47
2.5.2.3	Centro de gravedad .....	47
2.5.2.4	Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral .....	48
2.5.2.5	Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo multi-cell. ....	48
2.5.3	Espuma de aluminio.....	49
2.5.3.1	Mallado de la estructura con refuerzo Espuma de aluminio .....	50
2.5.3.2	Asignación del material .....	50
2.5.3.3	Centro de gravedad .....	52
2.5.3.4	Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral .....	52
2.5.3.5	Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo espuma de aluminio.....	52

CAPÍTULO III.....	54
3.1 Análisis y discusión de los resultados.....	54
3.1.1 Análisis del espacio de supervivencia.....	54
3.1.2 Simulación 1 vuelco de la estructura del autobús sin refuerzo. ....	55
3.1.2.1 Comportamiento de las energías durante la simulación.....	56
3.1.2.2 Criterio del espacio de supervivencia .....	57
3.1.3 simulación 2 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso. ....	59
3.1.3.1 Comportamiento de las energías durante la simulación.....	60
3.1.3.2 Criterio del espacio de supervivencia .....	61
3.1.4 Simulación 3 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo entre la pared lateral y el piso. ....	62
3.1.4.1 Comportamiento de las energías durante la simulación.....	64
3.1.4.2 Criterio del espacio de supervivencia .....	64
3.1.5 Simulación 4 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo multi-cell. ....	65
3.1.5.1 Comportamiento de las energías durante la simulación.....	67
3.1.5.2 Criterio del espacio de supervivencia .....	67
3.1.6 Simulación 5 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo espuma de aluminio.....	69
3.1.6.1 Comportamiento de las energías durante la simulación.....	70
3.1.6.2 Criterio del espacio de supervivencia .....	71
3.1.7 Validación de resultados mediante la energía de Hourglass.....	72
3.1.8 Estructura de autobús por secciones .....	72
3.1.8.1 Comparación de deformación por secciones.....	73
3.2 Verificación de hipótesis.....	76
CAPÍTULO IV.....	82
4.1 Conclusiones .....	82

4.2 Recomendaciones.....	83
BIBLIOGRAFÍA .....	84
ANEXOS .....	88
Anexo 1 .....	89
Anexo 2A Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso.....	90
Anexo 2B Refuerzo entre la pared lateral y el piso .....	92
Anexo 3A Refuerzo Multi-cell.....	94
Anexos 4A Refuerzo Espuma de Aluminio .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variable Independiente .....	13
Tabla 2: Variable Dependiente.....	14
Tabla 3: Medidas básicas para construcción del autobús. ....	16
Tabla 4: unidades ingresadas en LS-DYNA .....	20
Tabla 5: Mallado de la carrocería.....	21
Tabla 6: Características del mallado de la estructura.....	23
Tabla 7: Propiedades mecánicas del material [15].....	24
Tabla 8: Espesor asignado en cada parte del autobús .....	29
Tabla 9: Sujeción de elementos mediante CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY .....	29
Tabla 10: Características del mallado de la estructura.....	42
Tabla 11: Centro de gravedad de la estructura autobús con refuerzos laterales entre la pared lateral y el piso. ....	43
Tabla 12: Características del mallado de la estructura con refuerzos Multi-cell .....	47
Tabla 13: Centro de gravedad de la estructura autobús con refuerzos Multi-cell.....	48
Tabla 14: Características del mallado de la estructura con refuerzos de espuma de aluminio .....	50
Tabla 15: Parámetros de entrada del material para el modelo de espuma Mat_154..	51
Tabla 16: Centro de gravedad de la estructura autobús con refuerzos espuma de aluminio .....	52
Tabla 17: Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura sin refuerzo ...	55
Tabla 18: Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo con juntas entre la pared y el piso.....	59
Tabla 19: Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo con juntas entre la pared y el piso .....	62
Tabla 20: Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo multi-cell. ....	65

Tabla 21: Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo de espuma de aluminio.....	69
Tabla 22: Validación de resultados mediante la energía de Hourglass.....	72
Tabla 23: descripción de color para cada sección de la superestructura.....	73
Tabla 24: comparación de deformación.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: formación de rótulas plásticas. ....	4
Figura 2: Superestructura de autobús después de un vuelco.....	5
Figura 3: Bisagra plástica combinada. ....	6
Figura 4: Riel delantero de un automóvil con refuerzo multicelda de paredes delgadas .....	7
Figura 5: Esquemas de tubos cuadrados de paredes delgadas de múltiples celdas .....	7
Figura 6: micrografía de espuma de aluminio de poro abierto . ....	9
Figura 7: micrografía de espuma de aluminio de poro cerrado. ....	9
Figura 8: Dimensiones para modelar carrocería de bus según reglamento NTE INEN 1668 vigente. ....	15
Figura 9: Estructura del frente y respaldo .....	17
Figura 10: Configuración de la estructura lateral derecha e izquierda.....	18
Figura 11: Configuración de la estructura superior e inferior.....	19
Figura 12: Estructura del autobús .....	19
Figura 13: Calidad de mallado según el criterio Jacobiano. ....	23
Figura 14: Diagrama esfuerzo deformación del material ASTM A-500 GRADO A [16].....	25
Figura 15: Definición del material ASTM A-500 GRADO A.....	26
Figura 16: Configuración de los puntos para la curva esfuerzo – deformación unitaria del acero ASTM A-500 GRADO A.....	27
Figura 17: Curva de deformación unitaria vs esfuerzo del material ASTM A-500 Grado A.....	27
Figura 18: Aplicación del espesor para la estructura del autobús.....	28
Figura 19: Sujeción de los componentes del chasis .....	30
Figura 20: Centro de gravedad .....	31
Figura 21: Ángulo de inestabilidad lateral y movimiento vertical del CDG. ....	32
Figura 22: Ángulo de inestabilidad lateral. ....	33

Figura 23: Movimiento vertical del centro de gravedad $\Delta h$ .....	34
Figura 24: Radio de giro .....	35
Figura 25: BOUNDAY_SPC del piso para restricción del movimiento .....	36
Figura 26: Initial_Velocity para asignar la velocidad angular .....	36
Figura 27: AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE para contacto de la estructura y piso.....	37
Figura 28: Command line parameters en ANSYS LS-DYNA RESEARCH.....	39
Figura 29: Juntas entre la pared lateral y el piso.....	40
Figura 30: Refuerzo entre la pared lateral y piso. ....	40
Figura 31: Mallado del autobús refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso..	41
Figura 32: Mallado del autobús con refuerzo entre la pared lateral y piso .....	42
Figura 33: configuración de sección transversal de 3x3 celdas .....	45
Figura 34: Configuración interna de estructura muti-cell en tubos laterales de la estructura del autobús.....	46
Figura 35: Mallado de la estructura con refuerzo Multi-cell .....	47
Figura 36: configuración interna espuma de aluminio en los tubos laterales de la estructura del autobús.....	49
Figura 37: malla de la estructura con refuerzo espuma de aluminio.....	50
Figura 38: Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional .....	57
Figura 39: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.....	57
Figura 40: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. ....	58
Figura 41: Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional .....	60
Figura 42: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.....	61

Figura 43: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. ....	62
Figura 44: Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional .....	64
Figura 45: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral. ....	64
Figura 46: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. ....	65
Figura 48: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral. ....	68
Figura 49: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. ....	68
Figura 51: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral. ....	71
Figura 52: Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. ....	72
Figura 53: Estructura de autobús.....	73

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realizó con el fin de analizar la influencia de los refuerzos estructurales no convencionales en la deformación de bisagra plástica en accidentes por vuelco en autobuses. Para ello, se modeló un autobús interprovincial utilizando como herramienta la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1668. Posteriormente, se utilizó ANSYS LS-DYNA RESEARCH para simular los elementos estructurales del modelo. Las simulaciones de prueba de vuelco se realizan siguiendo las especificaciones del Reglamento CEPE R66 con el objetivo de evaluar la resistencia al impacto y la seguridad de los ocupantes en caso de vuelco de un vehículo.

Con la investigación se concluyó que, el uso de refuerzos estructurales mejoró significativamente la resistencia y seguridad en colisiones de vuelco de autobuses. La simulación computacional permitió analizar la deformación de la estructura del autobús. Además, el uso de refuerzos estructurales no convencionales, como multicell y juntas entre la pared lateral y piso, demostró ser una alternativa para fortalecer la carrocería de autobús en colisiones de vuelco, por otro lado, el uso de espuma de aluminio como refuerzo estructural no aportó una mejora significativa en la resistencia y seguridad en colisiones de vuelco de autobuses.

**PALABRAS CLAVES:** Espuma de aluminio, Refuerzo estructural, Vuelco de autobús, Multi-cell, Carrocería de autobús.

## **ABSTRACT**

This thesis work was carried out with the aim of analysing the influence of non-conventional structural reinforcements on plastic hinge deformation in bus rollover accidents. For this purpose, an interprovincial bus was modelled using the Ecuadorian technical standard NTE INEN 1668 as a tool. Subsequently, ANSYS LS-DYNA RESEARCH was used to simulate the structural elements of the model. The rollover test simulations are carried out following the specifications of the UNECE R66 Regulation with the objective of evaluating the impact resistance and occupant safety in the event of a vehicle rollover.

The research concluded that the use of structural reinforcements significantly improved the strength and safety in bus rollover crashes. Computational simulation made it possible to analyse the deformation of the bus structure. In addition, the use of non-conventional structural reinforcements, such as multicell and sidewall-floor joints, proved to be an alternative to strengthen the bus body in rollover collisions. On the other hand, the use of aluminium foam as structural reinforcement did not provide a significant improvement in the strength and safety in bus rollover collisions.

**KEY WORDS:** Aluminium foam, Structural reinforcement, Bus rollover, Multi-cell, Bus body.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes investigativos

La prueba de vuelco es de suma importancia, ya que evalúa directamente la capacidad de la estructura del vehículo para preservar la integridad física de los ocupantes del autobús. En la actualidad, se están investigando alternativas que permitan mejorar la resistencia de la estructura sin aumentar su peso. Para ello, existen diversos estudios y artículos referencia que abordan este tema y proponen soluciones innovadoras. Algunos de ellos se citan a continuación: el objetivo es investigar las características de absorción de energía de las estructuras multicelulares bajo cargas de impacto. Donde se realizaron comparaciones exhaustivas de los tubos de varias celdas con diferentes topologías seccionales investigando el efecto de las celdas conectadas de forma múltiple en sus características de absorción de energía correspondientes, esto para llegar a la conclusión de que el tubo de cinco celdas exhibe las mejores características de resistencia al choque en comparación con otras configuraciones seccionales con la misma masa [1].

En otra investigación se utilizó la espuma de aluminio como absorbedor de impacto en la estructura de autobús, el objetivo es desarrollar una metodología para el estudio de un material diseñado para incrementar la capacidad de absorción de energía durante un evento de impacto, a partir de su producción, caracterización, aplicabilidad y uso en eventos con deformación programada. Se estudiaron las aplicaciones de la espuma, como el llenado de tubos, en eventos de impacto semi frontal y de vuelco lateral. Donde se muestra ensayos de probetas de acero tubular rellenas de espuma de aluminio con el fin de encontrar la estructura celular más favorable para la absorción de impactos. Concluyendo que el espacio de supervivencia del vehículo con espuma en los tubos laterales. Hubo una mejora relativa del 16,9% en la distancia entre el espacio de supervivencia y la estructura [2].

En otra de las investigaciones se estudió la influencia de las configuraciones estructurales de la superestructura de autobús en su rendimiento a la resistencia al vuelco con el objetivo de desarrollar un modelo de elemento finito (FE) de autobús a

escala real y siete modelos FE variantes que consideran diferentes configuraciones estructurales. Las variaciones estructurales investigadas incluyen la cercha, la distancia entre el riel de la ventana y el riel de la cintura, la configuración de las juntas entre el piso y la pared lateral, así como las estructuras de los pilares de la ventana lateral. Las pruebas de vuelco para todos los modelos se realizan de acuerdo con la norma CEPE R66 utilizando el software LS-DYNA, esto para llegar a la conclusión de que se infringe el espacio de supervivencia en cada modelo estudiado en esta investigación [3].

En otra investigación se analizó la resistencia al vuelco de autobús bajo el estándar europeo de la resistencia de la superestructura. En el estudio se determinó el mejor diseño de la estructura del autobús durante el fortalecimiento de la superestructura del autobús en condiciones de vuelco. El proceso de optimización se realizó mediante un método de análisis LS-DYNA, la investigación concluye que, a partir de los resultados obtenidos, la deformación del bastidor del autobús podría reducirse en un 49,2 % para los bastidores laterales inferiores y en un 39,4 % para los laterales superiores, mientras que solo aumentaba el peso del autobús en un 1,6 % utilizando el método de análisis de optimización presentado [4].

En el estudio, se desarrolló la simulación de un ensayo de vuelco de un autobús mediante LS-DYNA. En este análisis se realizan ensayos para comprobar la resistencia mecánica al vuelco en el software LS-DYNA de una estructura de autobús siguiendo las indicaciones presentes en la norma europea CEPE.R66 y analiza la distancia relativa del espacio residual de la estructura del vehículo, en este trabajo se aplicó el ensayo de péndulo contra una parte de la estructura del vehículo. Calculando la energía mínima que debe absorber la estructura determinando si invade el espacio de supervivencia [5].

### **1.1.1 Justificación**

Un autobús de pasajeros puede sufrir diferentes tipos de impactos en el momento del accidente, es decir, impacto frontal, impacto lateral, vuelco, etc. Caracterizando una gran amenaza para los pasajeros. En el Ecuador según las estadísticas de siniestros de tránsito entre enero y diciembre de 2022, se reportaron 1161 siniestros en buses, las

cuales 1354 resultaron con heridas y fallecieron 188 personas, esto representa el 8.5% de las muertes por siniestro de tránsito en el Ecuador [6].

Contribuir a la reducción del número de muertes por accidentes de vuelco de autobús en las carreteras del Ecuador es la motivación inicial de este trabajo. Las normas que regulan la resistencia estructural mínima de un autobús bajo vuelco ya están establecidas como es el caso del cumplimiento de conformidad indicado en el literal 5.1.5.2 de la normativa INEN 1323 que hace referencia a la regulación de las naciones unidad R66 CEPE, este requisito es de cumplimiento obligatorio para todas los fabricantes que de desean comercializar un modelo de autobús en el país, los ensayos deben ser ejecutados por laboratorios que se encuentre debidamente acreditados por consecuencia los laboratorios están obligados únicamente a entregar resultados del ensayo sin proporcionar algún criterio que mejore el diseño de la estructura de la carrocería, dejando a las empresas que generen su propia investigación para mejorar la resistencia estructural de los autobuses [7].

En el país se ha realizado muy poca investigación sobre el tema, en consecuencia, Las empresas de carrocerías no cuentan con la tecnología necesaria para realizar pruebas computacionales ni físicas para comprobar las resistencias de las estructuras de buses en vuelcos. Es un problema importante que poseen los diseños existentes en el mercado nacional, por lo que no pueden proponer nuevos diseños o alternativas de diseño que puedan mejorar la seguridad de sus carrocerías reduciendo el efecto de bisagra plástica en la estructura [7].

En este contexto, el presente trabajo tiene como principal objetivo indagar en el comportamiento de una estructura de autobús en un vuelco lateral, siguiendo los procedimientos de ensayo de la regulación CEPE R66. Este estándar nos permite realizar una simulación de un vuelco de autobús y así determinar la rigidez mínima de la estructura del autobús en un vuelco. Para simular un vuelco completo de bus se utilizará el método de elementos finitos a través del software comercial LS-DYNA, basado en deformaciones plásticas. El modelo se construirá con elementos de sección (cercha) y unas bisagras plásticas en varias uniones donde la estructura del bus puede tener este tipo de comportamiento durante el vuelco considerando que el lugar con mayor deformación es en la bisagra plástica lugar donde se propondrán distintos diseños [7].

## 1.1.2 Fundamentación teórica

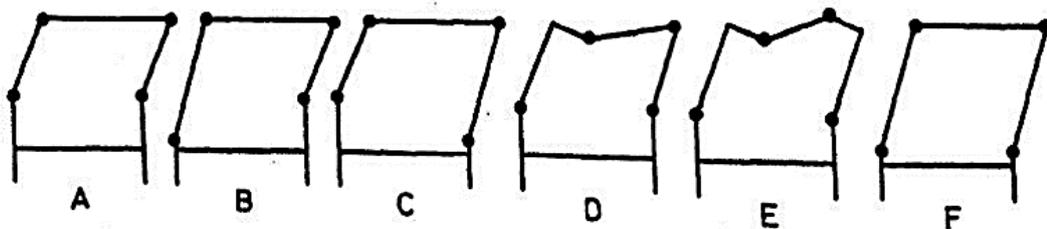
### 1.1.2.1 Bisagras Plásticas (PH)

En impactos de colisiones de vuelco, los elementos estructurales individuales se sobrecargan, principalmente en flexión, ocasionando deformaciones plásticas en regiones muy localizadas, denominadas bisagras plásticas. Estas deformaciones se desarrollan en los puntos donde se producen los momentos flectores máximos, o en los puntos de aplicación de la carga, en las juntas y zonas bastante débiles. Por lo tanto, para la mayoría de las situaciones prácticas, su ubicación se puede detectar fácilmente con mucha anticipación [7].

### 1.1.2.2 Modos de colapso de la estructura del autobús

Se producen dos tipos de modo de colapso en las estructuras de paredes delgadas durante el choque o vuelco de un autobús; el aplastamiento y la flexión. El aplastamiento es ocasionado cuando el esfuerzo actúa en dirección axial de tal manera que se supera la resistencia de pandeo en alguna zona del elemento. Una vez superado los desplazamientos laterales (umbral), la deformación aumenta bruscamente debido a la proliferación de las distorsiones geométricas de la estructura. El segundo mecanismo de colapso, por flexión, sucede cuando el momento de flexión supera a la resistencia de pandeo en alguna parte de la zona de compresión del elemento de pared delgada. Este segundo mecanismo es el más notable cuando ocurre un vuelco y el que da lugar al colapso del techo del autobús [8].

La bisagra plástica se produce en el proceso de plastificación del perfil de acero cuando es sometido a flexión. Los lugares donde aparecerán estas rótulas dependen de la dinámica de un accidente de vuelco, la configuración del suelo y las propiedades estructurales de la carrocería del autobús. La figura 1 muestra diversos modos de colapso del techo [8].

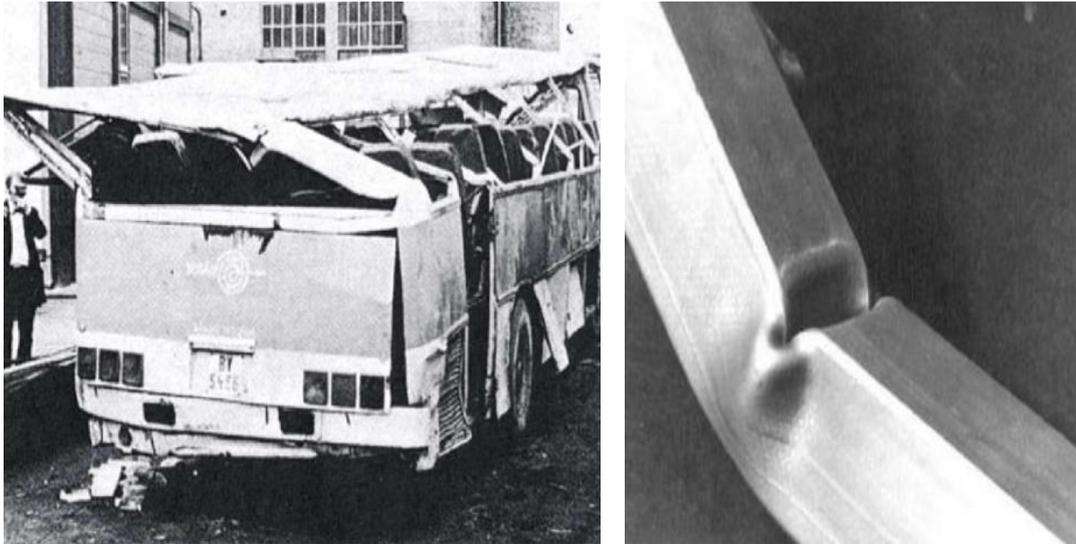


**Figura 1:** formación de rótulas plásticas [9].

### 1.1.2.3 Tipos de bisagra plástica

Se distinguen dos tipos de bisagra plástica:

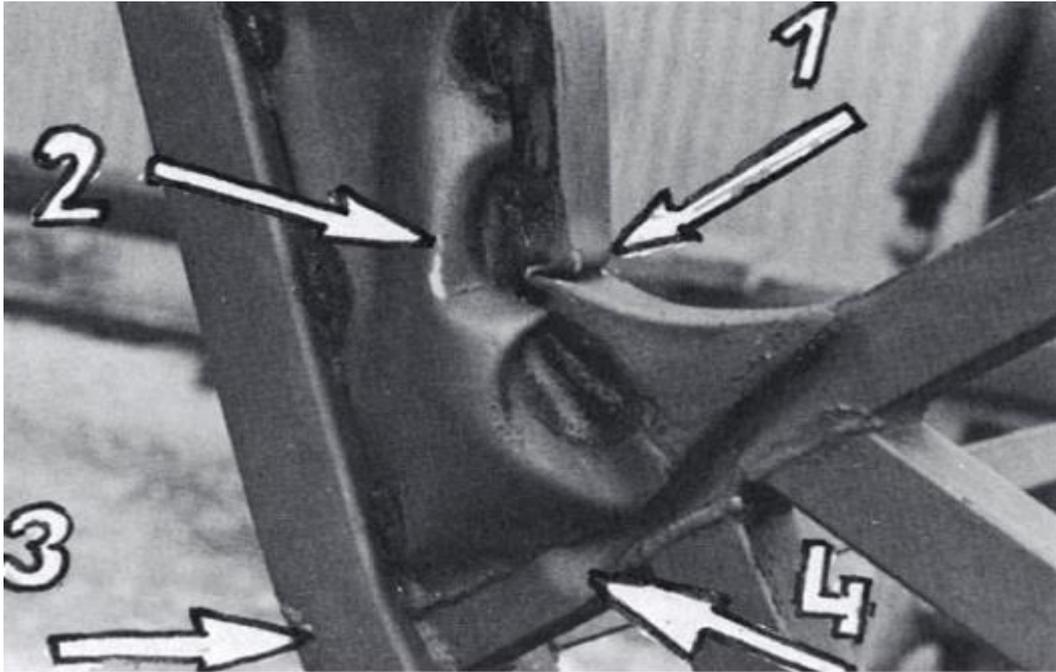
**-Bisagra plástica elemental:** se forman en elementos esbeltos de tipo barra Figura 2, incluidos los tubos de paredes delgadas donde la longitud del elemento es mucho mayor que las otras dos dimensiones [10].



**Figura 2:** Superestructura de autobús después de un vuelco [7].

Las deformaciones plásticas del PH elemental dan como resultado una rotación, desplazamiento, acortamiento de las partes rígidas no deformadas de la barra, sobre las que se forma la bisagra [10].

**-Bisagras plásticas combinadas:** se forman en elementos estructurales especiales de seguridad (por ejemplo, cerchas de seguridad para vuelco, plataforma de seguridad en la cabina del conductor, o sistema de parachoques de seguridad, etc.) generalmente estos elementos estructurales no son de tipo barra sino estructuras que ejercen de la unión de varios tubos y placas. Por lo tanto, se forma más de una rótula en un espacio pequeño y la inestabilidad no acontece hasta que el número de rótulas no llega a un número crítico. En la figura 3 se puede observar un ejemplo de PH combinado en un anillo de seguridad de autobús, que está conectado al travesaño de la estructura inferior [10].

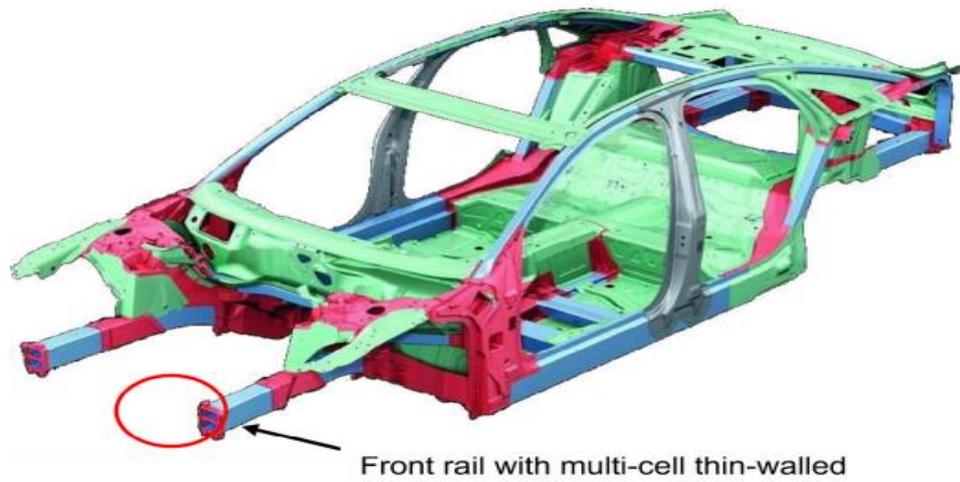


**Figura 3:** Bisagra plástica combinada [7].

Como se observa en la figura las partes rígidas de los elementos estructurales no se deforman mientras soportan rotación, desplazamiento, acortamiento, etc. Debido a las intensas deformaciones.

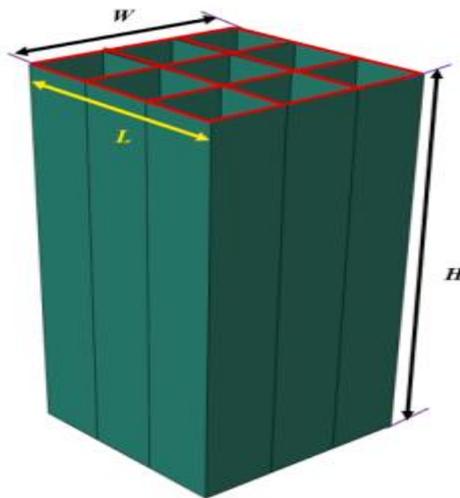
### **1.1.3 Celdas múltiples**

Las estructuras de paredes delgadas de celdas múltiples han llamado cada vez más el interés y se han aplicado ampliamente en las industrias automotriz y aeroespacial por sus grandes ventajas significativas en la absorción de energía y el peso ligero. En particular, estas estructuras en forma de tubo se han implementado ampliamente en el marco estructural de vehículos como absorbedores de energía de impacto frontal, como se muestra en la figura 4.



**Figura 4:** Riel delantero de un automóvil con refuerzo multicelda de paredes delgadas [1].

la estructura de celdas múltiples puede absorber la energía del impacto a través de la deformación plástica generada al aplastarse con la finalidad de proteger a las personas o partes del automóvil, como se muestra en la Figura 5 Las estructuras de pared delgada convencionales incluyen circulares, cuadradas, tubos elípticos, poligonales.



**Figura 5:** Esquemas de tubos cuadrados de paredes delgadas de múltiples celdas [11].

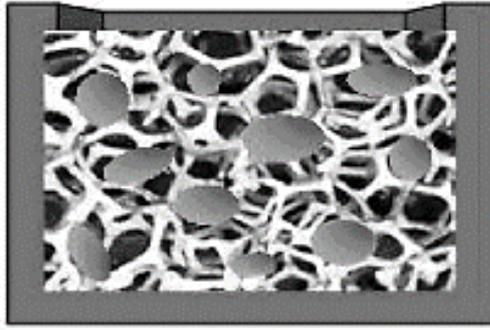
#### **1.1.4 Espuma de Aluminio**

La espuma de aluminio es un material metálico poroso relativamente isotrópico con una distribución aleatoria de los poros que conforman el interior de la estructura [12]. Los poros esféricos y cerrados ocupan el 50 al 90% del volumen total, obteniéndose materiales de baja densidad, generalmente en el rango de 0.4 a 0.8  $gr/cm^3$  donde las propiedades mecánicas y físicas dependen principalmente de dicha densidad. En particular, la espuma de aluminio, gracias a que tiene una densidad baja, es resistente a la corrosión y fácilmente manejable porque su temperatura de liquidus es relativamente baja, ofrece interesantes combinaciones en sus propiedades físicas y mecánicas característica de un material homogéneo, otorgando características esenciales, para la absorción de energía de impacto y vibración haciéndolas atractivas para aplicaciones en las industrias automotriz, aeroespacial y naval, además, las espumas de aluminio son reciclables y no contaminantes con el medio ambiente [12].

##### **1.1.4.1 Estructura**

Las espumas metálicas se clasifican de acuerdo a su estructura en espuma de celda cerrada, cuando los poros están separados, o de celda abierta cuando los poros están interconectados [13].

**-Espuma de aluminio de poro abierto:** Este tipo de espumas tienen especiales propiedades térmicas como lo son disipación de calor, recuperación de elementos, filtros y catalizadores que habilitan aplicaciones para la disipación de calor (Fig.6). La fabricación de este tipo de espuma está basada principalmente en la utilización de materiales de relleno que posteriormente son eliminados y se pueden obtener a partir del proceso de pulvimetalurgia [14] [13].



**Figura 6:** micrografía de espuma de aluminio de poro abierto [13].

**-Espuma de aluminio de poro cerrado:** La espuma de aluminio de poro cerrado se caracteriza por tener una gran rigidez específica y gran aislamiento acústico (Fig. 7) [13]. Pueden obtenerse por inyección directa de gases en el metal fundido, mediante el uso de agente espumante o a su vez por un precursor espumable [14].



**Figura 7:** micrografía de espuma de aluminio de poro cerrado [13].

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Analizar los refuerzos estructurales no convencionales en la deformación de bisagra plástica, en colisiones de vuelco de autobuses según el procedimiento de la CEPE R66, por medio de simulación computacional empleando software CAE

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Modelar la estructura de la carrocería de autobús que represente el modelo más común fabricado nacionalmente analizando estadísticas de producción nacional, utilizando un software CAD.
- Simular una colisión de vuelco según CEPE R66 utilizando un software CAE especializado, para evaluar incidencia en la deformación de la bisagra plástica implementando refuerzos no convencionales en la carrocería de autobús.
- Analizar los resultados entre las simulaciones del comportamiento de los refuerzos no convencionales de la estructura del autobús para identificar variaciones del cumplimiento del espacio de supervivencia descrito reglamento R66.

## **1.3 Hipótesis**

La utilización de refuerzos no convencionales influye en la resistencia de la estructura en colisiones de vuelco de autobuses según el procedimiento de la CEPE R66.

### **1.3.1 Señalamiento de variable de la hipótesis**

#### **1.3.1.1 Variable Independiente**

Refuerzos no convencionales

#### **1.3.1.2 Variable dependiente**

Resistencia de la estructura en colisiones de vuelco.

#### **1.3.1.3 Termino de relación**

Influirá

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1 Materiales**

##### **2.1.1 Recursos humanos**

El desarrollo del proyecto experimental será un esfuerzo conjunto entre el autor y el docente tutor. El autor será responsable de llevar a cabo la investigación y el docente tutor será su guía y apoyo durante todo el proceso de la investigación.

**Estudiante:** Caisaguano Moreano Santiago Alexander

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

##### **2.1.2 Recursos institucionales**

La biblioteca física y virtual de la Universidad Técnica de Ambato de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica es un recurso valioso para obtener información complementaria para el proyecto. Puede proporcionar acceso a libros, revistas, artículos y otros materiales de investigación que pueden ser útiles para el autor en la formulación del problema, la recopilación y análisis de datos, y la interpretación de los resultados.

##### **2.1.3 Recursos materiales**

- Laptop
- Programa: ANSYS LS-DYNA RESEARCH y SOLIDWORKS
- Internet
- Libros
- Revistas científicas
- Documentos técnicos
- Normas Nacionales e internacionales
- Biblioteca física y virtual

## **2.2 Métodos**

El objetivo del presente proyecto de investigación es mejorar la seguridad en la estructura de los autobuses. El proceso de investigación comienza con la recopilación de información y dimensiones generales de la estructura del autobús. A partir de esta información, se realiza el modelado de la estructura utilizando el programa SOLIDWORKS y se verifica su conformidad con la normativa NTE INEN 1668.

Luego, se exporta el modelo al software ANSYS LS-DYNA RESEARCH, donde se asigna una malla de 50 mm y se efectúa un análisis de la calidad de la malla mediante el criterio jacobiano. A continuación, se asignan los espesores a cada componente de la estructura del autobús y se coloca el material. Se calcula el centro de gravedad, ángulo de inestabilidad lateral y velocidad angular según el Reglamento CEPE R66 de las Naciones Unidas para Europa.

Finalmente, se determinan los parámetros iniciales y se configuran los controles necesarios para la simulación en ANSYS LS-DYNA RESEARCH. Luego, se correrá la simulación para evaluar la seguridad de la estructura en un ensayo de vuelco. Con esta información se pueden identificar las áreas de la estructura que requieren mejoras o fortalecimiento para garantizar la seguridad de los pasajeros en caso de vuelco. Este proceso permitirá obtener resultados valiosos que contribuirán al desarrollo de estructuras más seguras para el transporte público.

## 2.2.1 Operación de variables

### 2.2.1.1 Variable Independiente

Refuerzos no convencionales

**Tabla 1:** Variable Independiente

DEFINICIÓN DE LA VARIABLE	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICA E INSTRUMENTOS
<p>Los refuerzos no convencionales aumentan la resistencia de la estructura del autobús cuando esta sufre un accidente.</p> <p>Los lugares más eficientes que utilizan estos refuerzos son en la conexión entre base del piso con la parte lateral de la estructura, se aplican tres simulaciones por vuelco con refuerzos de espuma de aluminio, celdas múltiples y configuraciones estructurales.</p>	<p>Pruebas de vuelco con refuerzos no convencionales</p>	<p>Refuerzo con espuma de aluminio</p>	<p>Se realiza dos ensayos de vuelco la primera sin refuerzo y la segunda colocando por dentro de los tubos material de espuma de aluminio como refuerzo en la zona que conecta el piso y la parte lateral de la estructura</p>	<p>Simulación del ensayo de vuelco mediante el método de elementos finitos (ANSYS LS-DYNA RESEARCH)</p>
		<p>Refuerzo con celdas múltiples</p>	<p>Se realiza dos ensayos de vuelco la primera sin refuerzo y la segunda colocando en la parte interna del tubo elementos estructurales de acero de tipo multicell como refuerzo en la zona que conecta el piso y la parte lateral de la estructura</p>	
		<p>Refuerzo estructural de acero</p>	<p>Se realiza dos ensayos de vuelco la primera sin refuerzo y la segunda colocando refuerzo estructural de acero en la zona que conecta el piso y la parte lateral de la estructura.</p>	

### 2.2.1.2 Variable Dependiente

Resistencia de la estructura en colisiones de vuelco.

**Tabla 2:** Variable Dependiente

DEFINICIÓN DE LA VARIABLE	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICA E INSTRUMENTOS
La resistencia a las colisiones por volcamiento es la capacidad que tiene la estructura del autobús para absorber la energía cinética, los cuales deben garantizar una protección adecuada a los ocupantes del vehículo cuando ocurra un accidente por vuelco.	Resistencia de la estructura después del ensayo de vuelco	Invade el espacio de supervivencia	La deformación de la superestructura no invada el espacio de supervivencia cumple con lo requerido por el procedimiento de la CEPE R66	Simulación del ensayo de vuelco mediante el método de elementos finitos (ANSYS LS-DYNA RESEARCH)
		No invade el espacio de supervivencia	La deformación de la superestructura invada el espacio de supervivencia no cumple con el procedimiento de la CEPE R66	Simulación del ensayo de vuelco mediante el método de elementos finitos (ANSYS LS-DYNA RESEARCH)

## 2.3 Procedimiento

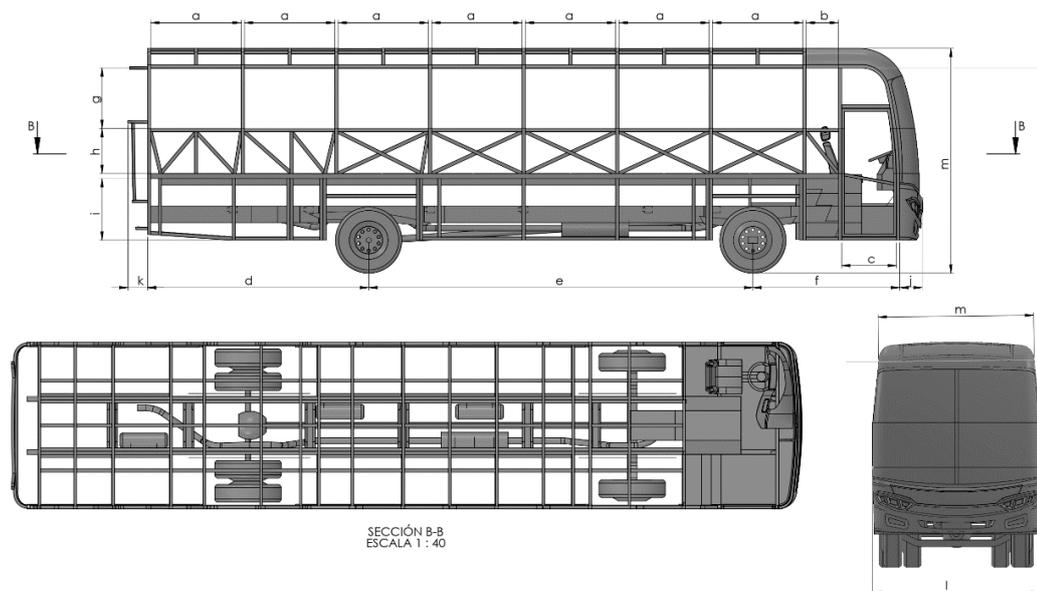
### 2.3.1 Condiciones para la simulación de vuelco de la superestructura

El análisis de ensayo de vuelco del autobús interprovincial se lleva a cabo a través de los requisitos indicados en la regulación R66 de la comisión económica para Europa CEPE cumpliendo los parámetros de homologación para autobuses.

Para someter a un autobús en un ensayo de vuelco, no es necesario que esté totalmente terminado o listo para su funcionamiento, el ensayo se puede realizar a una estructura completa o una sección, siempre que cumpla con las características básicas y no afecte la superestructura.

### 2.3.2 Dimensiones generales de la superestructura

Para el modelado de la carrocería de un autobús tipo interprovincial, se recopila toda la información relevante para generar un diseño que cumpla con los requisitos dimensionales establecidos en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1668, Algunos de los datos importantes a tener en cuenta se muestra en la tabla 3. Se establecen las medidas que tendrá el modelo para asegurarse de que cumpla con las regulaciones ecuatorianas para la construcción de carrocerías.



**Figura 8:** Dimensiones para modelar carrocería de bus según reglamento NTE INEN 1668 vigente.

**Tabla 3:** Medidas básicas para construcción del autobús.

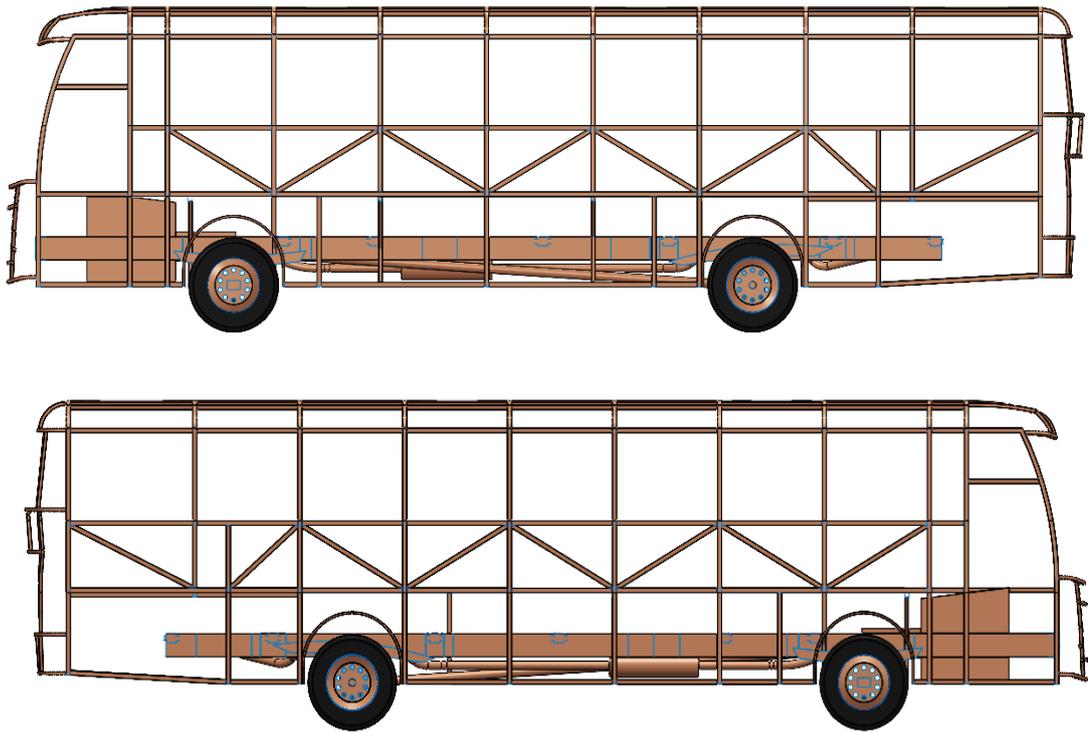
	<b>Dimensiones(mm)</b>	<b>Denominación</b>	<b>Norma/referencia</b>
	Marca de chasis	Mercedes Benz modelo OF 1723	
	Tipo de autobús	Interprovincial	NTE INEN 1668
a'	1420	Separación de cerchas	NTE INEN 1668
a	1170	Separación de cerchas	NTE INEN 1668
b	380	Separación de cerchas	NTE INEN 1668
c	950	Distancia de la puerta	NTE INEN 1668
d	3325	Voladizo posterior	NTE INEN 1668
e	5950	Distancia entre ejes	NTE INEN 1668
f	2265	Voladizo delantero	NTE INEN 1668
g	1000	Altura de las ventanas	NTE INEN 1668
h	775	Altura del piso al borde de la ventana	NTE INEN 1668
i	990	altura del faldón	NTE INEN 1668
j	300	Distancia más saliente del chasis a frente del autobús	NTE INEN 1668
k	490	Distancia más saliente del posterior del autobús	NTE INEN 1668
m	2510	Ancho superior	NTE INEN 1668
m'	3600	Alto de la carrocería	NTE INEN 1668
l	2600	Ancho de la carrocería	NTE INEN 1668
	2015	altura de la puerta	NTE INEN 1668
	1	Numero de puertas	NTE INEN 1668

### 2.3.3 Modelado CAD de la estructura sin refuerzo

Para crear el modelo de la carrocería de un autobús interprovincial, se siguen los datos especificados en la tabla 3. Primero, se modela la estructura en forma de superficies, empezando por la sección estructural (cerchas) donde estarán ubicados a lo largo del habitáculo de la carrocería, estas dan las características del vehículo como el alto y ancho del autobús, alto del pasillo, altura de las ventanas, altura del piso al borde de la ventana, altura de las cajuelas, entre otras características. A continuación, se modela las partes laterales y zona estructural superior, seguido del armazón frontal y posterior, y finalmente, se agrega la zona de las bodegas y los anclajes de la estructura al chasis, en la figura 9 muestra la vista frente y respaldo, mientras que la figura 10 muestra las vistas laterales derecha e izquierda. Además, en los anexos se presentan los planos del autobús interprovincial.

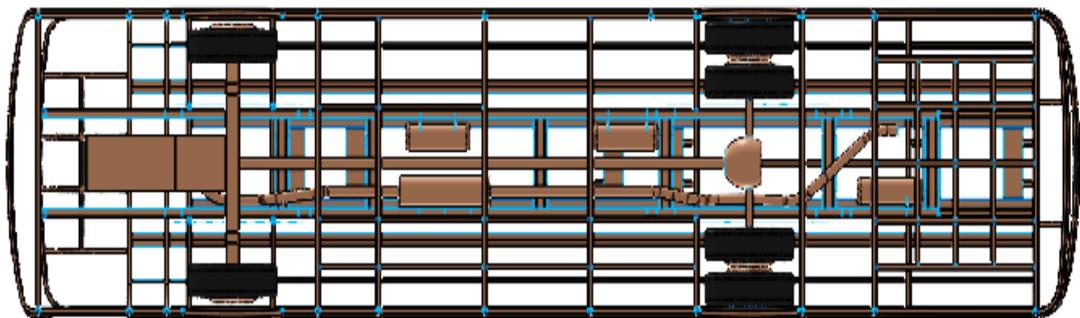


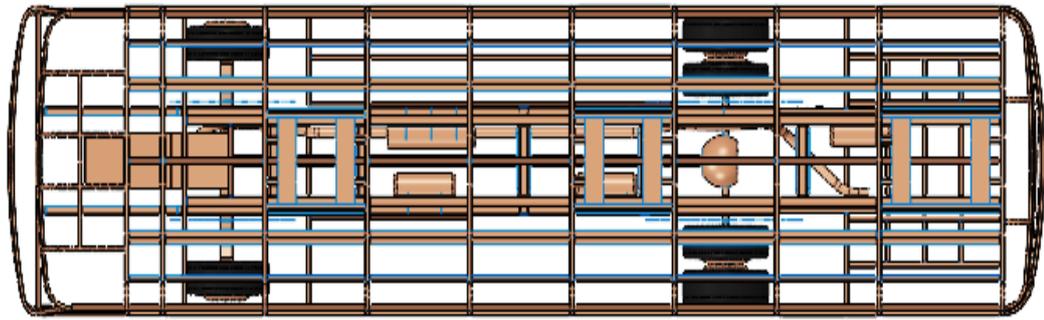
**Figura 9:** Estructura del frente y respaldo



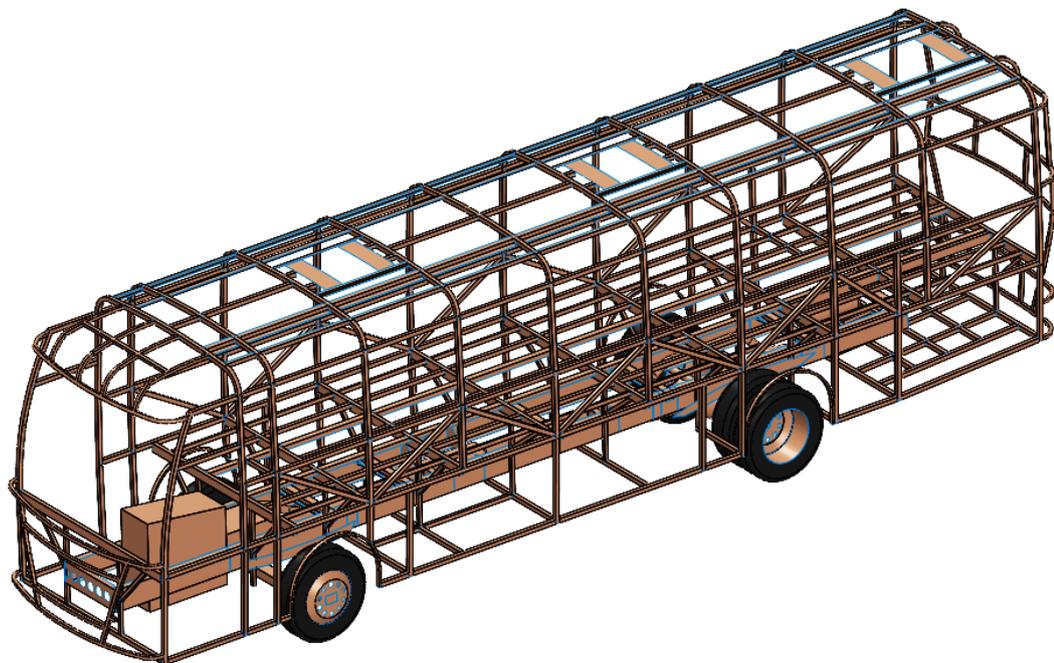
**Figura 10:** Configuración de la estructura lateral derecha e izquierda

En la figura 11, se presenta de manera clara y detallada las vistas superior e inferior del modelo del autobús interprovincial. Además, en la figura 12 se puede apreciar una representación tridimensional completa del vehículo. Este modelo ha sido cuidadosamente elaborado y está listo para ser sometido a los ensayos de vuelco virtuales.





**Figura 11:** Configuración de la estructura superior e inferior



**Figura 12:** Estructura del autobús

### **2.3.3.1 Configuración de unidades en LS-DYNA**

Finalizado el proceso de modelación CAD del bus interprovincial, es necesario configurar las unidades a trabajar en el programa LS-DYNA LS-prepost-4.5 para la interpretación de los resultados, las unidades deben ser considerados y transformadas al sistema de trabajo antes de su aplicación. Para el presente estudio se utiliza el sistema de unidades descritas en la tabla 4.

**Tabla 4:** unidades ingresadas en LS-DYNA

<b>Magnitud</b>	<b>Unidades</b>
Masa	Toneladas (Tn)
Longitud	Milímetros (mm)
Tiempo	Segundos (s)
Fuerza	Newton (N)
Esfuerzo	Mega Pascal (Mpa)
Energía	Newton-milímetro (Nmm)

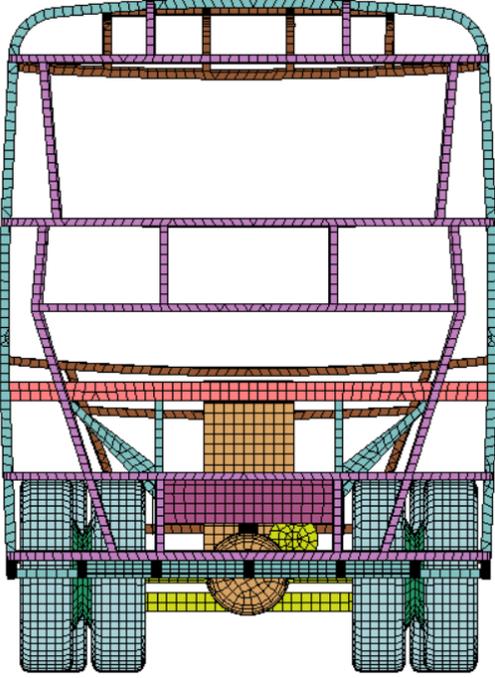
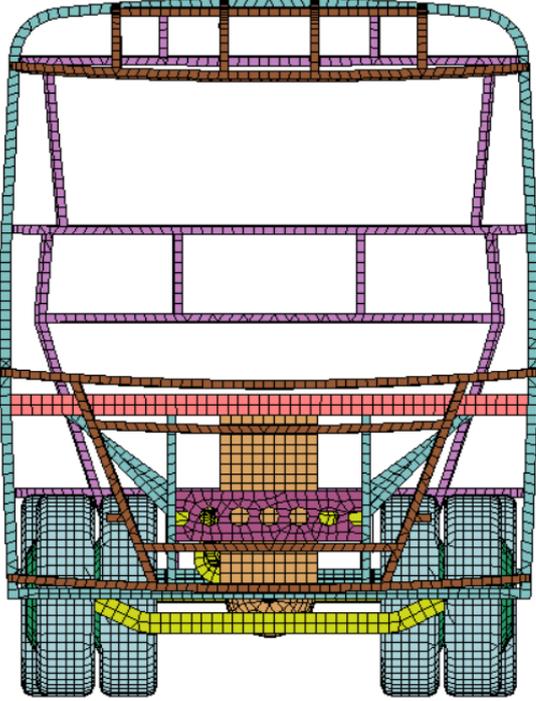
### **2.3.3.2 Mallado del modelo**

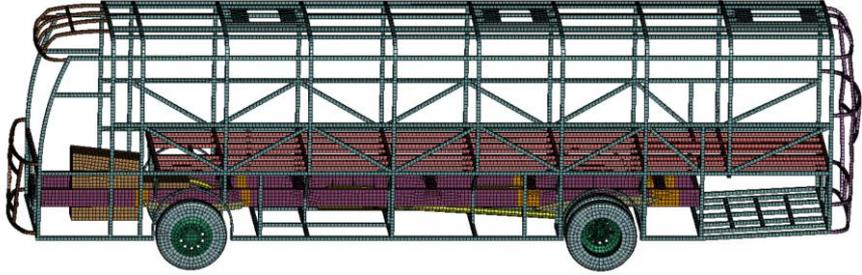
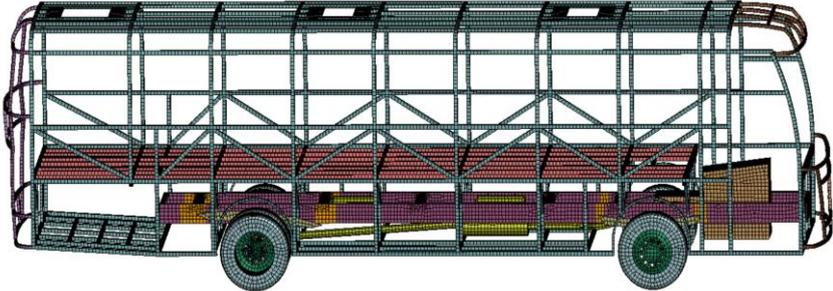
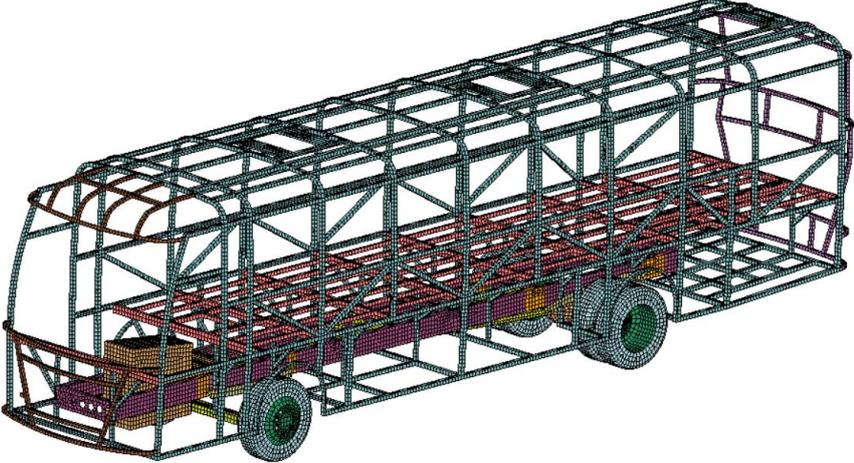
La generación de la malla para el autobús se lleva a cabo mediante el uso de LS-DYNA LS-prepost. Se crea una malla con elementos cuadriláteros y triángulos, con un tamaño de 50 mm como lo realizó [15] en base a los perfiles cuadrados utilizados para construir el modelo. Estos perfiles tienen un tamaño de 50x50x2 mm, lo que permite distribuir los elementos de manera uniforme y con una geometría mayoritariamente cuadrada, como se indica en la Tabla 5.

En cambio, para el área de supervivencia, piso y rampa, se utiliza un tamaño de malla de 200 mm, ya que esta zona no es crítica en el impacto y no requiere un análisis exhaustivo. Esto reduce el gasto computacional y el tiempo de duración de la simulación.

Es importante destacar que se considera una unión compartida de todos los nodos, que representan las uniones por soldadura entre los componentes estructurales. De esta forma, se garantiza que no haya interferencias y la estructura quede asegurada.

**Tabla 5:** Mallado de la carrocería

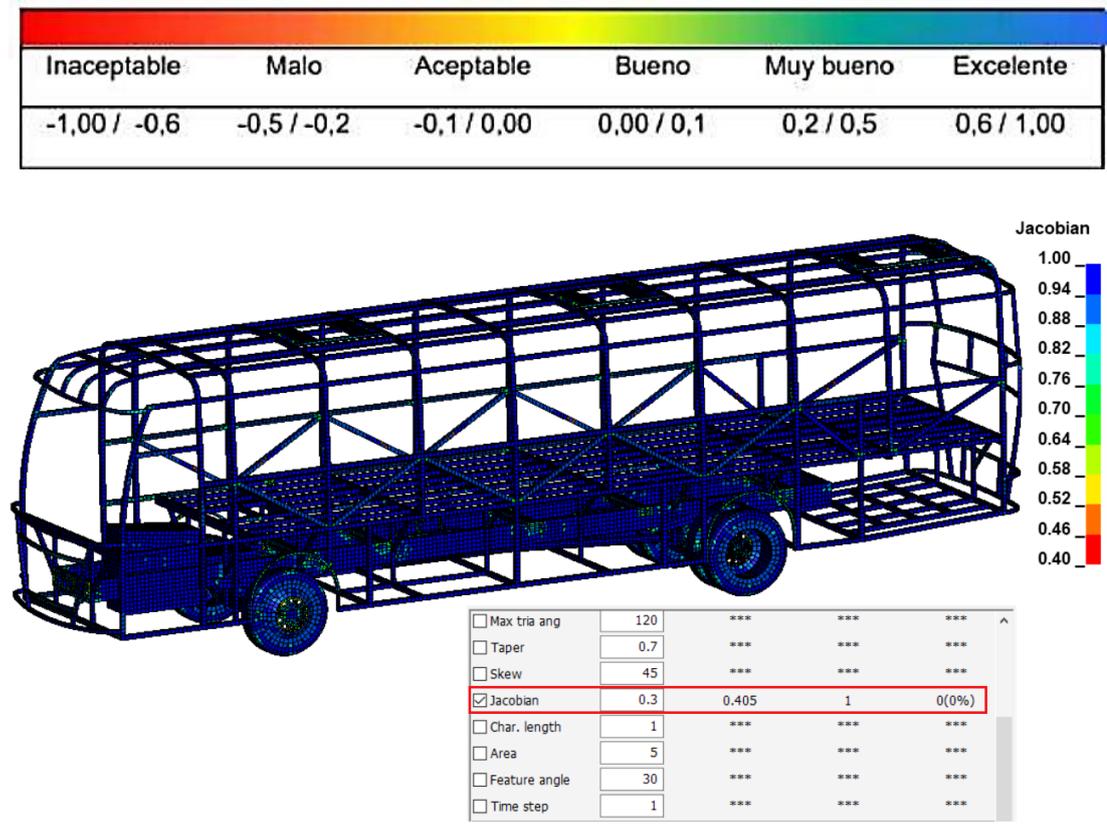
<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>
 A 3D wireframe mesh of a vehicle body, viewed from the rear. The mesh is composed of various colored lines: purple for the main frame, brown for the roof rails, red for the side rails, and yellow for the front bumper area. The wheels are represented by blue and green mesh structures.	Malla vista posterior
 A 3D wireframe mesh of a vehicle body, viewed from the front. The mesh is composed of various colored lines: purple for the main frame, brown for the roof rails, red for the side rails, and yellow for the front bumper area. The wheels are represented by blue and green mesh structures.	Malla vista frontal

	Malla vista lateral derecho
	Malla vista lateral izquierdo
	Malla vista isométrica

### 2.3.3.3 Criterio jacobiano

Este criterio evalúa la calidad de la malla de la estructura del autobús, en el presente estudio se realiza con un criterio de Jacobiano de índice de 0.3 como se ha mencionado [15], con el objetivo de garantizar un alto número de elementos de buena calidad, es fundamental tener una malla de alta calidad para asegurar la precisión de los resultados. Además, una malla de calidad también reduce el margen de error y permite

la recolección de información más detallada y precisa. En la figura 13 se ilustra la calidad de malla y el índice de calidad jacobiano, mientras que la tabla 6 proporciona la información detallada sobre el mallado de la estructura.



**Figura 13:** Calidad de mallado según el criterio Jacobiano [15].

**Tabla 6:** Características del mallado de la estructura

Propiedad	Cantidad o descripción
Número de elementos	64269
Índice de calidad jacobiano	0.3
Tipo de elemento	Shell 2d cuadrigato y rectangular

#### 2.3.3.4 Asignación de materiales.

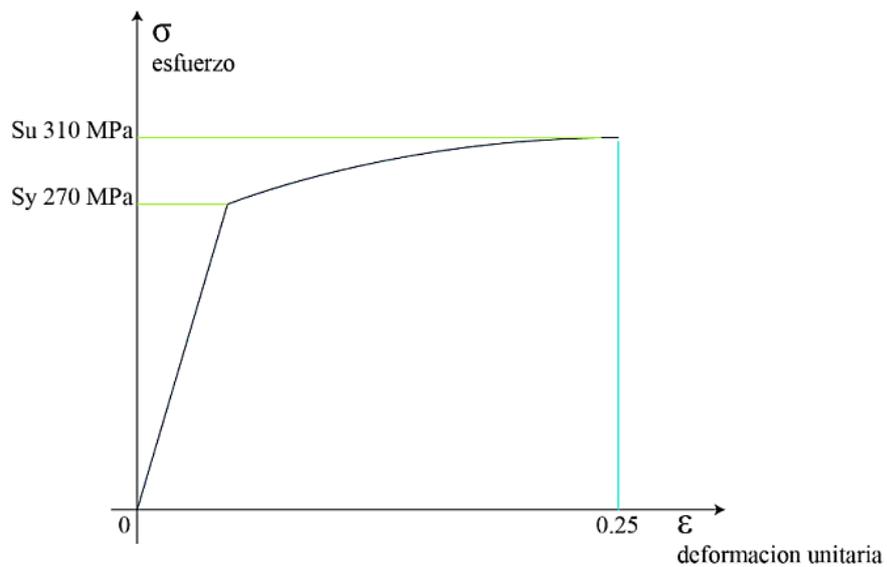
El material utilizado en las simulaciones se obtiene de las propiedades mecánicas especificadas en la norma NTE INEN 2415, utilizando el material estructural de

características ASTM A500 de grado A, mostrada en la tabla 7, siendo el material más utilizado por los fabricantes de carrocerías para la construcción de autobuses [15].

**Tabla 7:** Propiedades mecánicas del material [15].

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	<b>Tubos estructurales</b>	<b>270</b>	<b>310</b>	<b>25<sup>B</sup></b>
B	sección cuadrada, rectangular o especial	315	400	23 <sup>C</sup>
C		345	425	21 <sup>D</sup>
D		250	400	23 <sup>C</sup>
<sup>†</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 formula = 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.				

Esta tabla 7 presenta las propiedades mecánicas del material estructural ASTM A500 grado A, utilizado para la construcción de carrocerías de autobuses, todos los fabricantes de aceros deben cumplir con la norma NTE INEN 2415 [15]. Además, en la figura 14 muestra el diagrama esfuerzo-deformación del material, con un límite fluencia ( $S_y$ ) de 270 MPa, una resistencia última a la tracción ( $S_u$ ) de 310 MPa y una deformación unitaria máxima de 0.25 mm/mm. Además, los valores del material se han registrado en MAT\_24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, según se muestra en la Figura 15.



**Figura 14:** Diagrama esfuerzo deformación del material ASTM A-500 GRADO A [16].

#### 2.3.4 Entrada para propiedades mecánicas del material

El material que se utiliza en la estructura del autobús es MAT\_24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY. Material adecuado para aplicaciones de colisiones por vuelco, impactos y deformaciones [17]. La interfaz del programa requiere datos básicos del material entre ellos la densidad de masa, módulo de elasticidad, coeficiente de poisson, curva esfuerzo-deformación del ACERO ASTM A-500 GRADO A.

Keyword Input Form

Use \*Parameter
  Comment
 (Subsys: 1 Prueba 4 espacio sup.k)

\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY\_(TITLE) (024) ( 2 )

TITLE

TUBO CUA/RECTA/ O ESPECIAL ASTM A500 GRADO A

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>ETAN</u>	<u>FAIL</u>	<u>TDEL</u>
	1	7.830e-09	2.070e+05	0.3000000	270.00000	0.0	0.2500000	0.0
2	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>LCSS</u> <input type="checkbox"/>	<u>LCSR</u> <input type="checkbox"/>	<u>VP</u>			
	0.0	0.0	201	0	0.0			
3	<u>EPS1</u>	<u>EPS2</u>	<u>EPS3</u>	<u>EPS4</u>	<u>EPS5</u>	<u>EPS6</u>	<u>EPS7</u>	<u>EPS8</u>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	<u>ES1</u>	<u>ES2</u>	<u>ES3</u>	<u>ES4</u>	<u>ES5</u>	<u>ES6</u>	<u>ES7</u>	<u>ES8</u>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 5 Total deleted card: 0

**Figura 15:** Definición del material ASTM A-500 GRADO A

En la figura 15 se puede observar la asignación del material a la estructura del autobús tomado en cuenta las propiedades mecánicas del acero ASTM A-500 GRADO A. Los valores que se introducen en la interfaz del programa se muestran en el ANEXO 2 (Tabla de ANSYS LS-DYNA RESEARCH propiedades mecánicas del acero).

El material utilizado para los neumáticos es MAT\_TYPE\_001, ELASTIC MATERIAL, lo que significa que es un material elástico capaz de deformarse bajo carga y recuperar su forma original cuando se elimina la carga. Además, para el piso y plataforma el material asignado es MAT\_TYPE\_020, RIGID MATERIAL lo que permite una resistencia a la deformación y flexión, los parámetros del material se presentan en el anexo 1.

### 2.3.4.1 Asignación curva esfuerzo – deformación unitaria del material ASTM A-500 GRADO A

Keyword Input Form

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 Prueba 4 espacio sup.k)

\*DEFINE\_CURVE\_(TITLE) (2)

ASTM A500 GRADO A

LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP	LCINT
201	0	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0	0

Repeated Data by Button and List

A1	O1
0.0	270.0

1	0.0	270.0
2	0.015867	272.8571
3	0.0308755	275.7143
4	0.0464282	278.5714
5	0.062529	281.4286
6	0.0791818	284.2857

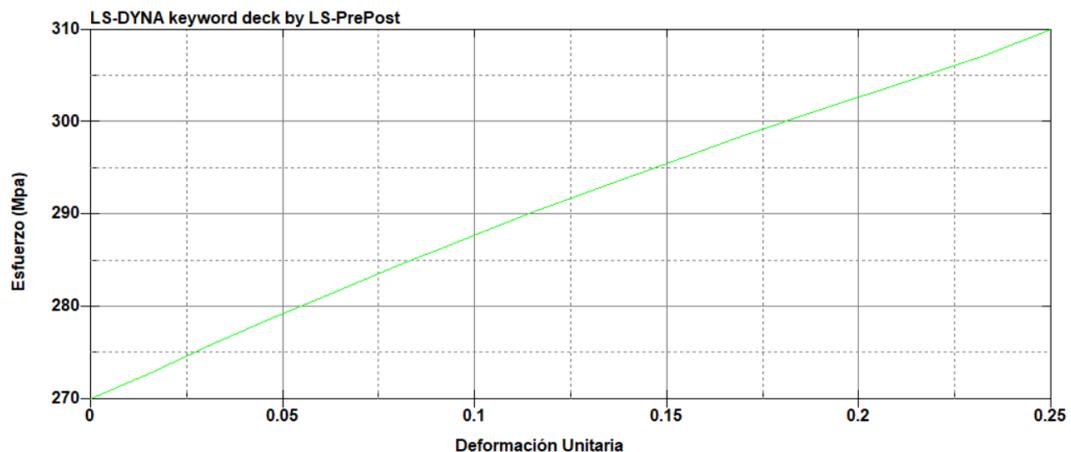
Data Pt. 1 Load XYData

Replace Insert Plot Raise

Delete Help New Padd

**Figura 16:** Configuración de los puntos para la curva esfuerzo – deformación unitaria del acero ASTM A-500 GRADO A

En la figura 16 se puede apreciar los valores ingresados para la curva esfuerzo-deformación unitaria iniciando en 0 hasta 270 en unidades de MPa, desde 270 MPa (Sy) hasta 310 MPa (Su). Teniendo en cuenta que el material se va a romper cuando llegue a un esfuerzo de 310 MPa con una deformación unitaria máxima de 0.25. En el anexo 1 muestra los valores ingresados en la curva esfuerzo deformación.



**Figura 17:** Curva de deformación unitaria vs esfuerzo del material ASTM A-500 Grado A

En la figura 17 muestra la representación de la curva formada con los valores ingresados del esfuerzo y deformación unitaria del acero ASTM A-500 GRADO A.

### 2.3.4.2 Asignación de la sección “SECTION”

La sección carta de control que nos brinda la capacidad de establecer los espesores de los componentes determinados por los elementos estructurales. En el caso de la estructura del autobús, que está compuesta por perfiles cuadrados de 50x50x2 mm, se ha asignado un espesor de 2 mm, tal como se muestra en la Figura 18 y utilizando el material MAT\_24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY.

Para la zona de supervivencia, se ha establecido un espesor mínimo de 0.0000001 mm para asegurar que no tenga ningún impacto en el resultado del ensayo. Este valor mínimo es necesario para garantizar la precisión de los resultados y para asegurar que no haya un error en la medición debido a la influencia de la zona de supervivencia en el ensayo. Con este espesor mínimo, se puede asegurar que los resultados obtenidos sean confiables y precisos.

SECID	ELFORM	SHRE	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	2	1.0000000	2	1	0	0	1

T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
2.0000000	2.0000000	2.0000000	2.0000000	0.0	0.0	0.0	0

**Figura 18:** Aplicación del espesor para la estructura del autobús

En la tabla 8 se especifican los espesores asignados en cada parte del autobús.

**Tabla 8:** Espesor asignado en cada parte del autobús

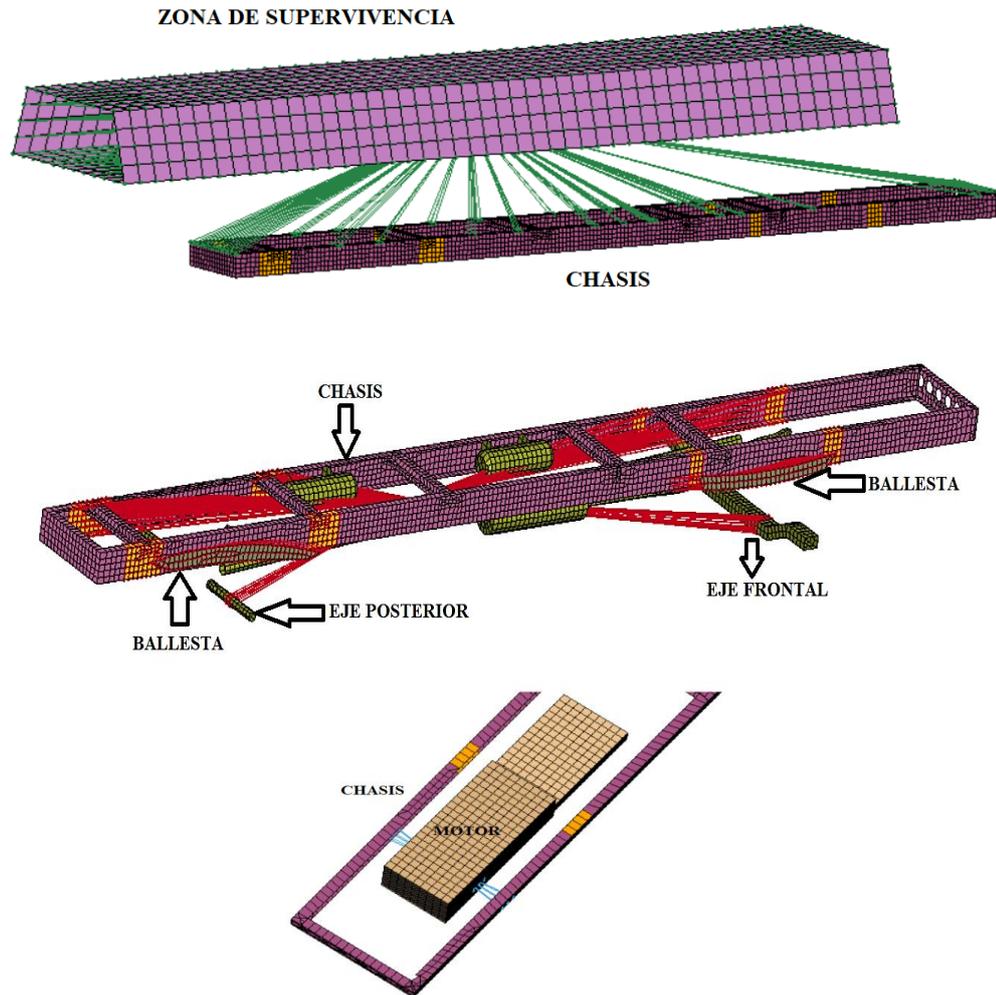
<b>Parte</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
Motor	40	1235
Chasis	7	591.47
Estructura	2	1407.25

### 2.3.5 Sujeción

CONSTRAINED\_NODAL\_RIGID\_BODY restringe los seis grados de libertad de movimiento; tres de traslación y tres de rotación, además permite sujetar los componentes no estructurales simplemente evitando cualquier movimiento entre los nodos restringidos correspondientes. Se debe usar con mucho cuidado ya que se está convirtiendo un punto deformable en un punto rígido en un cuerpo deformable y, por lo tanto, deben crearse entre nodos con pequeñas distancias en aplicaciones de ensamblaje [18]. En las cartas de control CREATION ENTITY, se utiliza la restricción CONSTRAINED\_NODAL\_RIGID\_BODY para asegurar la sujeción de los elementos que se encuentran en la Tabla 9. La Figura 19 describe en detalle cómo se lleva a cabo la sujeción.

**Tabla 9:** Sujeción de elementos mediante CONSTRAINED\_NODAL\_RIGID\_BODY

<b>Elementos</b>	<b>Elementos sujetos</b>
Chasis	Ballesta frontal derecha e izquierda
	Ballesta posterior derecha e izquierda
	Motor
	Zona de supervivencia
Eje frontal	Ballesta frontal derecha e izquierda
Eje posterior	Ballestera posterior derecha e izquierda



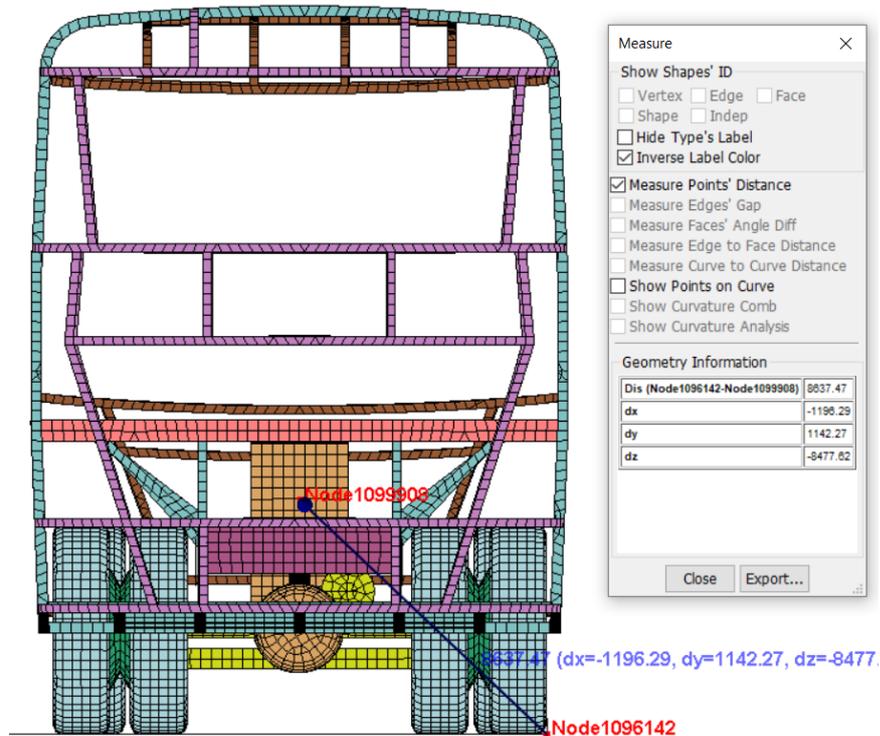
**Figura 19:** Sujeción de los componentes del chasis

### 2.3.6 Centro de gravedad

El programa LS-DYNA LS-PrePost nos brinda la capacidad de calcular el Centro de Gravedad (CDG) del autobús. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta ciertos aspectos previos a la obtención de este valor. Es importante que el mallado esté correctamente realizado, que se haya asignado el espesor adecuado a cada parte del autobús de acuerdo a la tabla 8 y que se haya definido el material de todas las estructuras y componentes del chasis, evitando incluir elementos que puedan interferir en la determinación del CDG.

Para determinar el centro de gravedad (CDG), en la sección ELEMNT\_TOOLS de LS-PrePost, seleccionamos la opción MEASURE > INERTIAL. Luego, elegimos la

opción ALL para determinar el CDG de todos los elementos y activamos la opción Global para medir en base a los ejes global.



**Figura 20:** Centro de gravedad

En la figura 20 se puede observar el centro de gravedad de la estructura del autobús, según Reglamento N° 66 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa [21] la energía de referencia y total depende de la posición del centro de gravedad.

Los datos obtenidos son:

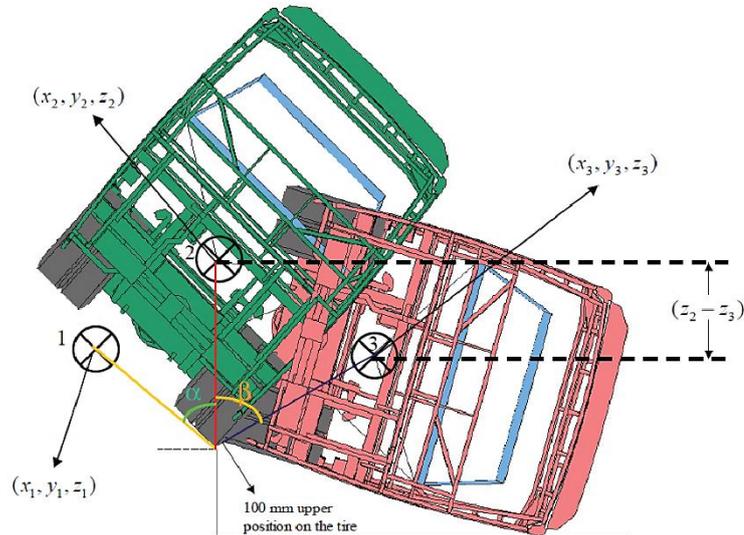
$$X_{cg} = 1300$$

$$Y_{cg} = 1142,27$$

### 2.3.7 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral

Para calcular el ángulo de inestabilidad lateral, el movimiento del centro de gravedad se giró alrededor del punto de pivote. Donde el ángulo de inestabilidad se produce en el instante que el CDG de la estructura, al rotar coincide con el eje vertical en relación

al punto de pivote, como se observa en la figura 21. Punto en el cual la estructura del autobús pierde estabilidad e inicia el vuelco.



**Figura 21:** Ángulo de inestabilidad lateral y movimiento vertical del CDG.

En la Figura 21 observar el ángulo de giro en tres posiciones que sufre la estructura del autobús durante la prueba de vuelco con respecto al centro de gravedad, en la posición 1 cuando la estructura esta estable, en la posición 2 cuando pierde estabilidad y en la posición 3 antes del impacto de la estructura con el piso.

El ángulo de inestabilidad es calculado con la siguiente fórmula.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{X_{cg}}{Y_{cg}} \right)$$

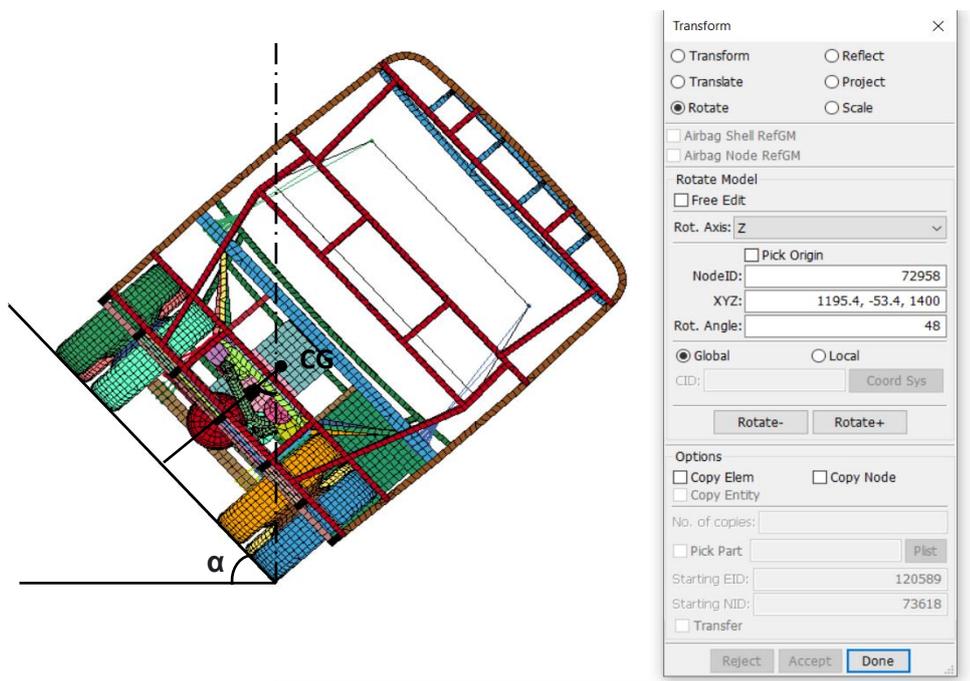
Donde:

El  $X_{cg}$  representa la distancia en el eje X desde el origen hasta el centro de gravedad, mientras que el  $Y_{cg}$  representa la distancia en el eje Y desde el origen hasta el centro de gravedad.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1300}{1142.27}\right)$$

$$\alpha = 48.69^\circ$$

Luego de realizar los cálculos, se ha determinado que la estructura del autobús va a perder estabilidad lateral cuando la plataforma para la prueba de vuelco rota un ángulo de  $48.69^\circ$ .



**Figura 22:** Ángulo de inestabilidad lateral.

En la figura 22, podemos observar el momento en el que la estructura del autobús pierde estabilidad lateral, es decir, antes de que comience el vuelco.

### 2.3.8 Cálculo de la velocidad angular

Se obtiene el valor de la velocidad angular, mediante la formulación de energía cinética y energía de referencia.

Para ello la energía de referencia se determina mediante la siguiente formula

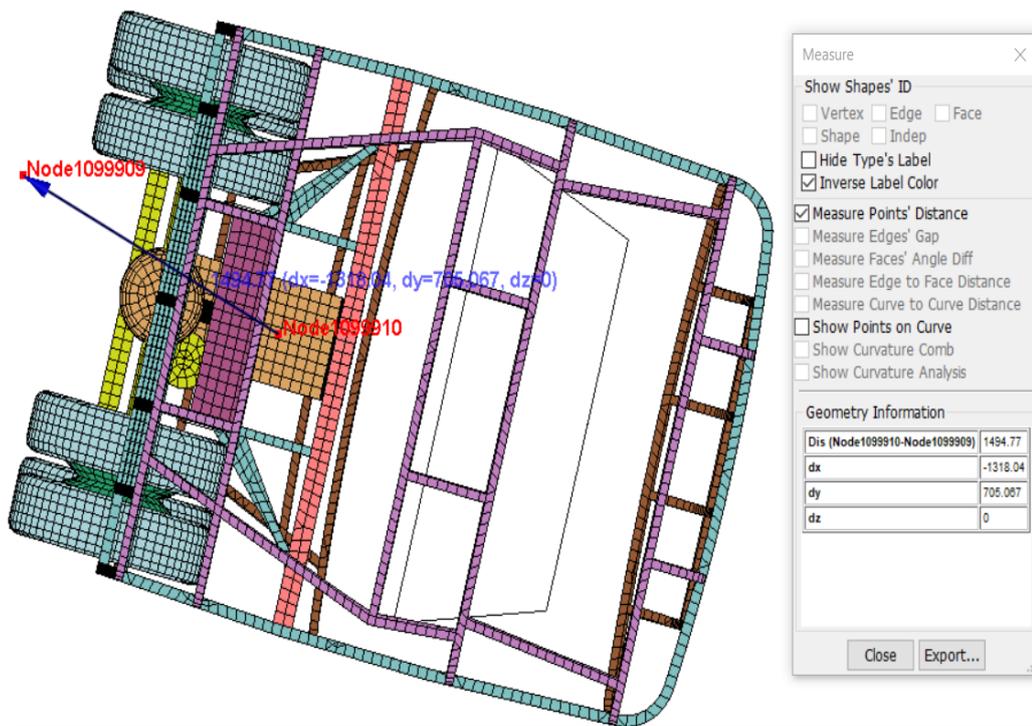
$$Er = 0.75Mg\Delta h$$

Donde:

M= Masa del autobús.

$g$ = valor de la gravedad.

$\Delta h$ = desplazamiento vertical medido desde el centro de gravedad del vehículo en equilibrio inestable hasta el impacto con el suelo [21], como se muestra en la figura 23.



**Figura 23:** Movimiento vertical del centro de gravedad  $\Delta h$

Datos:

$$g = 9800 \text{ mm/s}^2$$

$$\Delta h = 705 \text{ mm}$$

Energía cinética = Energía de referencia

$$\frac{1}{2} m V_{im}^2 = 0.75 m g \Delta h$$

$$v_{im} = \sqrt{1.5 g \Delta h}$$

$$v_{im} = \sqrt{1.5 * 9800 * 705}$$

$$v_{im} = 3219,39 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

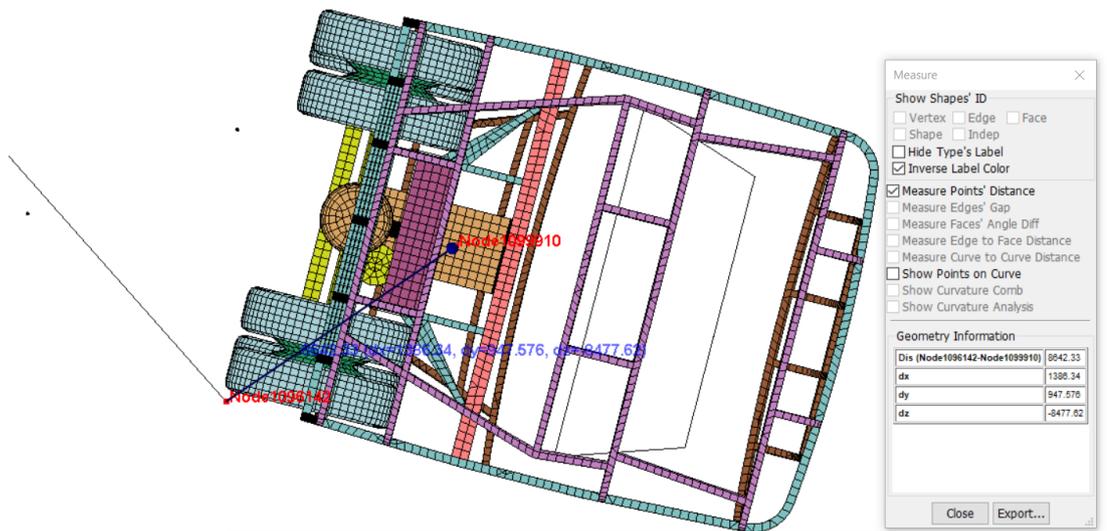
La fórmula para determinar la velocidad angular con la que va a impactar la superestructura al suelo se determina mediante:

$$W_{im} = \frac{V_{im}}{r}$$

Donde:

$W_{im}$  = Velocidad angular

$r$  = radio de giro, distancia del punto del eje de referencia hasta el punto del centro de gravedad, como se observa en la figura 24.



**Figura 24:** Radio de giro

En la Figura 24, muestra el valor de radio de giro que posee la estructura del autobús, la distancia es de 1386,34 mm.

$$W_{im} = \frac{3219,39 \text{ mm/s}}{1386,34 \text{ mm}}$$

$$W_{im} = 2.32 \text{ rad/s}$$

La velocidad angular es de 2.32 rad/s

### 2.3.9 Parámetros iniciales para la simulación.

Para simular el impacto y comprender el comportamiento de la estructura del autobús, se deben asignar soportes fijos en el piso. La restricción total del movimiento del piso se selecciona utilizando BOUNDARY\_SPC, como se muestra en la figura 25.

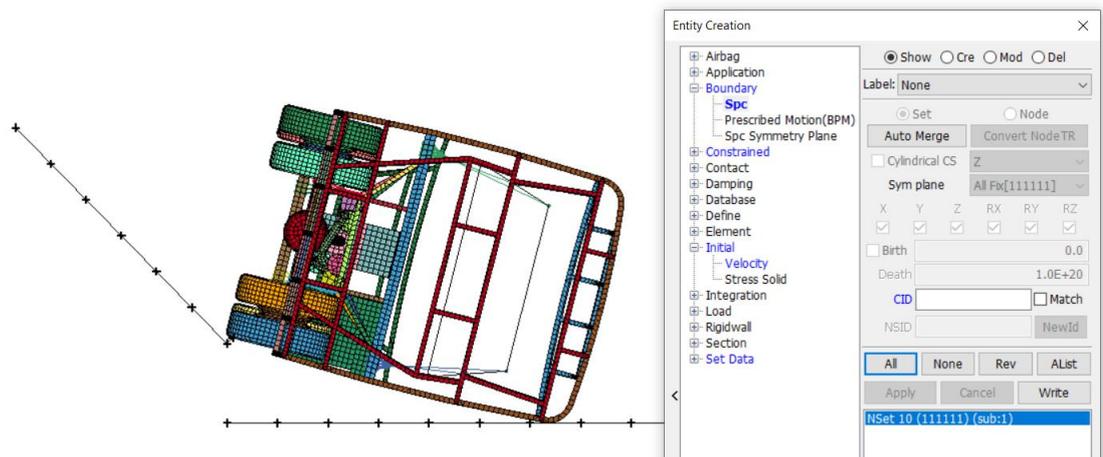


Figura 25: BOUNDARY\_SPC del piso para restricción del movimiento

Consecutivamente es importante colocar la velocidad angular con la que va a impactar la estructura del autobús con el piso con INITIAL\_VELOCITY se coloca el valor de la velocidad angular calculada, como se observa en la figura 21.

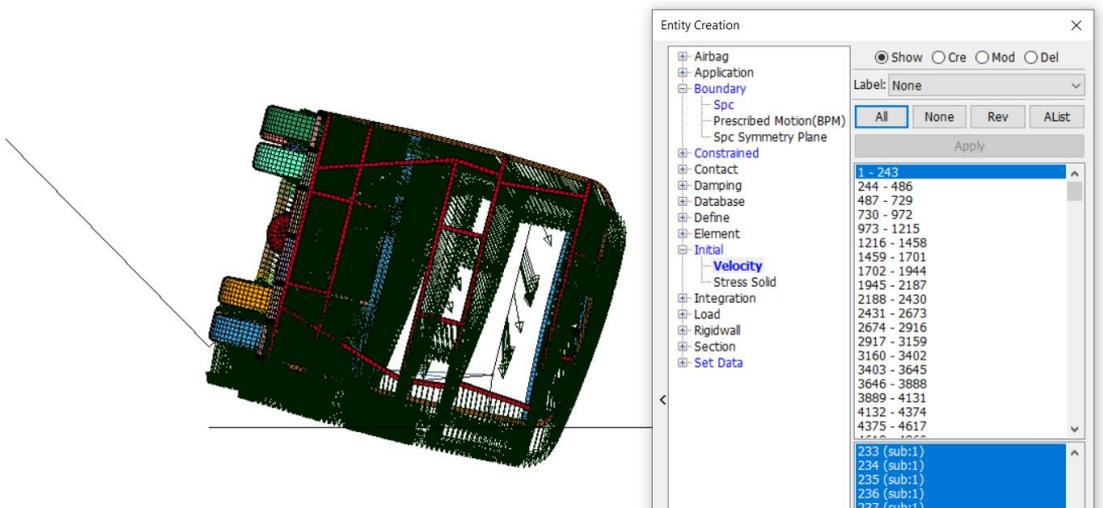


Figura 26: Initial\_Velocity para asignar la velocidad angular

### 2.3.9.1 Contactos y controles para generar la simulación.

Para generar la simulación es importante asignar la carta de control “CONTACT” ya que nos permitirá generar contacto entre los elementos, primero se debe generar dos SET\_PART de: la estructura del autobús, piso y rampa. Esto nos permitirá generar los contactos de forma reducida. La creación del contacto entre el autobús y el piso se logra mediante el uso de AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Durante la simulación, la superficie esclava se deformará mientras que la superficie maestra permanecerá rígida. Además, se deben establecer coeficientes de fricción dinámico y estático, como se muestra en la Figura 22. Los valores de estos coeficientes son de 0.3 y 0.2, respectivamente, según la referencia [19].

1	CID	TITLE	MPP					
	1	contacto estructura y piso	<input type="checkbox"/> MPP1	<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPARAMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	2	2	2	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

TITLE:=Interface descriptor. It is suggested that unique descriptions be used.

**Figura 27:** AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE para contacto de la estructura y piso

Los controles de simulación a utilizar son los siguientes:

**HOURLASS:** controla las energías aparecidas en las deformaciones con energías cero, en este caso se coloca un valor de 0.1, este valor asignado en el coeficiente no debe ser mayor a 0.15 ya que puede causar inestabilidad en los resultados si las deformaciones son grandes [20].

**Control de energías (ASCII\_OPTIONS):** esta carta de control nos permite activar los cálculos de las energías HOURLASS durante la simulación.

**Configuración datos de salida (BINARY\_D3PLOT):** salida de los resultados de deformación por intervalos de tiempo, se ingresó un incremento de tiempo de 0.01 segundos [21].

**Control de tiempo (TERMINATION):** en la simulación se refiere al tiempo de análisis que dura el proceso, no es necesario que coincida con la duración total de la simulación, ya que en ocasiones esta puede tardar mucho tiempo sin ser necesario. En estos casos, se selecciona un tiempo específico de interés, evitando así un mayor gasto computacional [19]. En el tema de impacto por vuelco, la duración de la simulación es de 0.2 segundos, tal como señala [22].

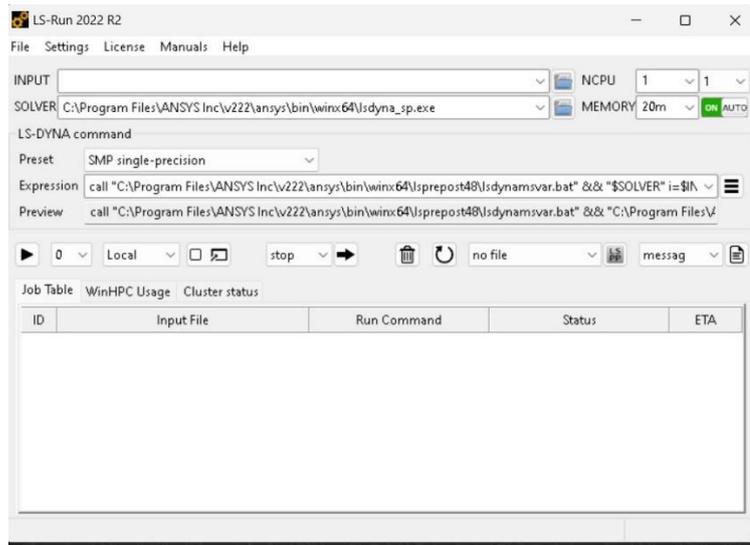
**Control del paso de tiempo (Timestep):** controla el intervalo de tiempo, se ingresó un paso de tiempo de  $-1e^{-6}$  segundos, de modo similar al estudiado de [21].

SHELL: control del comportamiento de la malla durante la simulación

ENERGY: calcula las energías

#### **2.4 Pre-proceso simulación.**

Para iniciar la simulación del presente estudio se seleccionó el icono start LS-DYNA análisis. Al hacerlo, apareció un cuadro de dialogo, tal como se muestra la figura 28, en el que se procedió a seleccionar el archivo .k. Asimismo, se ajustó la capacidad de la computadora y se ejecutó la simulación. El procesos de procesamiento computacional tomo un tiempo de 1 horas con 15 minutos, los resultados obtenidos se exponen en el capítulo III del presente estudio.



**Figura 28:** Command line parameters en ANSYS LS-DYNA RESEARCH

#### 2.4.1 Pos-proceso de la simulación

Durante esta etapa se logró la visualización de los resultados numéricos y gráficos obtenidos a través de la simulación. De esta manera, se lograron obtener los resultados necesarios para su análisis correspondiente. En el capítulo III del presente estudio, se exponen los resultados de forma detallada para cada una de las simulaciones realizadas.

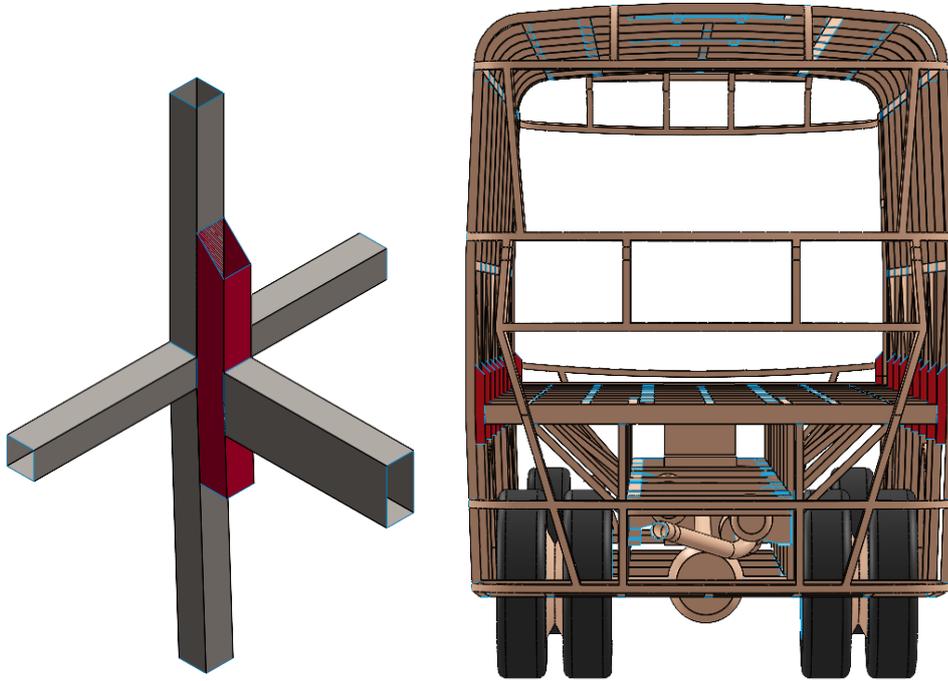
### 2.5 Refuerzos estructurales no convencionales

Para definir los lugares más eficientes para el uso de los refuerzos estructurales no convencionales, se utilizó el estudio realizado por [2], el cual simuló un evento de vuelco en un autobús y verificó que la bisagra plástica principal del autobús en situación de accidente por vuelco es la conexión entre la base del piso y el lateral del autobús. Siguiendo esta metodología, se asignaron refuerzos de espuma de aluminio, celdas múltiples al larguero inferior del costado del bus y refuerzos en las zonas que conectan la estructura lateral y el piso.

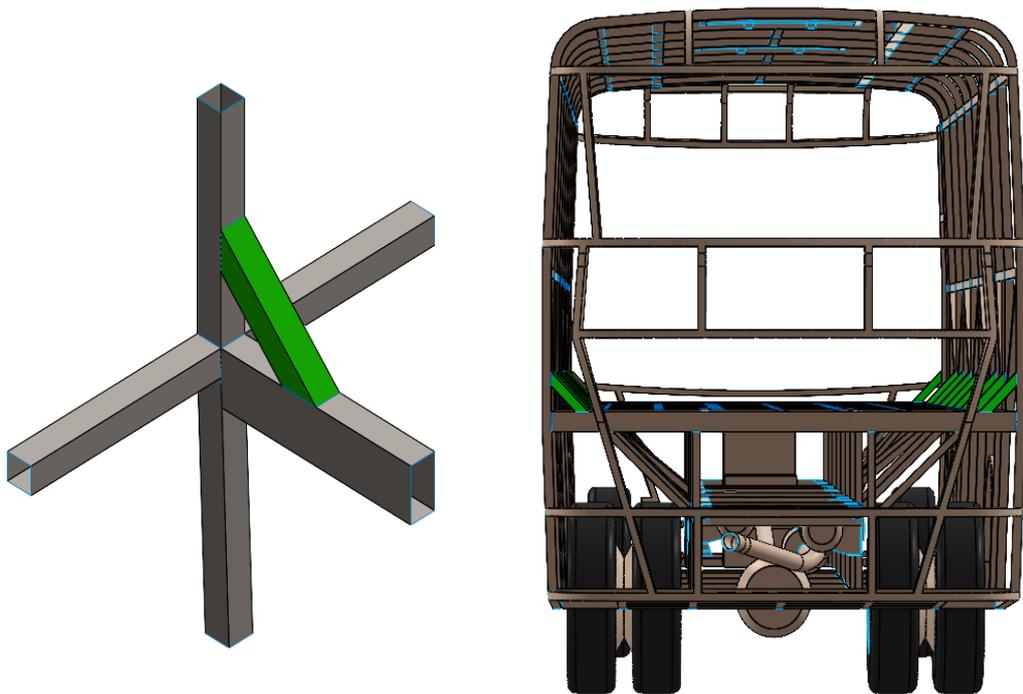
#### 2.5.1 Refuerzos con configuraciones estructurales

El presente estudio analiza la influencia de la configuración de la superestructura del autobús en el rendimiento de la resistencia al vuelco. Se desarrolla un modelo de elementos finitos de referencia como se describe en la sección 2.3.3. Se propone dos modelos FE que se derivan del modelo de referencia considerando diferentes configuraciones de superestructura, como juntas entre la pared lateral y el piso,

refuerzo entre la pared lateral y piso, como muestra la figura 28 y 29 respectivamente. Las simulaciones de vuelco se realizan de acuerdo a lo establecido en la norma técnica CEPE R66.



**Figura 29:** Juntas entre la pared lateral y el piso



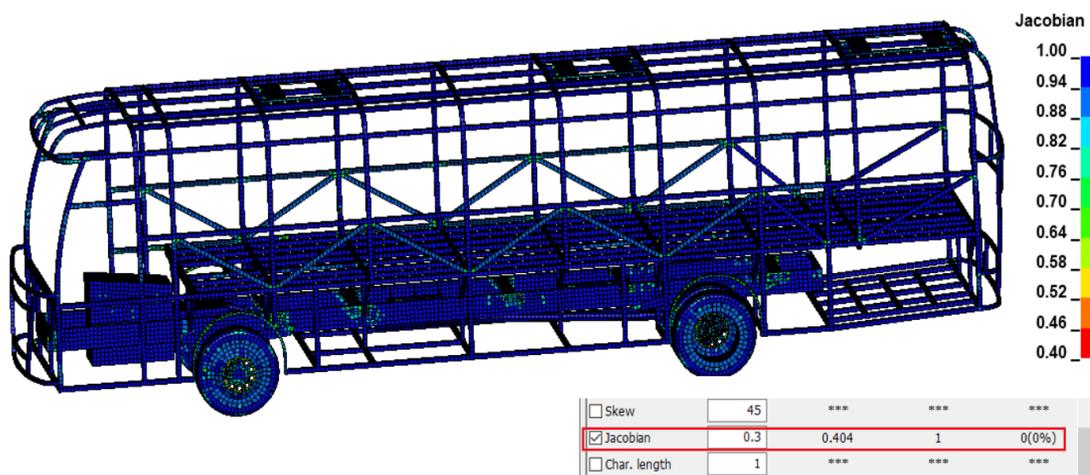
**Figura 30:** Refuerzo entre la pared lateral y el piso.

### 2.5.1.1 Configuración de unidades

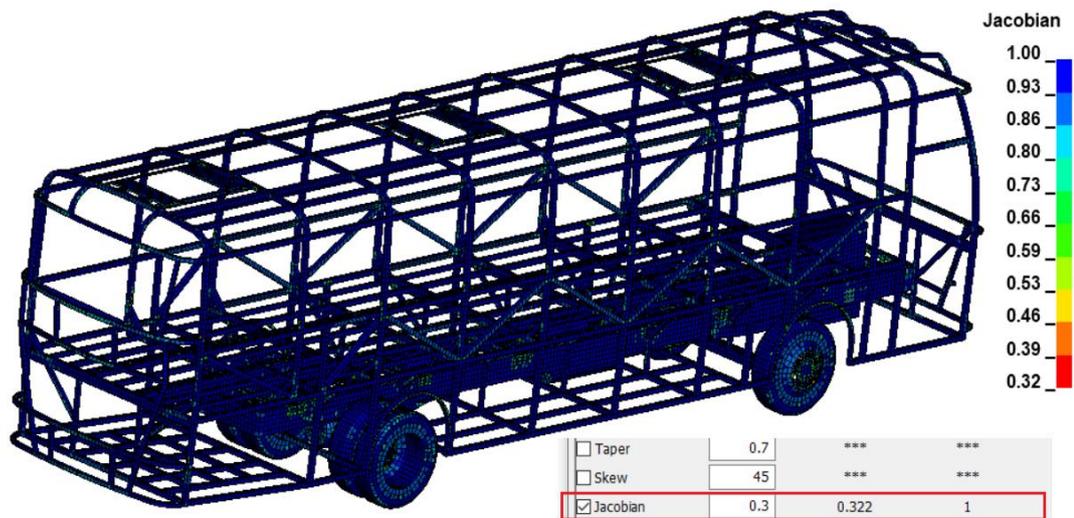
Es importante recordar la configuración de unidades a trabajar en el programa LS-DYNA, según lo establecido en la tabla 4 del procedimiento de la sección 2.3.3.1. Debe tenerse en cuenta que las unidades deben ser consideradas y transformadas al sistema de trabajo correspondiente antes de su aplicación

### 2.5.1.2 Mallado de los modelos

De modo similar a la configuración de la sección 2.3.3.2, el modelo de las estructuras del autobús con refuerzo se importó al programa LS-PrePost con formato STEP. A continuación, se realiza el mallado de cada una de la estructuras con un tamaño del mallado es de 50 mm. Con el propósito de comparar la resistencia de la estructura, se empleó el mismo modelo de mallado del procedimiento descrito en el apartado anterior (2.3.3.2), tal como se observa en las figuras 30 y 31. En la tabla 10 se presenta las características del mallado utilizado en la estructura.



**Figura 31:** Mallado del autobús refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso



**Figura 32:** Mallado del autobús con refuerzo entre la pared lateral y piso

**Tabla 10:** Características del mallado de la estructura

Modelo	Número de elementos	Índice de calidad jacobiano	Tipo de malla
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	64660	0.3	Shell
Refuerzo entre la pared lateral y piso	64324	0.3	Shell

### 2.5.1.3 Asignación del material

Se asignan las propiedades del material según la tabla 7. Para introducir las propiedades mecánicas del material, se sigue el procedimiento descrito en el apartado 2.3.4 y 2.3.4.1, así como la asignación de espesores y sujeción de los componentes de la estructura.

### 2.5.1.4 Centro de gravedad

Para determinar el centro de gravedad (CDG), se utiliza la metodología descrita en la sección 2.3.6. en la sección ELEMNT\_TOOLS de LS-PrePost, seleccionamos la opción MEASURE > INERTIAL. Luego, elegimos la opción ALL para determinar el CDG de todos los elementos y activamos la opción Global para medir en base a los ejes global. Véase Anexo 2A y 2B. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 11:

**Tabla 11:** Centro de gravedad de la estructura autobús con refuerzos laterales entre la pared lateral y el piso.

<b>Refuerzo</b>	<b>Masa (Tn)</b>	<b>Xcg (mm)</b>	<b>Ycg (mm)</b>
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	5.073	1300	1143.68
Refuerzo entre la pared lateral y piso	5.052	1300	1143.61

### 2.5.1.5 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral de los refuerzos estructurales

En cuanto al ángulo de inestabilidad lateral de los dos refuerzos estructurales mencionados, se determina cuando el centro de gravedad del vehículo, al rotar está completamente vertical con respecto al punto del pivote. En ese punto, la estructura del autobús pierde estabilidad.

El ángulo de inestabilidad lateral se calcula como se describe en la sección 2.3.7. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 11.

Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1300}{1143.68}\right)$$

$$\alpha = 48.66^{\circ}$$

Refuerzo entre la pared lateral y piso

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1300}{1143.61}\right)$$

$$\alpha = 48.66^{\circ}$$

Obtenido los cálculos se determinó que la estructura del autobús va a perder estabilidad lateral cuando la plataforma para la prueba de vuelco rota un ángulo de  $48.66^{\circ}$ , véase anexo 2A y 2B

### 2.5.1.6 Cálculo de la velocidad angular para los refuerzos estructurales

La velocidad angular se calcula utilizando la formulación de la energía cinética y la energía de referencia, que se menciona en la sección 2.3.1.1

-Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso el valor de  $\Delta h$ , véase anexo 2A

Datos:

$$g = 9800 \text{ mm/s}^2$$

$$\Delta h = 707.95 \text{ mm}$$

$$v_{im} = \sqrt{1.5 * 9800 * 707.95}$$

$$v_{im} = 3225,95 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

-Refuerzo entre la pared lateral y piso el valor de  $\Delta h$ , véase anexo 2B

Datos:

$$g = 9800 \text{ mm/s}^2$$

$$\Delta h = 705.58 \text{ mm}$$

$$v_{im} = \sqrt{1.5 * 9800 * 705.58}$$

$$v_{im} = 3200,57 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

La fórmula para determinar la velocidad angular de impacto de la superestructura al suelo se calcula utilizando la formula mencionada en la sección 2.3.8

-Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso, el valor de  $r$ , véase anexo 2A

$$W_{im} = \frac{3219,39 \text{ mm/s}}{1388,85 \text{ mm}}$$

$$W_{im} = 2.322 \text{ rad/s}$$

La velocidad angular es de 2.32 2rad/s para refuerzo entre la pared lateral y piso

-Refuerzo entre la pared lateral y piso, el valor de  $r$ , véase anexo 2B

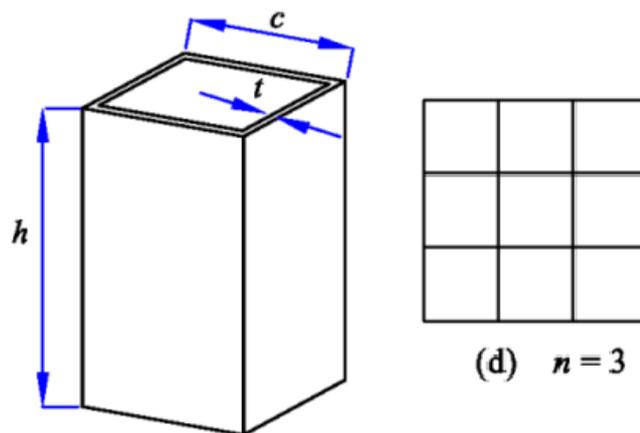
$$W_{im} = \frac{3200,57 \text{ mm/s}}{1388,71 \text{ mm}}$$

$$Wim = 2.319 \text{ rad/s}$$

La velocidad angular es de  $2.319 \text{ rad/s}$  para refuerzo entre la pared lateral y piso.

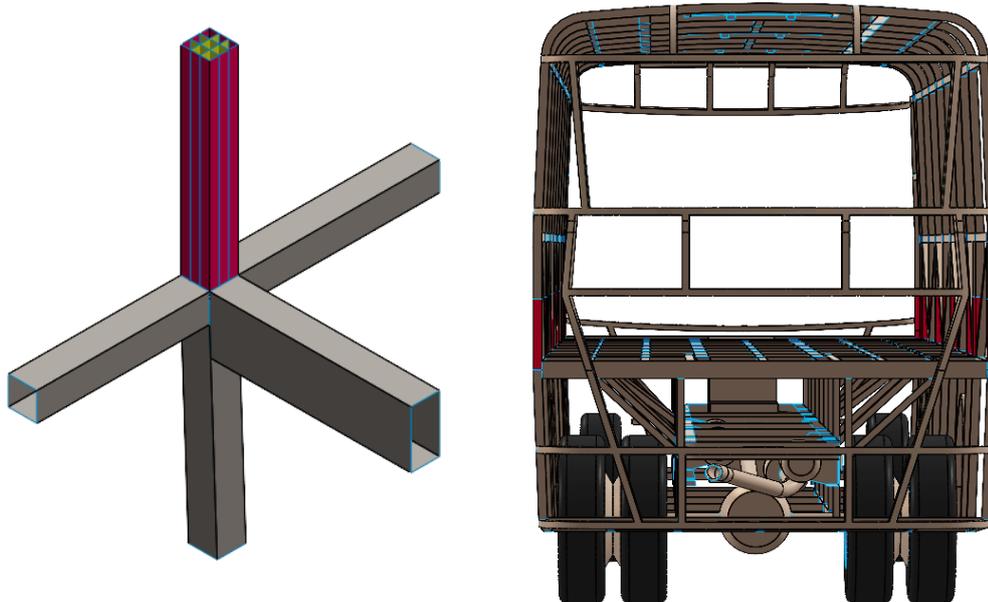
### 2.5.2 Refuerzo estructural con Multi-Cell

Se estudia un modelo de estructura multi-cell de pared delgada mediante ANSYS/LS-DYNA para determinar la influencia de las celdas múltiples en ensayos por vuelco. Se modela una estructura con configuración de sección transversal de  $3 \times 3$  celdas con ancho de sección  $c = 50 \text{ mm}$  y altura  $h = 400 \text{ mm}$ . La estructura multi-cell se puede describir mediante los siguientes parámetros geométricos: espesor de pared  $t$ , ancho  $c$  y longitud  $h$  como se observa en la figura 33.



**Figura 33:** configuración de sección transversal de  $3 \times 3$  celdas

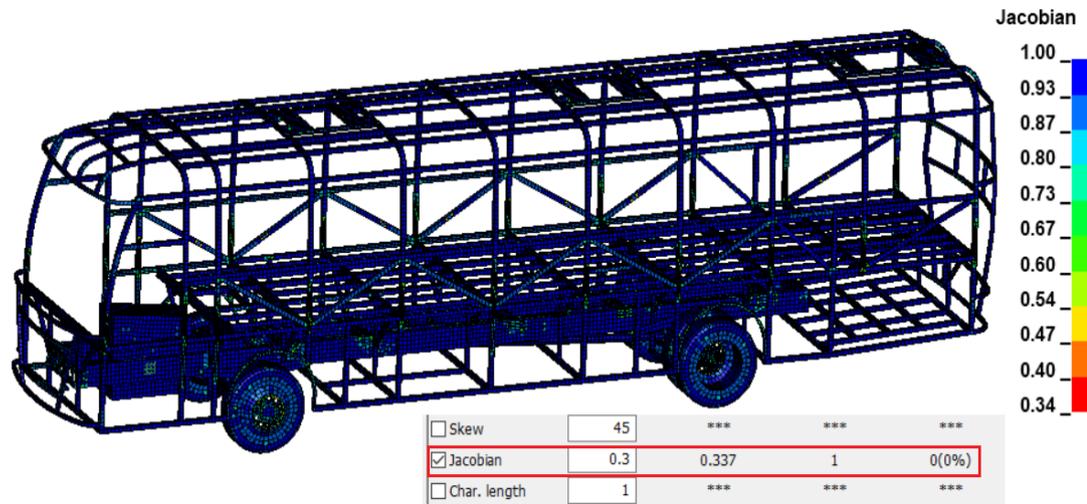
Para realizar el modelo, se preparó la geometría de la superestructura en modelo de superficies como describe en 2.3.3. El refuerzo multicell es colocado en cada cercha a la altura donde conecta el piso y la pared lateral, como muestra la figura 34.



**Figura 34:** Configuración interna de estructura multi-cell en tubos laterales de la estructura del autobús

#### **2.5.2.1 Mallado de la estructura con refuerzo Multi-cell**

De manera similar a las configuraciones descritas en la sección 2.3.3.2, se importa el modelo de la estructura con refuerzo multi-cell al programa LS-PrePost en formato STEP. Luego, se realiza el mallado de la estructura del autobús con refuerzo multi-cell, utilizando un tamaño de mallado de 50 mm. Para comparar la resistencia de la estructura, se utilizó el modelo de mallado descrito en la sección anterior (2.3.3.2), tal como se muestra en la figura 34. En la tabla 12 se pueden apreciar las características del mallado de la estructura.



**Figura 35:** Mallado de la estructura con refuerzo Multi-cell

**Tabla 12:** Características del mallado de la estructura con refuerzos Multi-cell

Modelo	Número de elementos	Índice de calidad jacobiano	Tipo de malla
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	69606	0.3	Shell

### 2.5.2.2 Asignación del material

Se asignan las propiedades del material según la tabla 7. Para introducir las propiedades mecánicas del material, se sigue el procedimiento descrito en el apartado 2.3.4 y 2.3.4.1, así como la asignación de espesores y sujeción de los componentes de la estructura.

### 2.5.2.3 Centro de gravedad

Para determinar el centro de gravedad (CDG) del autobús con refuerzo multi-cell, se utiliza la metodología descrita en la sección 2.3.6. en la sección ELEMNT\_TOOLS de LS-PrePost, seleccionamos la opción MEASURE > INERTIAL. Luego, elegimos la opción ALL para determinar el CDG de todos los elementos y activamos la opción Global para medir en base a los ejes global. Como se presenta en el anexo 4A. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 13:

**Tabla 13:** Centro de gravedad de la estructura autobús con refuerzos Multi-cell

<b>Refuerzo</b>	<b>Masa (Tn)</b>	<b>Xcg (mm)</b>	<b>Ycg (mm)</b>
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	5.07	1300	1145.06

#### 2.5.2.4 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral

En cuanto al ángulo de inestabilidad lateral de la estructurales con refuerzo multi-cell, se obtiene cuando el centro de gravedad (CDG) del vehículo, al rotar está completamente vertical con respecto al punto del pivote. En ese punto, la estructura del autobús pierde estabilidad.

El ángulo de inestabilidad lateral se calcula como se describe en la sección 2.3.7. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 13.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1300}{1145.06}\right)$$
$$\alpha = 48.62^{\circ}$$

Luego de realizar los cálculos, se ha determinado que la estructura del autobús va a perder estabilidad lateral cuando la plataforma para la prueba de vuelco rota un ángulo de  $48.62^{\circ}$ . Véase Anexo 3A.

#### 2.5.2.5 Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo multi-cell.

La velocidad angular se calcula utilizando la formulación de la energía cinética y la energía de referencia, que se menciona en la sección 2.3.1.1 el valor de  $\Delta h$ , véase anexo 3A

$$vim = \sqrt{1.5g\Delta h}$$

Datos:

$$g = 9800 \text{ mm/s}^2$$

$$\Delta h = 707.94 \text{ mm}$$

$$vim = \sqrt{1.5 * 9800 * 707.94}$$

$$v_{im} = 3225,94 \frac{mm}{s}$$

La fórmula para determinar la velocidad angular con la que va a impactar la superestructura al suelo se determina mediante:

$$W_{im} = \frac{V_{im}}{r}$$

El valor de  $r$ , véase anexo 3A.

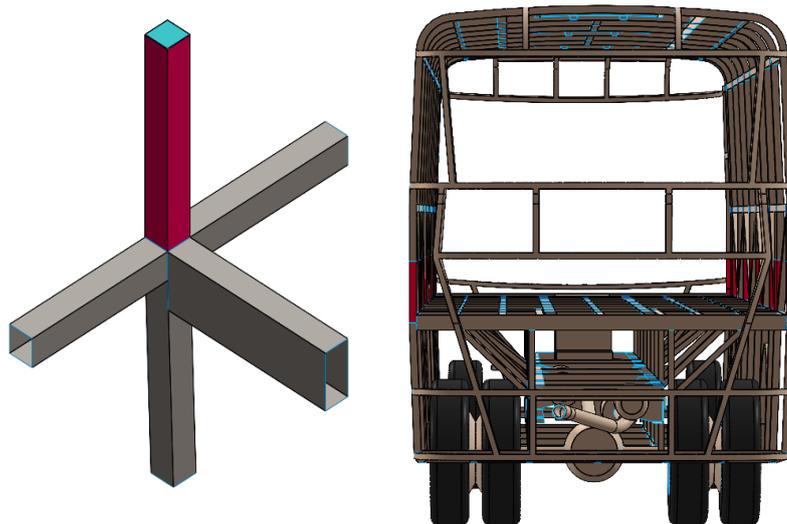
$$W_{im} = \frac{3225,94 \text{ mm/s}}{1389,92 \text{ mm}}$$

$$W_{im} = 2.320 \text{ rad/s}$$

La velocidad angular es de  $2.320 \text{ rad/s}$  para refuerzo entre la pared lateral y piso

### 2.5.3 Espuma de aluminio

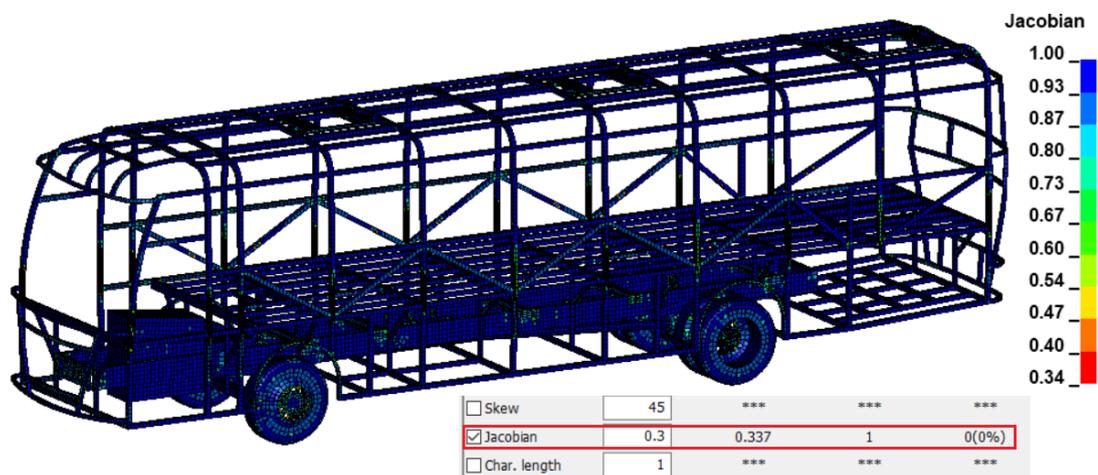
En este apartado se evalúa la eficiencia de la espuma de aluminio como amortiguador de impactos en eventos de vuelco, adicionando 400 mm de espuma de aluminio al larguero inferior del costado del bus, de acuerdo a la Figura 36. El objetivo de este análisis es evaluar el comportamiento estructural del autobús y la influencia del uso de espuma de aluminio como relleno estructural de los tubos de la estructura.



**Figura 36:** configuración interna espuma de aluminio en los tubos laterales de la estructura del autobús

### 2.5.3.1 Mallado de la estructura con refuerzo Espuma de aluminio

De modo similar a la configuración de la sección 2.3.3.2, el modelo de la estructura del autobús con refuerzo de espuma de aluminio se importó al programa LS-PrePost con formato STEP. A continuación, se realiza el mallado de cada una de la estructuras con un tamaño del mallado es de 50 mm. Con el propósito de comparar la resistencia de la estructura, se empleó el mismo modelo de mallado del procedimiento descrito en el apartado anterior (2.3.3.2), tal como se observa en las figura 37. En la tabla 14 se presenta las características del mallado utilizado en la estructura.



**Figura 37:** malla de la estructura con refuerzo espuma de aluminio.

**Tabla 14:** Características del mallado de la estructura con refuerzos de espuma de aluminio

Modelo	Número de elementos	Índice de calidad jacobiano	Tipo de malla
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	69107	3	Shell/solido

### 2.5.3.2 Asignación del material

Se asignan las propiedades del material según la tabla 7. Para introducir las propiedades mecánicas del material, se sigue el procedimiento descrito en el apartado

2.3.4 y 2.3.4.1, así como la asignación de espesores y sujeción de los componentes de la estructura.

Por otra parte, los parámetros del material para la espuma de aluminio se obtuvieron de [23]. En la tabla describe los parámetros de entrada del material para el modelo de espuma Mat\_154.

**Tabla 15:** Parámetros de entrada del material para el modelo de espuma Mat\_154

$\rho_f$	$E$ (Mpa)	$\nu_p$	$\alpha$	$\gamma$ (Mpa)	$\epsilon_D$	$\alpha_2$ (Mpa)	$\beta$	$\sigma_p$ (Mpa)	$C_{Fail}$
2.3e-10	1100	0	2.119	3.119	2.4630	0.368	4.46	1.35	0.2

Dónde:

RHO: Densidad de masa.

E: Módulo de Young.

PR: Razón de Poisson.

ALPHA: Controla la forma de la superficie de fluencia.

GAMMA: parámetros del materiales

EPSD: deformación por densificación.

ALFA2: parámetros del materiales

BETA: parámetros del materiales

SIGP: parámetros del materiales

CFAIL: Tensión de falla de la espuma y se usa para eliminar elementos fallados durante la simulación.

De igual forma después de ingresar las propiedades del material en las cartas de control como describe en la sección 2.3.4.1, Se creó una sección tipo Shell y asignó espesor de 2mm para toda la estructura como describe en la tabla 8. Del mismo modo, para los elementos solidos se crea una sección tipo sólido. Donde se seleccionó la carta de

control Keyword Manager >SECTION>SOLID, manteniendo la configuración del programa.

### 2.5.3.3 Centro de gravedad

Para determinar el centro de gravedad de la estructura del autobús con refuerzo espuma de aluminio, se sigue la misma metodología establecida en la sección 2.3.6, para medir en base a los ejes global. Como se indica en Anexo 4A. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 16:

**Tabla 16:** Centro de gravedad de la estructura autobús con refuerzos espuma de aluminio

<b>Refuerzo</b>	<b>Masa (Tn)</b>	<b>Xcg (mm)</b>	<b>Ycg (mm)</b>
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	5.05	1300	1143.25

### 2.5.3.4 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral

El ángulo de inestabilidad lateral se calcula como 2.3.7. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 16.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1300}{1143.25}\right)$$

$$\alpha = 48.67^{\circ}$$

Obtenido los cálculos se determinó que la estructura del autobús va a perder estabilidad lateral cuando la plataforma para la prueba de vuelco rota un ángulo de  $48.67^{\circ}$ . Véase Anexo 4A.

### 2.5.3.5 Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo espuma de aluminio.

La velocidad angular se calcula utilizando la formulación de la energía cinética y la energía de referencia, que se menciona en la sección 2.3.1.1 el valor de  $\Delta h$ , véase anexo 4A.

$$v_{im} = \sqrt{1.5g\Delta h}$$

Datos:

$$g = 9800 \text{ mm/s}^2$$

$$\Delta h = 707 \text{ mm}$$

$$v_{im} = \sqrt{1.5 * 9800 * 707}$$

$$v_{im} = 3224,77 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

La fórmula para determinar la velocidad angular con la que va a impactar la superestructura al suelo se determina mediante:

$$W_{im} = \frac{V_{im}}{r}$$

El valor de  $r$ , véase anexo 4A.

$$W_{im} = \frac{3224,77 \text{ mm/s}}{1388,96 \text{ mm}}$$

$$W_{im} = 2.321 \text{ rad/s}$$

La velocidad angular es de 2.321  $\text{rad/s}$  para refuerzo de espuma de aluminio.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis y discusión de los resultados

A continuación, se realizará un análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de simulación de vuelco, extrayendo las gráficas de comportamiento de energía, valores máximos de deformación obtenidos por el software con los cuales se verificará si en el instante del impacto por vuelco la zona de supervivencia es invadida, a la vez se realiza una comparación de deformación de las estructuras con refuerzo y sin refuerzo para determinar que sección tiene mayor deformación.

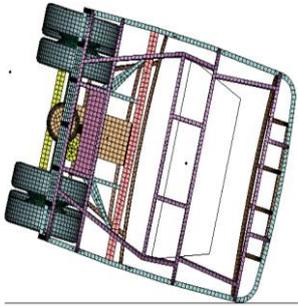
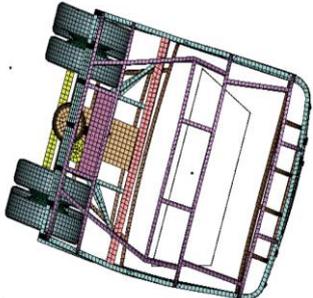
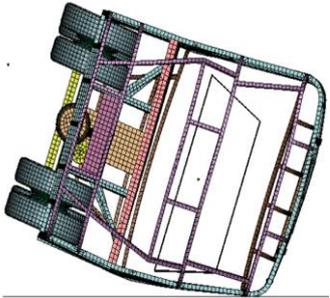
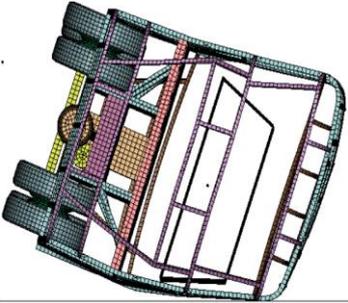
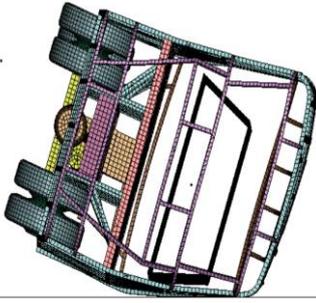
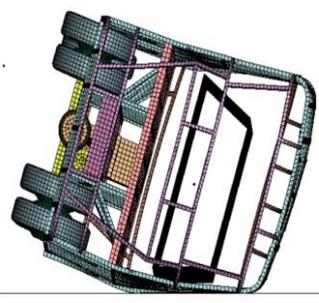
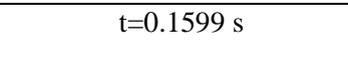
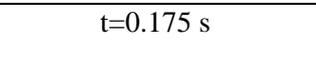
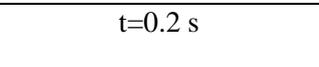
##### 3.1.1 Análisis del espacio de supervivencia

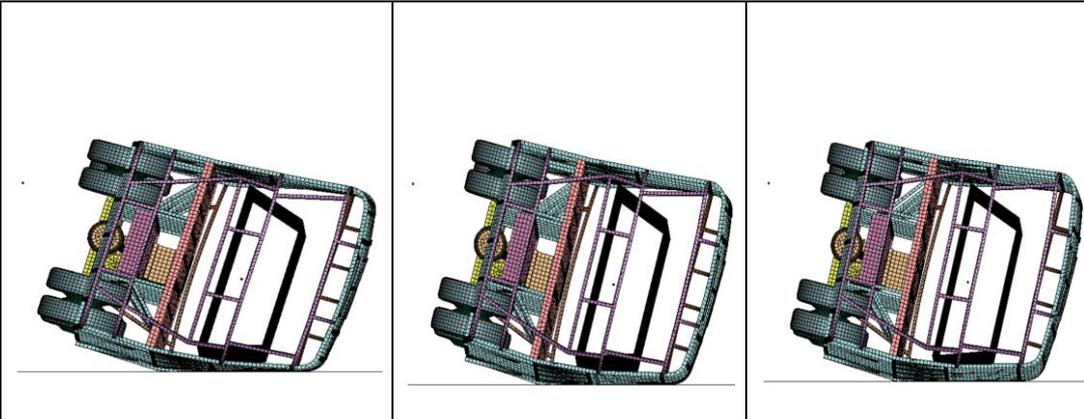
Para que una superestructura sea homologada, debe cumplir con los requisitos establecidos en el Reglamento N° 66 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE R66). Según dicho reglamento, el contorno de la estructura deformada no debe sobresalir del espacio de supervivencia y se determinará de manera secuencial entre cada montante de ventana o puerta adyacente. Además, el contorno entre dos montantes deformados se definirá como una superficie teórica determinada por líneas rectas que conecten los puntos del contorno interior de los montantes que se encontraban a la misma altura sobre el nivel del piso antes del ensayo de vuelco [24].

El resultado obtenido de cada simulación sería que la superestructura no se deforme por completo tras el impacto, así como la estructura no penetre el espacio de supervivencia. Ahora se procede a comprobar a través de imágenes secuenciales el comportamiento de la estructura durante el vuelco.

### 3.1.2 Simulación 1 vuelco de la estructura del autobús sin refuerzo.

**Tabla 17:** Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura sin refuerzo

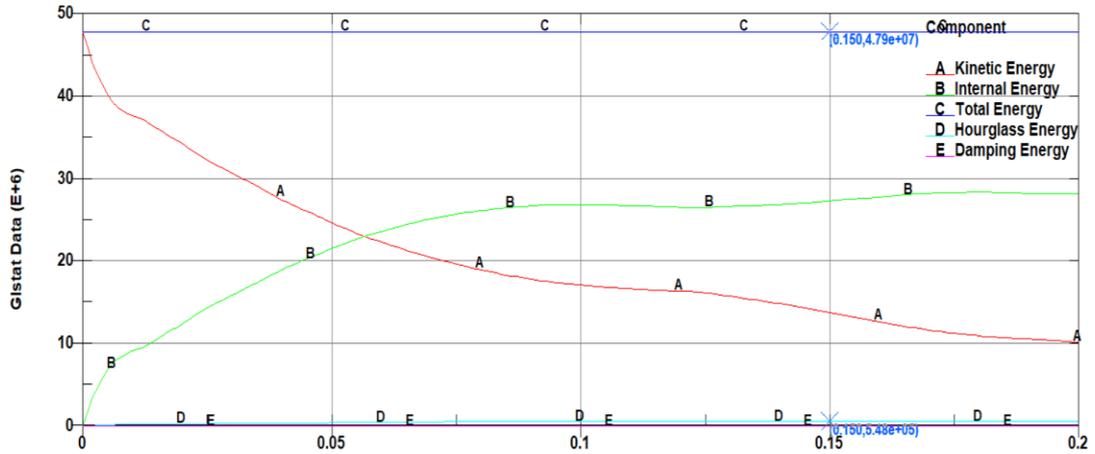
<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE MECÁNICA</b> <b>SIMULACIÓN DE ENSAYO DE VUELCO</b>			
Ensayo de vuelco N°:	1	Modelo de:	Superestructura del autobús interprovincial
Normas aplicables	Reglamento CEPE/R66; NTE INEN 1668; NTE INEN 1323		
Fecha de ejecución	16/1/2023	Realizado por	Santiago Caisaguano
		Revisado por	Ing. César Arroba
Velocidad al momento de la colisión de vuelco	2.32 rad/seg	Masa de la sección	5 058 kg
Tiempo de procesamiento	1 hora 23 minutos	Tiempo de impacto	0.2 segundos
Ángulo de inestabilidad	48.69°		
RESULTADOS DEL ENSAYO			
t=0.0000 s	t=0.02599 s	t=0.05099 s	
			
t=0.075 s	t=0.10 s	t=0.125 s	
			
t=0.1599 s	t=0.175 s	t=0.2 s	
			

	
<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</b>	
La estructura del autobús invade la zona de supervivencia	NO

Como se puede observar en la secuencia de las figuras de la tabla 17, Se genera la deformación de la superestructura en intervalos de 0.025 segundos. Después de que la esquina del techo toca el suelo en  $t=0,0$  segundos, la superestructura comienza a deformarse hasta aproximadamente 0.10 segundos cuando los largueros impactan contra el suelo. Luego, en  $t= 0.12$  segundos el vehículo rebota y se desliza hacia adelante a lo largo de la línea de contacto entre el suelo y la esquina del techo. En  $t= 0.175$  y  $t=0.2$  segundos se puede apreciar la deformación permanente de la superestructura. Durante la simulación de impacto de vuelco, se ve que el espacio superviviente no es invadido por los marcos laterales en el lado del impacto.

### 3.1.2.1 Comportamiento de las energías durante la simulación

La gráfica de energías involucradas en el análisis que se muestra en la Figura 38. La energía total, representada por la línea C, permanece constante durante toda la simulación, lo que representa el estado conservativo de la simulación. La energía cinética, representada por la curva A, decae en el tiempo, hasta el punto de máxima deformación de la superestructura [25]. La energía interna en el análisis, representada por la curva B, representa la energía absorbida por la estructura debido a la deformación de los tubos que componen la superestructura del autobús. La energía de hourglass, representada por la curva D, no debe exceder 5% de la energía total como especifica el reglamento CEPE R66 [24].

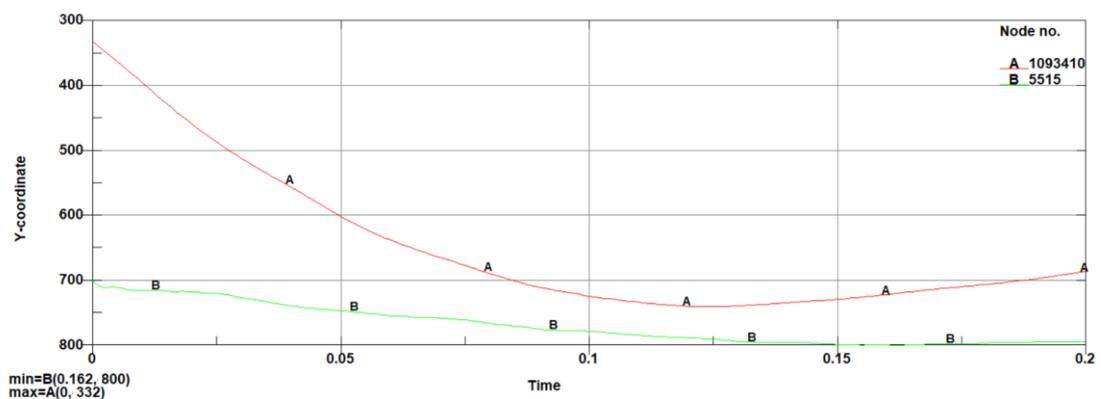


**Figura 38:** Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional

El valor de la energía total es de  $4.79 \times 10^7$ . La energía de hourglass, por su parte, se encuentra en un nivel mucho más bajo, con un valor de  $5.48 \times 10^5$ , y no representa más al 5% de la energía total. Por lo tanto, la simulación es válida con los parámetros establecidos.

### 3.1.2.2 Criterio del espacio de supervivencia

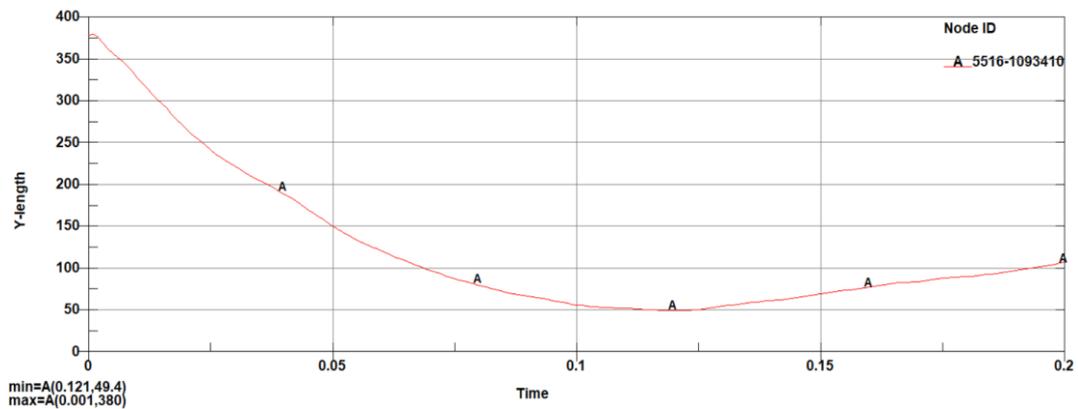
Para el análisis de vuelco, la estructura debe tener una resistencia que garantice que el espacio residual a la estructura del vehículo no invada la zona de supervivencia. La figura 39, muestra las dos curvas de desplazamiento relativo del punto que más se aproxima al espacio de supervivencia durante el ensayo y la superestructura. La medida se refiere a la distancia más corta entre la zona de supervivencia y la estructura.



**Figura 39:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.

Como se observa en la figura 39, la curva A representa el desplazamiento del espacio de supervivencia de pasajeros y la curva B representa al nodo del elemento lateral que se encuentra en la trayectoria del espacio de supervivencia durante el impacto.

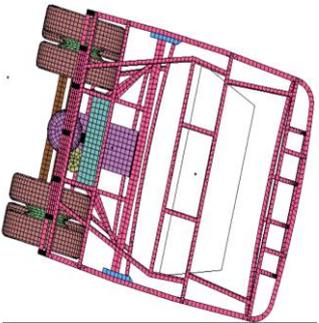
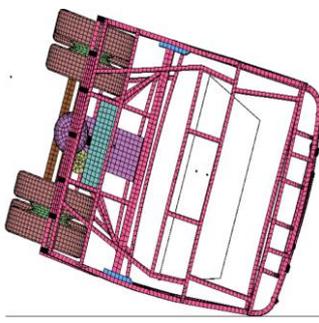
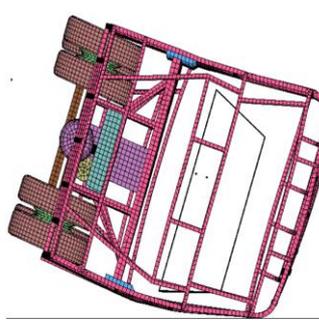
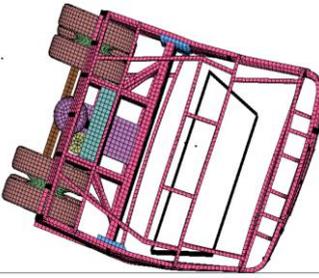
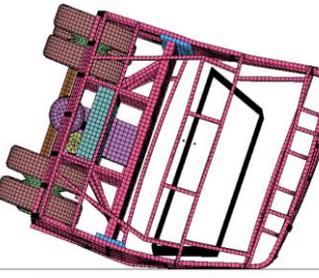
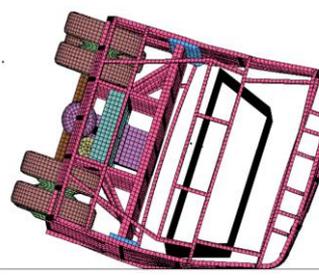
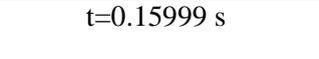
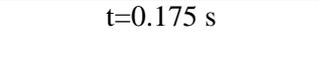
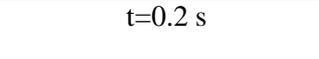
El resultado al restar las curvas A y B de la figura 39 se obtiene la curva de la figura 40 muestra la distancia que existe entre la zona de supervivencia y la superestructura al inicio del ensayo con un máxima de 380 mm y una distancia mínima de 49.4 mm después del impacto con el piso, por lo que el Espacio de Supervivencia NO es invadido por la Superestructura.

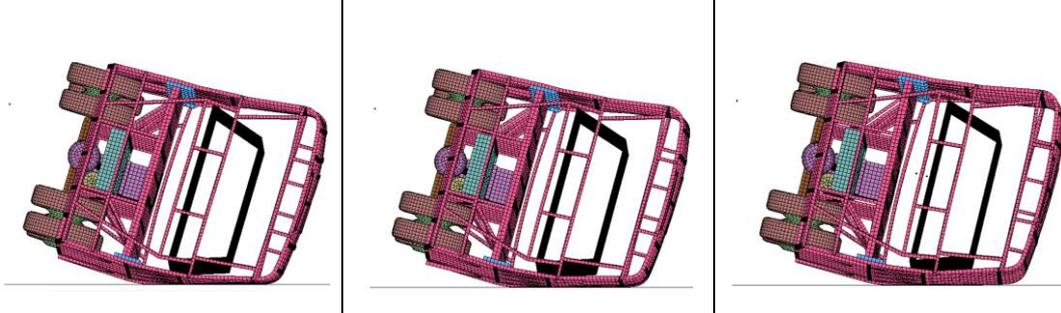


**Figura 40:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura.

**3.1.3 simulación 2 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso.**

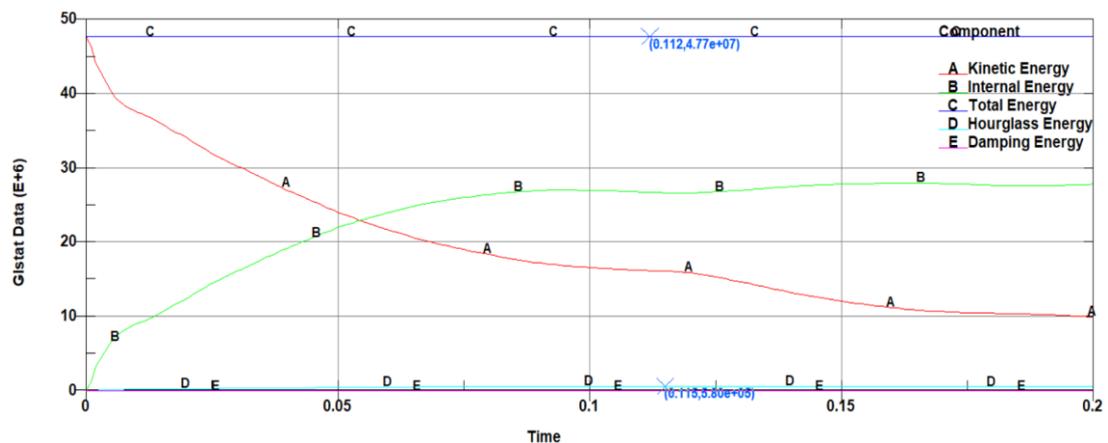
**Tabla 18:** Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo con juntas entre la pared y el piso

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE MECÁNICA</b> <b>SIMULACIÓN DE ENSAYO DE VUELCO</b>			
Ensayo de vuelco N°:	2	Modelo de:	Superestructura del autobús interprovincial
Normas aplicables	Reglamento CEPE/R66; NTE INEN 1668; NTE INEN 1323		
Fecha de ejecución	16/1/2023	Realizado por	Santiago Caisaguano
		Revisado por	Ing. César Arroba
Velocidad al momento de la colisión de vuelco	2.32 rad/seg	Masa de la sección	5 073 kg
Tiempo de procesamiento	1 hora 30 minutos	Tiempo de impacto	0.2 segundos
Ángulo de inestabilidad	48.69°		
RESULTADOS DEL ENSAYO			
t=0.0000 s	t=0.02509 s	t=0.05099 s	
			
t=0.07509 s	t=0.1099 s	t=0.12509 s	
			
t=0.15999 s	t=0.175 s	t=0.2 s	
			

	
<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</b>	
La estructura del autobús invade la zona de supervivencia	NO

En el segundo caso, así mismo se realiza la simulación de vuelco como se puede observar en la secuencia de las figuras de la tabla 18, Se genera la deformación de la superestructura en intervalos de 0.025 segundos, en este caso el techo toca el suelo en  $t=0,0$  segundos, la superestructura comienza a deformarse hasta aproximadamente 0.10 segundos cuando los largueros impactan contra el suelo. Luego, en  $t= 0.12$  y  $t=0.14$  segundos el vehículo rebota y se desliza hacia adelante a lo largo de la línea de contacto entre el suelo y la esquina del techo. En  $t= 0.175$  y  $t=0.2$  segundos la estructura del autobús se deforma permanente. Durante la simulación de impacto de vuelco, se ve que el espacio superviviente no es invadido por la estructura en el lado del impacto.

### 3.1.3.1 Comportamiento de las energías durante la simulación



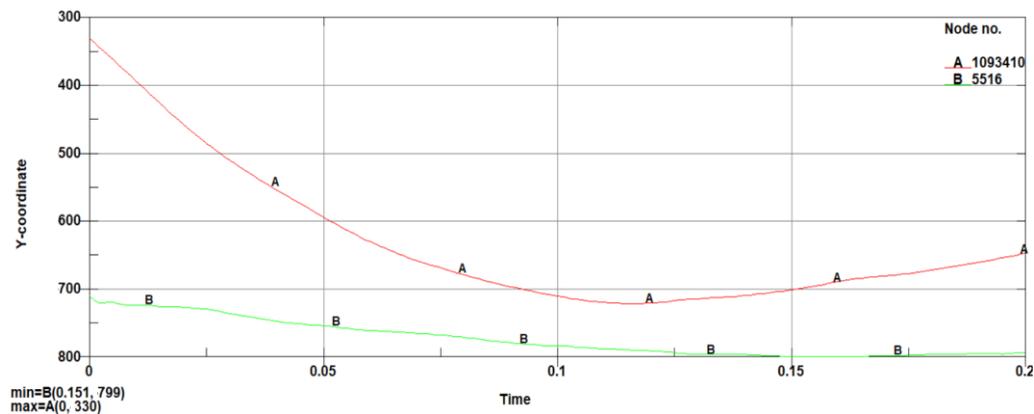
**Figura 41:** Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional

Asimismo, como se observa en la figura 41, el valor de la energía total es de  $4.77 \times 10^7$ . La energía de hourglass, por su parte, se encuentra en un nivel mucho más bajo, con

un valor de  $5.80 \times 10^5$ , y no representa más al 5% de la energía total. Por lo tanto, la simulación es válida con los parámetros establecidos.

### 3.1.3.2 Criterio del espacio de supervivencia

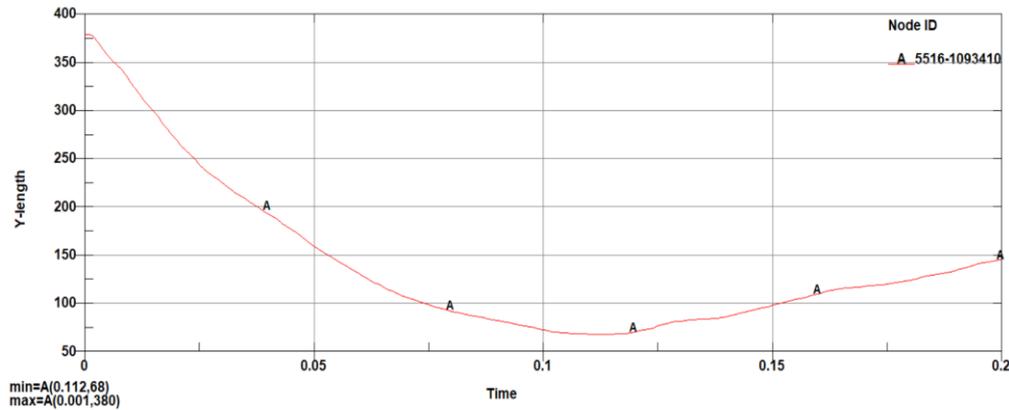
De forma similar en la figura 42 muestra las dos curvas de desplazamiento relativo del punto que más se aproxima al espacio de supervivencia durante el ensayo y la superestructura. La medida se refiere a la distancia más corta entre la zona de supervivencia y la estructura.



**Figura 42:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.

Como se observa en la figura 42, la curva A representa el desplazamiento del espacio de supervivencia de pasajeros y la curva B representa al nodo del elemento lateral que se encuentra en la trayectoria del espacio de supervivencia durante el impacto.

El resultado al restar las curvas A y B de la figura 42, se obtiene la curva de la figura 43 muestra la distancia que existe entre la zona de supervivencia y la superestructura al inicio del ensayo con un máxima de 380 mm y una distancia mínima de 68 mm después del impacto con el piso, por lo que el Espacio de Supervivencia NO es invadido por la Superestructura.

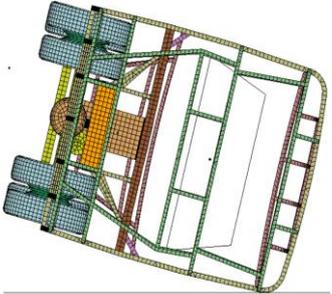
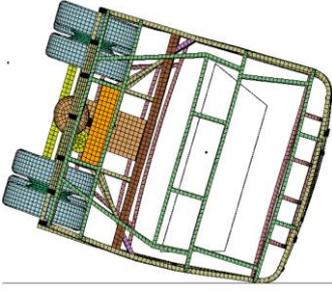
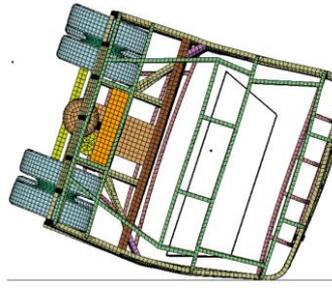
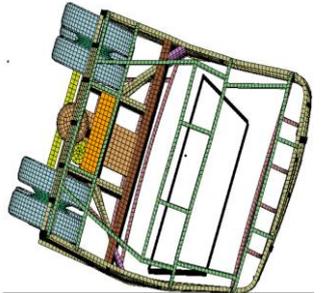
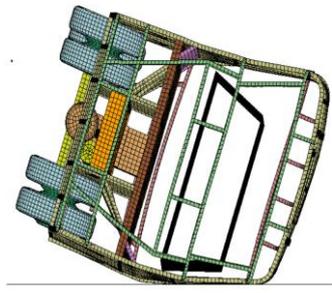
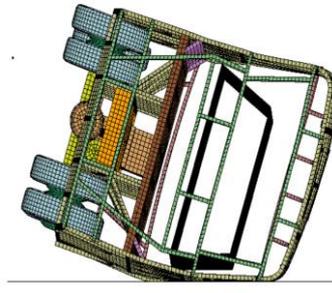


**Figura 43:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura.

### 3.1.4 Simulación 3 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo entre la pared lateral y el piso.

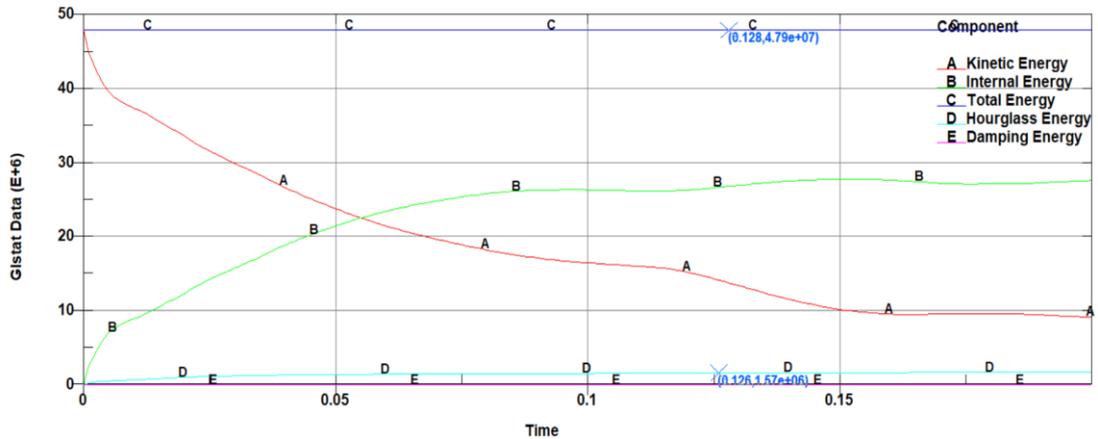
**Tabla 19:** Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo con juntas entre la pared y el piso

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA SIMULACIÓN DE ENSAYO DE VUELCO			
Ensayo de vuelco N°:	3	Modelo de:	Superestructura del autobús interprovincial
Normas aplicables	Reglamento CEPE/R66; NTE INEN 1668; NTE INEN 1323		
Fecha de ejecución	16/1/2023	Realizado por	Santiago Caisaguano
		Revisado por	Ing. César Arroba
Velocidad al momento de la colisión de vuelco	2.31 rad/seg	Masa de la sección	5 052 kg
Tiempo de procesamiento	1 hora 25 minutos	Tiempo de impacto	0.2 segundos
Ángulo de inestabilidad	48.66°		
RESULTADOS DEL ENSAYO			
t=0.0000 s	t=0.02509 s	t=0.05009 s	

		
t=0.07509 s	t=0.1009 s	t=0.12509 s
		
t=0.15999 s	t=0.17509 s	t=0.2 s
<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</b>		
La estructura del autobús invade la zona de supervivencia		NO

En el tercer caso, así mismo se realiza la simulación de vuelco como se puede observar en la secuencia de las figuras de la tabla 19, en este caso el techo toca el suelo en  $t=0,0$  segundos, la superestructura comienza a deformarse hasta aproximadamente 0.10 segundos cuando los largueros impactan contra el suelo. Luego, en  $t= 0.12$  y  $t=0.14$  segundos el vehículo rebota y se desliza hacia adelante a lo largo de la línea de contacto entre el suelo y la esquina del techo. En  $t= 0.175$  y  $t=0.2$  segundos la estructura del autobús se deforma permanentemente. Durante la simulación de impacto de vuelco, se ve que el espacio superviviente no es invadido por la estructura en el lado del impacto.

### 3.1.4.1 Comportamiento de las energías durante la simulación

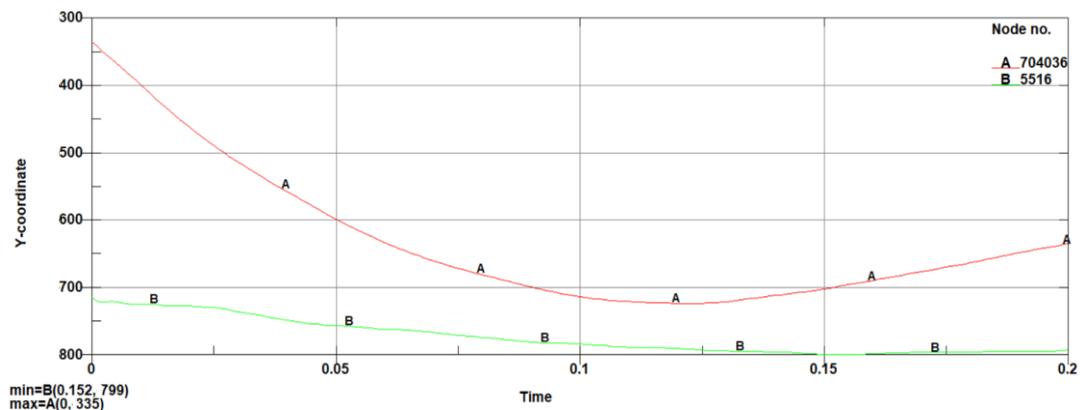


**Figura 44:** Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional

Asimismo, como se observa en la figura 44, el valor de la energía total es de  $4.79 \times 10^7$ . La energía de hourglass, por su parte, se encuentra en un nivel mucho más bajo, con un valor de  $1.57 \times 10^6$ , y no representa más al 5% de la energía total. Por lo tanto, la simulación es válida con los parámetros establecidos.

### 3.1.4.2 Criterio del espacio de supervivencia

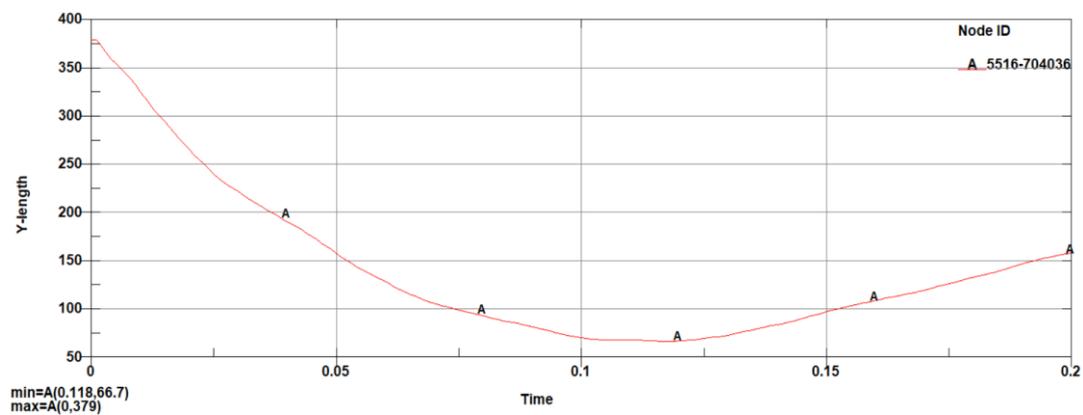
De forma similar en la figura 45, muestra las dos curvas de desplazamiento relativo del punto que más se aproxima al espacio de supervivencia durante el ensayo y la superestructura. La medida se refiere a la distancia más corta entre la zona de supervivencia y la estructura.



**Figura 45:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.

Como se observa en la figura 42, la curva A representa el desplazamiento del espacio de supervivencia de pasajeros y la curva B representa al nodo del elemento lateral que se encuentra en la trayectoria del espacio de supervivencia durante el impacto.

El resultado al restar las curvas A y B de la figura 45 se obtiene la curva de la figura 46, muestra la distancia que existe entre la zona de supervivencia y la superestructura al inicio del ensayo con un máxima de 380 mm y una distancia mínima de 66.7 mm después del impacto con el piso, por lo que el Espacio de Supervivencia NO es invadido por la Superestructura.

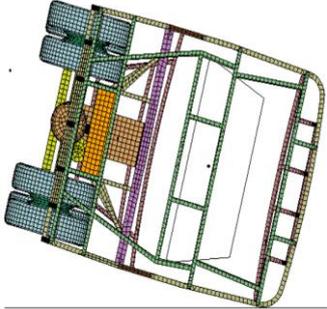
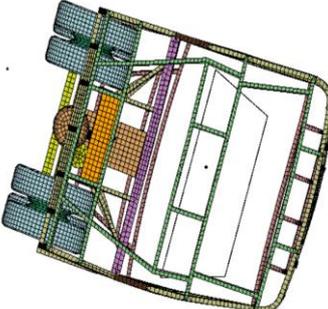
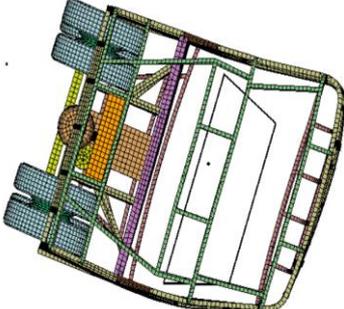
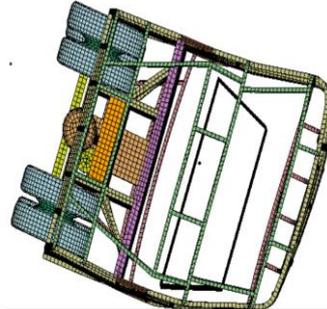
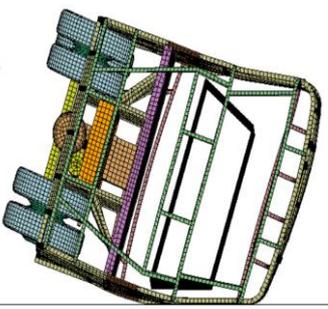
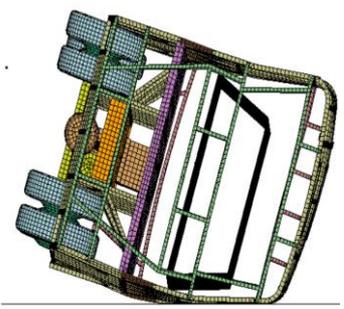
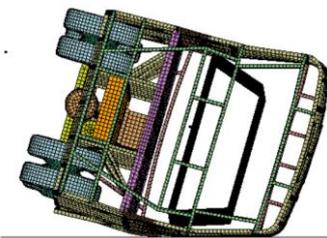
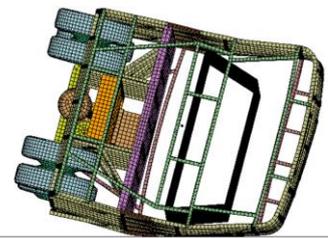
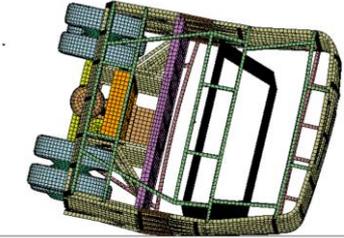


**Figura 46:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura.

### 3.1.5 Simulación 4 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo multi-cell.

**Tabla 20:** Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo multi-cell.

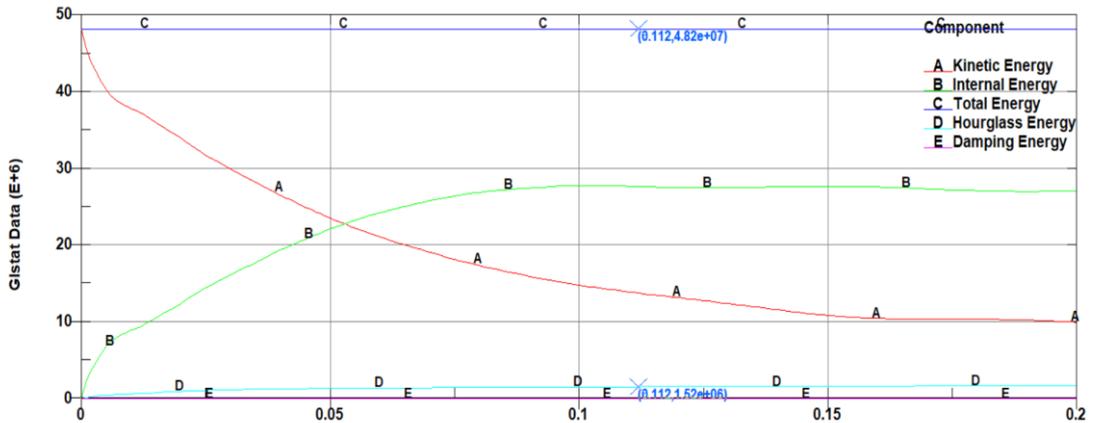
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA SIMULACIÓN DE ENSAYO DE VUELCO			
Ensayo de vuelco N°:	4	Modelo de:	Superestructura del autobús interprovincial
Normas aplicables	Reglamento CEPE/R66; NTE INEN 1668; NTE INEN 1323		
Fecha de ejecución	16/1/2023	Realizado por	Santiago Caisaguano
		Revisado por	Ing. César Arroba
Velocidad al momento de la colisión de vuelco	2.32 rad/seg	Masa de la sección	5 070 kg

Tiempo de procesamiento	1 hora 40 minutos	Tiempo de impacto	0.2 segundos
Ángulo de inestabilidad	48.62°		
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO</b>			
t=0.0000 s	t=0.02509 s	t=0.05009 s	
			
t=0.07509 s	t=0.1090 s	t=0.12509 s	
			
t=0.15999 s	t=0.175 s	t=0.2 s	
			
<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</b>			
La estructura del autobús invade la zona de supervivencia			NO

En este caso como se observa en la tabla 20, el techo toca el suelo en  $t=0,0$  segundos, la superestructura comienza a deformarse hasta aproximadamente  $t= 0.075$  y  $0.10$  segundos cuando los largueros impactan contra el suelo. Luego, en  $t= 0.1599$  segundos el vehículo rebota y se desliza hacia adelante a lo largo de la línea de contacto entre el suelo y la esquina del techo. En  $t= 0.175$  y  $t=0.2$  segundos la estructura del autobús se

deformación permanente. Durante la simulación de impacto de vuelco, se ve que el espacio superviviente no es invadido por la estructura en el lado del impacto.

### 3.1.5.1 Comportamiento de las energías durante la simulación

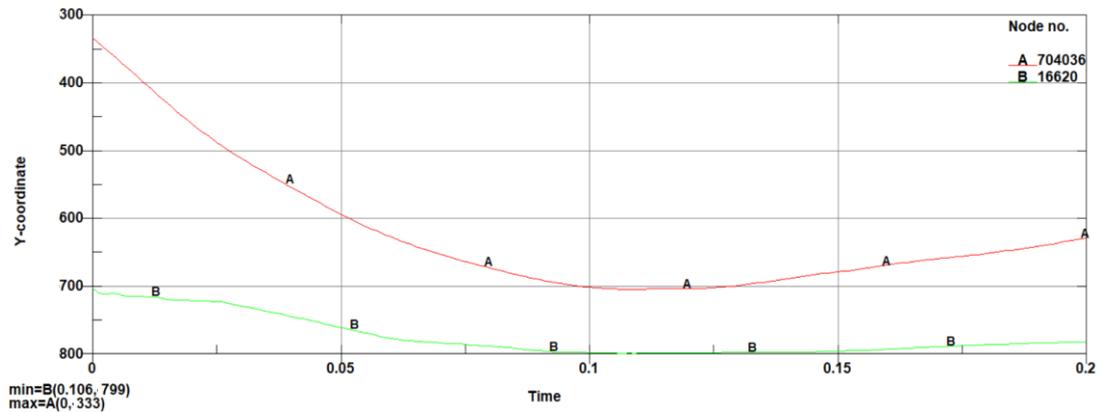


**Figura 47:** Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional

Además, como se puede ver en la figura 47, el valor total de la energía es de  $4.82 \times 10^7$ . La energía hourglass, por otro lado, se encuentra en un nivel mucho más bajo, con un valor de  $1.52 \times 10^6$ , lo que representa solo el 5% de la energía total. Por lo tanto, la simulación es válida con los parámetros establecidos.

### 3.1.5.2 Criterio del espacio de supervivencia

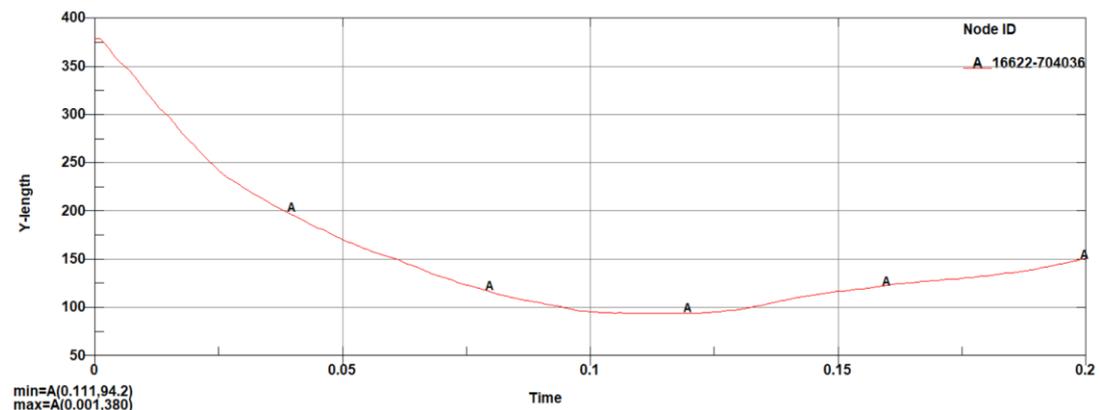
De forma similar en la figura 48 muestra las dos curvas de desplazamiento relativo del punto que más se aproxima al espacio de supervivencia durante el ensayo y la superestructura. La medida se refiere a la distancia más corta entre la zona de supervivencia y la estructura.



**Figura 48:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.

Como se observa en la figura 48, la curva A representa el desplazamiento del espacio de supervivencia de pasajeros y la curva B representa al nodo del elemento lateral que se encuentra en la trayectoria del espacio de supervivencia durante el impacto.

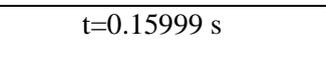
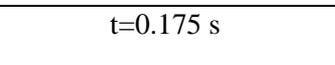
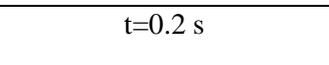
El resultado al restar las curvas A y B de la figura 48 se obtiene la curva de la figura 49, muestra la distancia que existe entre la zona de supervivencia y la superestructura al inicio del ensayo con un máxima de 380 mm y una distancia mínima de 94.2 mm después del impacto con el piso, por lo que el Espacio de Supervivencia NO es invadido por la Superestructura.



**Figura 49:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura.

### 3.1.6 Simulación 5 vuelco de la estructura del autobús con refuerzo espuma de aluminio.

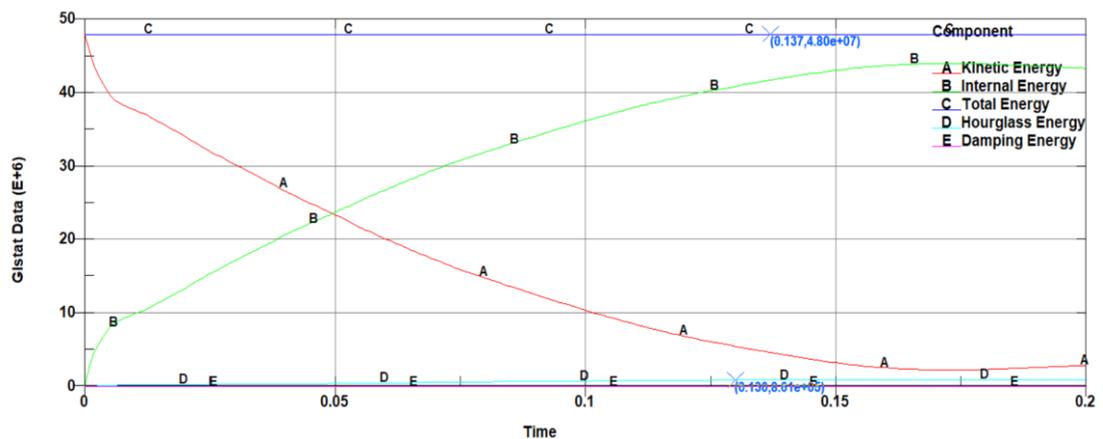
**Tabla 21:** Secuencia de imágenes de la deformación de la estructura con refuerzo de espuma de aluminio.

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE MECÁNICA</b> <b>SIMULACIÓN DE ENSAYO DE VUELCO</b>			
Ensayo de vuelco N°	5	Modelo de:	Superestructura del autobús interprovincial
Normas aplicables	Reglamento CEPE/R66; NTE INEN 1668; NTE INEN 1323		
Fecha de ejecución	16/1/2023	Realizado por	Santiago Caisaguano
		Revisado por	Ing. César Arroba
Velocidad al momento de la colisión de vuelco	2.32 rad/seg	Masa de la sección	5 070 kg
Tiempo de procesamiento	1 hora 50 minutos	Tiempo de impacto	0.2 segundos
Ángulo de inestabilidad	48.67°		
RESULTADOS DEL ENSAYO			
t=0.0000 s	t=0.02509 s	t=0.05009 s	
			
t=0.075 s	t=0.10099 s	t=0.125 s	
			
t=0.15999 s	t=0.175 s	t=0.2 s	
			



En el quinto caso se observan la secuencia de las figuras de la tabla 21, el techo toca el suelo en  $t=0,0$  segundos, la superestructura comienza a deformarse hasta aproximadamente  $t=0.10$  segundos cuando los largueros impactan contra el suelo. Luego, en  $t= 0.1599$  segundos el vehículo rebota y se desliza hacia adelante a lo largo de la línea de contacto entre el suelo y la esquina del techo. Durante la simulación de impacto de vuelco, se ve que el espacio superviviente es invadido por la estructura al lado del impacto en  $t=0.1509$  segundos. La penetración máxima de la zona de supervivencia se produce alrededor de 0,2 segundos.

### 3.1.6.1 Comportamiento de las energías durante la simulación

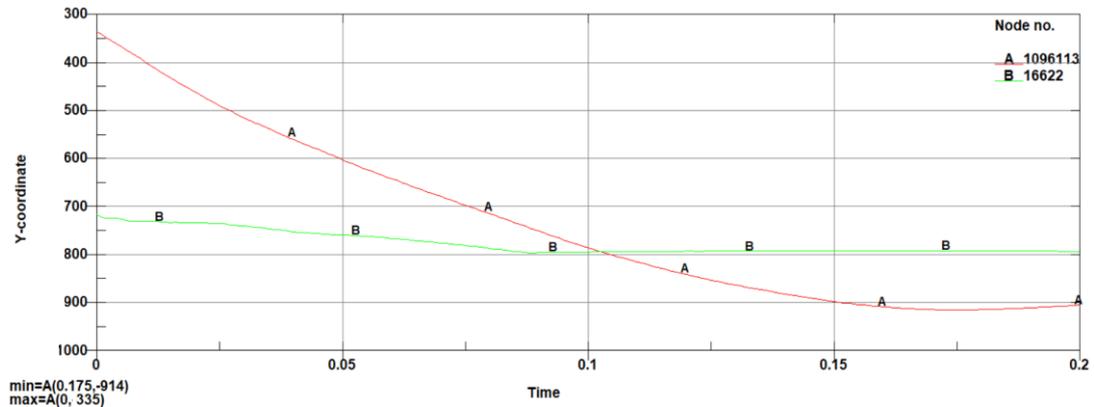


**Figura 50:** Gráfica de energías involucradas en el análisis computacional

Asimismo, como se puede ver en la figura 50, el valor total de la energía es de  $4.80 \times 10^7$ . La energía hourglass, por otro lado, se encuentra en un nivel mucho más bajo, con un valor de  $8.61 \times 10^5$ , lo que representa solo el 5% de la energía total. Por lo tanto, la simulación es válida con los parámetros establecidos.

### 3.1.6.2 Criterio del espacio de supervivencia

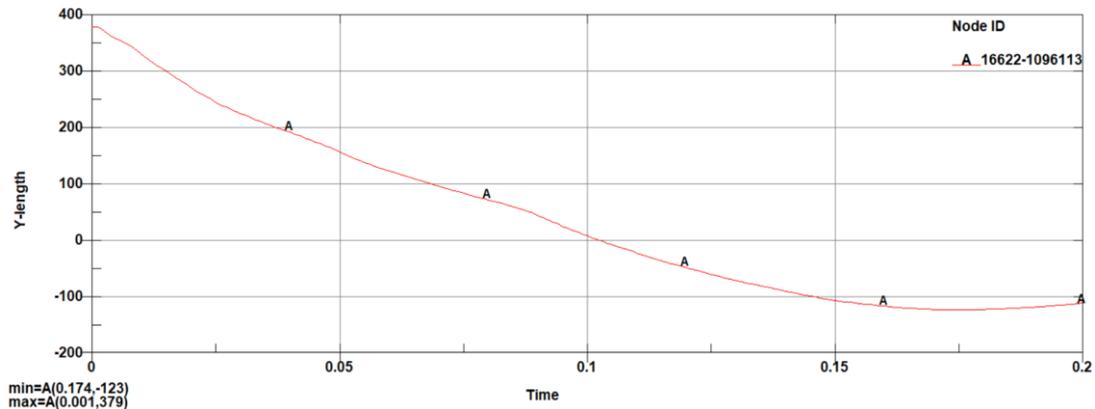
De forma similar en la figura 51, muestra las dos curvas de desplazamiento relativo del punto que más se aproxima al espacio de supervivencia durante el ensayo y la superestructura. La medida se refiere a la distancia más corta entre la zona de supervivencia y la estructura.



**Figura 51:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura. La curva A representa el desplazamiento de la zona de supervivencia mientras que la curva B representa el nodo del elemento lateral.

Como se observa en la figura 51, la curva A representa el desplazamiento del espacio de supervivencia de pasajeros y la curva B representa al nodo del elemento lateral que se encuentra en la trayectoria del espacio de supervivencia durante el impacto.

El resultado al restar las curvas A y B de la figura 51 se obtiene la curva de la figura 52, muestra la distancia que existe entre la zona de supervivencia y la superestructura al inicio del ensayo con un máxima de 379 mm y una distancia mínima de -123 mm después del impacto con el piso, por lo que el Espacio de Supervivencia invade la superestructura.



**Figura 52:** Desplazamiento del espacio de supervivencia con relación a la superestructura.

### 3.1.7 Validación de resultados mediante la energía de Hourglass

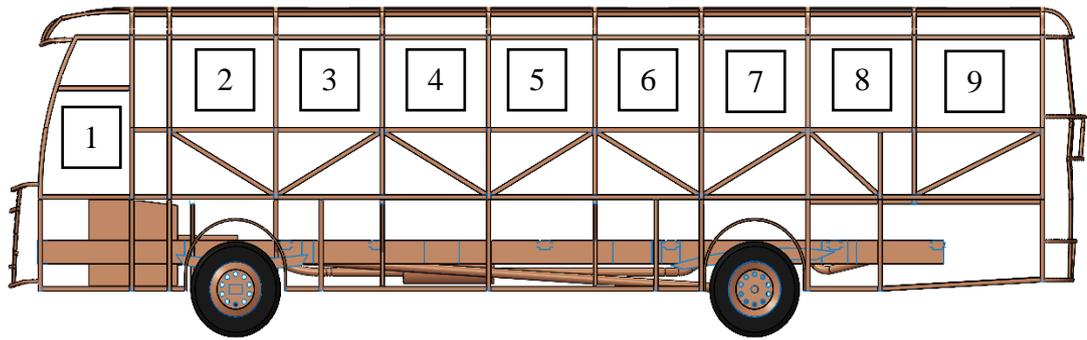
La validez de los resultados fue evaluada a través del uso de la energía de Hourglass. Se estableció que la energía de Hourglass debería ser inferior al 10% de la energía interna según la referencia [26], y también se evaluó por debajo del 5% de la energía total [24]. Para determinar los porcentajes de energía en las 5 simulaciones, se utilizó una relación simple, como se observa en la tabla 22.

**Tabla 22:** Validación de resultados mediante la energía de Hourglass

Simulación	Energía interna (Nmm)	Energía Hourglass (Nmm)	Porcentaje de validación $H < 5\%$
Estructura sin refuerzo	$4.79 \times 10^7$	$5.48 \times 10^5$	$1.14 < 5\%$
refuerzo Juntas entre la pared lateral y el piso	$4.77 \times 10^7$	$5.80 \times 10^5$	$1.21 < 5\%$
Estructura con refuerzo lateral	$4.79 \times 10^7$	$1.57 \times 10^6$	$3.27 < 5\%$
Refuerzo multi-cell	$4.82 \times 10^7$	$1.52 \times 10^6$	$3.15 < 5\%$
Refuerzo espuma de aluminio	$4.80 \times 10^7$	$8.61 \times 10^5$	$1.79 < 5\%$

### 3.1.8 Estructura de autobús por secciones

En la Figura 53 se muestra la configuración general de la superestructura del autobús, esta estructura está constituida por 9 secciones que están distribuidas a lo largo del autobús.



**Figura 53:** Estructura de autobús por secciones

Una vez determinado cada una de las secciones que conforman la superestructura del autobús se procede a realizar una comparación de deformación de las cinco simulaciones como muestra la tabla, con la finalidad de determinar que sección sufre mayor deformación plástica durante el ensayo de vuelco.

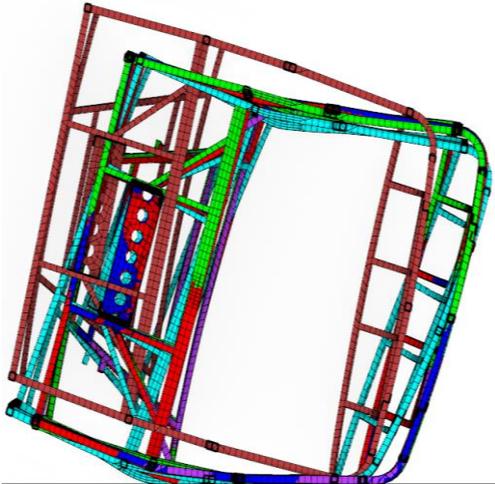
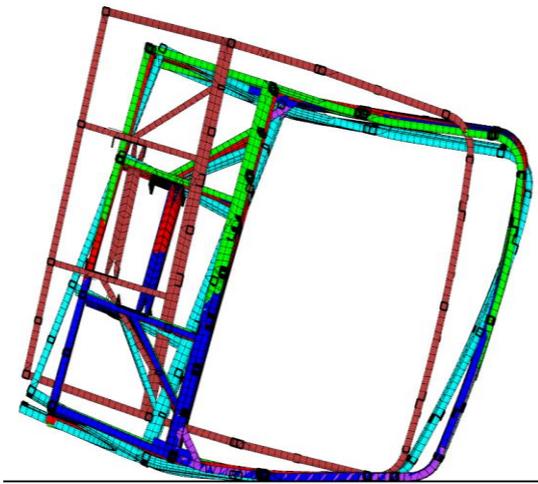
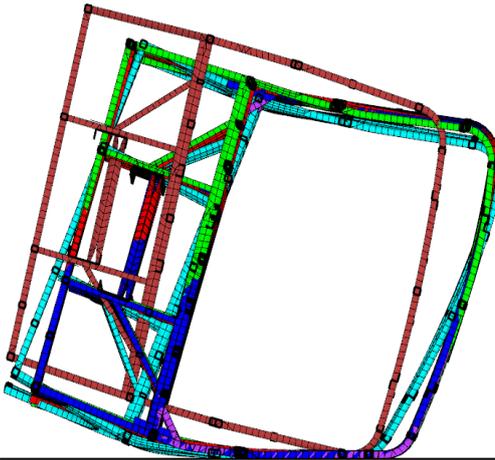
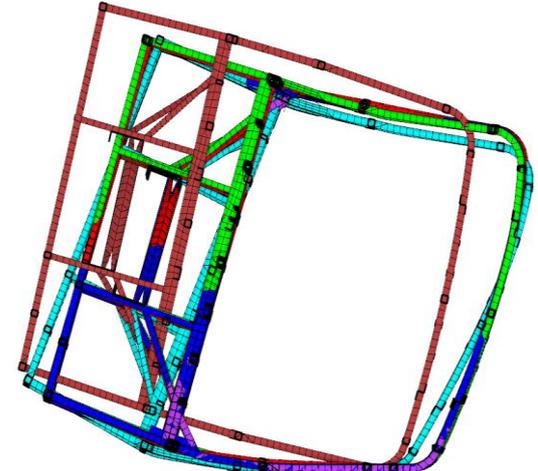
### 3.1.8.1 Comparación de deformación por secciones

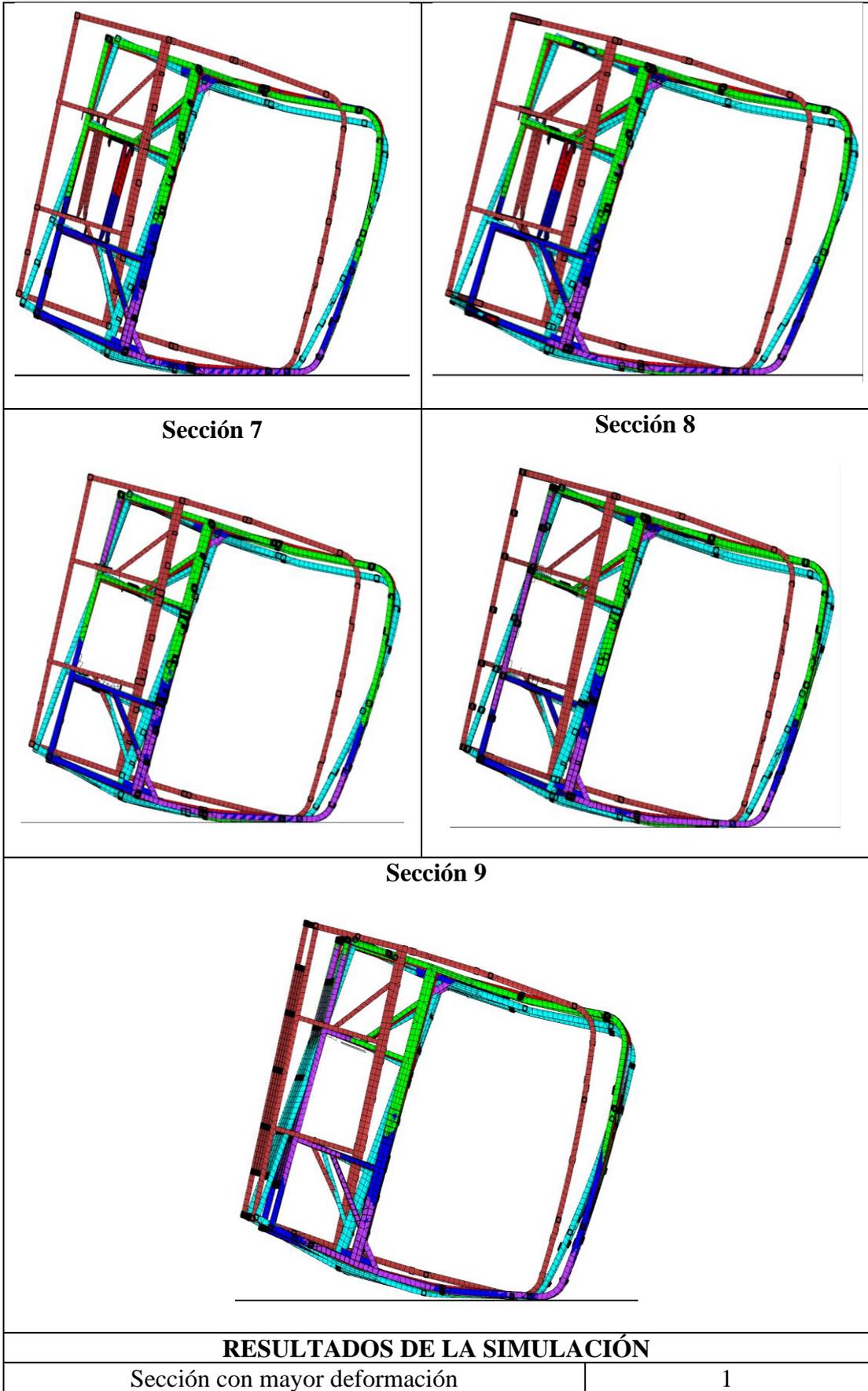
En la tabla 24 se presenta las vistas de las 9 secciones que componen la superestructura del autobús, las cuales están identificadas mediante un color diferente, como muestra la tabla 23 para identificar la superestructura con su refuerzo.

**Tabla 23:** descripción de color para cada sección de la superestructura

Color	Descripción
Marrón	Estructura estado inicial
Rojo	Estructura sin fuerza
Azul	Estructura refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso
morado	Estructura refuerzo entre la pared lateral y el piso
verde	Estructura con refuerzo multi-cell
celeste	Estructura con refuerzo espuma de aluminio

**Tabla 24:** comparación de deformación

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE MECÁNICA</b>			
N° de superestructuras	5	Muestra de:	Superestructura del autobús interprovincial
Fecha de ejecución	16/1/2023	Realizado por	Santiago Caisaguano
		Revisado por	Ing. César Arroba
<b>COMPARACIÓN DE DEFORMACIÓN</b>			
<b>Sección 1</b>		<b>Sección 2</b>	
			
<b>Sección 3</b>		<b>Sección 4</b>	
			
<b>Sección 5</b>		<b>Sección 6</b>	



Un análisis más profundo del modelo de la sección de la carrocería sin refuerzo muestra que la deformación más importantes ocurre en la conexión entre la estructura del piso y la pared lateral. Por lo tanto, los refuerzos en la sección 1 mejoran significativamente el desempeño de la superestructura ya que elementos como el motor, caja de cambios, llantas, rines y el peso mismo de la estructura influye directamente en el impacto de estructura con el piso provocando una mayor deformación. Por otro lado, el refuerzo con espuma de aluminio muestra su deformación más importante entre la estructura del techo y la pared lateral, así como en la conexión del piso y la pared lateral.

De modo similar en la tabla 24 se ilustra por medio de las imágenes la deformación de la secciones 2, 3, 4, 5, 6 muestra que los refuerzos implementados en el piso y pared lateral tiene una mejora en la resistencia de la sección al vuelco, en comparación con el modelo de espuma de aluminio que al igual que la sección 1 muestra su deformación entre la estructura del techo y la pared lateral.

De igual forma, en la tabla 24 se muestra el comportamiento de las secciones 7, 8, 9 de la superestructura del autobús con refuerzo teniendo una mayor resistencia al impacto de la estructura con el piso y su deformación es menor, por otro lado, el refuerzo de espuma de aluminio tiene una mejora en la resistencia al impacto, pero tiene deformación en la estructura del techo.

### **3.2 Verificación de hipótesis**

Para demostrar la hipótesis se utilizará el método del Anova con el fin de aceptar o rechazar la hipótesis nula.

Para realizar el análisis estadístico, se comparó la deformación de la superestructura del autobús sin refuerzo con los cuatro refuerzos implementados. Se tomaron en cuenta los resultados de la deformación máxima de cada sección del autobús, y se analizó la media y la varianza. En la tabla 25 muestra los datos seleccionados para este análisis.

**Tabla 25:** Datos de las deformaciones de las secciones del autobús

Deformación (Y) (mm)									
Estructura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sin refuerzo	49,4	64,3	79,7	87	95,7	104	114	117	126
Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	68	86	106	115	127	136	144	147	153
Refuerzo entre la pared lateral y el piso	66,7	89	109	121	133	143	154	158	161
Multicell	94,2	104	117	130	143	153	164	162	166
espuma de aluminio	-123	-96,3	0	-31,4	-5,48	20,4	41	58,5	94,4

El análisis estadístico de los resultados de deformación máxima se observa en las tablas 26 y 27. En el análisis ANOVA, el valor p se usa para evaluar si todas las medias son iguales. En este caso, el valor p es 1,4454E-08, lo que muestra una diferencia significativa entre las simulaciones. Por lo tanto, las muestras indican que hay una diferencia en el valor medio de la deformación máxima entre las cinco simulaciones.

**Tabla 26:** cálculo del promedio y varianza

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
sin refuerzo	9	837.1	93	646.5
refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso	9	1082	120.2	847.4
refuerzo entre la pared lateral y el piso	9	1134.7	126.1	1071.3
multicell	9	1233.2	137	732.1
espuma de aluminio	9	-41.9	-4.7	4956.8

**Tabla 27:** Cálculo de la media de los cuadrados y la razón F

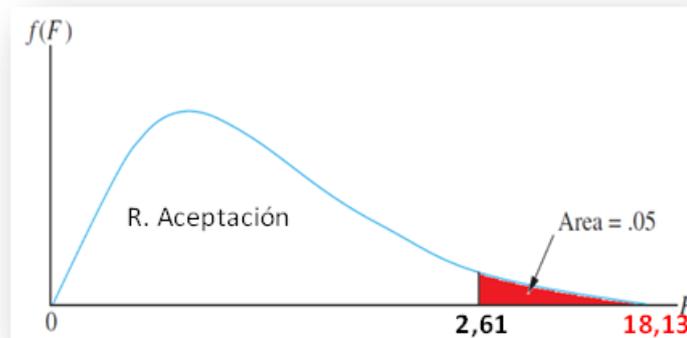
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	119703.5	4	29925,9	18.1	1,4454E-08	2.6
Dentro de los grupos	66033.2	40	1650,8			
Total	185736.8	44				

Se considera:

Se acepta  $H_0$ , si el valor de F calculado  $<$  al valor crítico de F

Se rechaza  $H_0$ , si el valor de F calculado  $>$  al valor crítico de F

En el análisis, se obtuvo un valor de F calculado de 18.1, mientras que el valor crítico de F es de 2.6. La figura muestra que el valor crítico de 2.6 es el límite entre la región de aceptación y la región de rechazo. Si el valor de F calculado está a la derecha del valor crítico, se rechaza la hipótesis nula. En este caso, como el valor de F calculado es mucho mayor que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una diferencia significativa entre las muestras analizadas.



**Figura 54:** límite de la región de aceptación y rechazo de la prueba ANOVA

Dado que el valor de F calculado es  $18.1 > 2.7$  al valor crítico de F se rechaza la hipótesis nula.

- **Prueba Tukey** para identificar las diferencias entre medias

La prueba de Tukey es una técnica utilizada para comparar las medias de varias muestras y determinar si existen diferencias significativas entre ellas. Esta prueba se utiliza después de que se haya rechazado la hipótesis nula en un análisis de varianza (ANOVA). En la tabla 28 muestra la diferencia entre las medias de cada refuerzo.

**Tabla 28:** Diferencia entre las medias de cada refuerzo

<b>Refuerzo</b>	<b>diff</b>	<b>lwr</b>	<b>upr</b>	<b>p adj</b>	
Multicell-Espuma	141,6	87	196	0.0000001	Significativa
refuerzo con juntas -Espuma	125	70	180	0.0000009	Significativa
refuerzo entre la pared lateral y el piso-Espuma	131	76	185	0.0000003	Significativa
Sin refuerzo-Espuma	98	43	152	0.0000812	Significativa
Refuerzo con juntas-Multicell	-17	-72	38	0.9036150	No Significativa
refuerzo entre la pared lateral y el piso-Multicell	-11	-66	44	0.9784900	No Significativa
Sin refuerzo-Multicell	-44	-99	11	0.1668050	No Significativa
refuerzo entre la pared lateral y el piso-refuerzo con juntas	6	-49	61	0.9980188	No Significativa
Sin refuerzo-refuerzo con juntas	-27	-82	27	0.6182966	No Significativa
Sin refuerzo- refuerzo entre la pared lateral y el piso	-33	-88	22	0.4299117	No Significativa

Donde:

diff: diferencia entre las medias de los dos grupos

lwr, upr: el punto final inferior y superior del intervalo de confianza al 95% (predeterminado)

p adj: valor de p después del ajuste para las comparaciones múltiples.

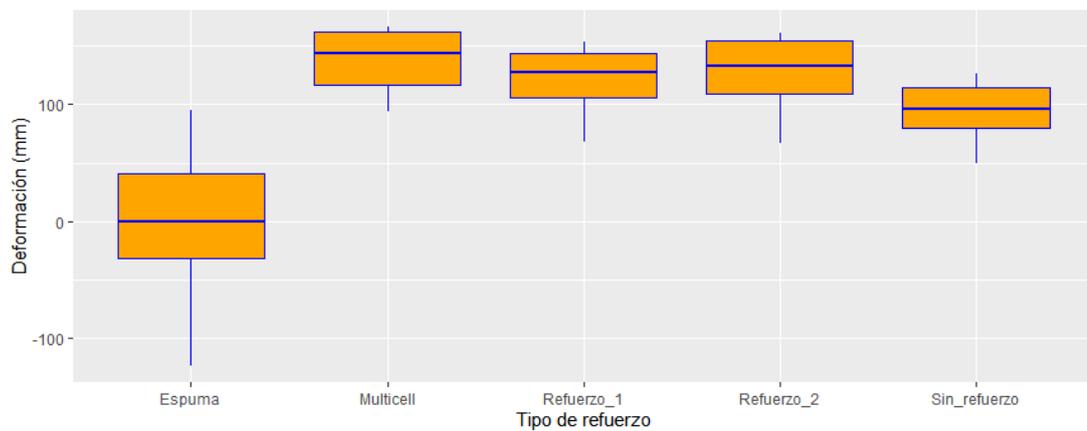
Se considera

Las diferencias de medias para las que el intervalo de confianza correspondiente no contiene el valor 0 son estadísticamente significativas. Si el intervalo de confianza contiene el valor 0, no hay diferencia significativa entre los valores medios.

- H0: Las medias son iguales
- Ha: Las medias son significativamente diferentes
- p-valor < 0.05 se rechaza la hipótesis nula.
- p-valor > 0.05 se acepta la hipótesis nula.

Los valores de la tabla 28, muestran diferencias significativas entre los refuerzos multicell- espuma de aluminio; refuerzo con juntas -Espuma de aluminio; refuerzo entre la pared lateral -Espuma de aluminio y estructura sin refuerzo- espuma de aluminio. Por otro lado, las combinaciones que no incluyen la espuma de aluminio no muestran valores significativos llegando a la conclusión que las medias son iguales.

En la gráfica se observa los niveles de deformación significativa que se generó en cada simulación.



**Figura 55:** Niveles de deformación significativa

Además, comparando los cuatro casos de estudio se establece que la hipótesis que se planteó para dicha investigación se pudo comprobar que mediante la simulación del ensayo de vuelco de una superestructura de autobús interprovincial y de acuerdo a las figuras 43; 46; 49, se establece que el espacio de supervivencia determinado no es invadido en tres refuerzos estructurales como juntas entre la pared lateral y el piso, refuerzo entre la pared lateral y el piso, refuerzo multi-cell, determinando que para los tres refuerzos la superestructura del autobús estudiado es seguro aplicar estos refuerzos.

Para el caso del refuerzo de espuma de aluminio el espacio de supervivencia determinado es invadido por la superestructura en 90.8 mm incidiendo en la seguridad de los ocupantes, determinado que el refuerzo para la superestructura del autobús no es seguro.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

Se investigó la influencia de los refuerzos estructurales no convencionales en la superestructura de un autobús en su capacidad de resistencia al vuelco. Se implementaron 4 refuerzos, incluyendo un modelo base, utilizando un modelo MEF y se realizaron simulaciones de vuelco de acuerdo con la norma CEPE R66. Los resultados de cada modelo se evaluaron y compararon en términos de rendimiento de la resistencia al vuelco. Esto llevó a varias conclusiones que se presentan a continuación:

- La conclusión del estudio indica que, si bien el modelo de autobús con refuerzo de espuma de aluminio puede mejorar la resistencia estructural, presenta un problema de invasión en el espacio residual. El valor máximo de invasión se encontró en la parte frontal del autobús debido a la debilidad de la estructura, y el refuerzo aumentó esta invasión al espacio residual, pasando de 49.4 mm a -123 mm. Esto significa que, en caso de un accidente, los pasajeros pueden estar expuestos a mayores riesgos.
- Los resultados de la investigación experimental demostraron que el espacio residual no afecta negativamente a los modelos de autobuses con refuerzos en las juntas entre la pared lateral y el piso. Además, estos refuerzos demostraron una mejora significativa en la distancia horizontal a la zona de supervivencia, con valores de 68mm y 67mm respectivamente, en comparación con la superestructura de la carrocería sin refuerzo que solo tuvo 49 mm. Estos hallazgos sugieren que los refuerzos son efectivos y se pueden implementar en la producción de nuevos autobuses para mejorar la seguridad de los pasajeros contra los accidentes de vuelco. Además, el material necesario para realizar estos refuerzos es de fácil adquisición, lo que los hace una solución viable y rentable para la industria del transporte.
- Los resultados de este estudio indican que el uso de refuerzos en la estructura de los autobuses puede tener un impacto significativo en la seguridad de los pasajeros en caso de colisiones. En particular, el tipo de refuerzo multi-cell colocado entre

la conexión del piso y la estructura lateral demostró ser el más efectivo, mejorando la distancia horizontal a la zona de supervivencia en 45 mm en comparación con la estructura sin refuerzo.

- En conclusión, el modelado de la superestructura de un autobús a través del software CAD SolidWorks resultó efectivo para cumplir con las regulaciones establecidas por la normativa INEN 1668, que establece las dimensiones máximas y mínimas requeridas para los autobuses interprovinciales. Con el uso de esta herramienta, se logró crear una estructura segura para los pasajeros, lo que demuestra la importancia del uso de tecnología en la fabricación de vehículos de transporte. Este modelo puede servir como punto de referencia para futuros proyectos de diseño y fabricación de autobuses interprovinciales en cumplimiento con las regulaciones establecidas.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Es esencial verificar que la energía de hourglass cumpla con los parámetros programados para garantizar la coherencia y representatividad de los resultados de la simulación. La energía de hourglass juega un papel fundamental en la modelación de la deformación de los materiales y es clave para la precisión de la simulación. Al asegurarse de que cumpla con los parámetros establecidos, se puede tener la confianza de que los resultados obtenidos sean cercanos a la realidad y la simulación sea confiable.
- Comprobar que el mallado cumple con la regla del Jacobiano es importante para garantizar la precisión y validez de la simulación. La regla del Jacobiano establece que la relación entre el volumen de la malla y el volumen del elemento finito debe permanecer constante en un rango específico, generalmente entre 0.3 y 0.6. Verificar que el mallado cumple con esta regla asegurará que los resultados de la simulación sean precisos y representativos de la realidad.
- Se debe realizar pruebas experimentales para validar los resultados actuales. Además, también se debe estudiar los efectos de las modificaciones de la superestructura en lesiones de pasajeros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Wu, G. Zheng, G. Sun, Q. Liu, G. Liab y Q. Li, "On design of multi-cell thin-wall structures for crashworthiness", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 88, p. 102–117, 2016.
- [2] R. Guilherme, "Espuma de alumínio como absorvedor de impacto em carrocerias de ônibus", Universidad Federal De Rio Grande Do Sul, Brasil , 2017.
- [3] Y. Li, F. Lan y J. Chen, "Numerical study on the influence of superstructure configuration on coach rollover resistance performance", *International Journal of Crashworthiness*, vol. 17, nº 6, p. 637–654, 2012.
- [4] Bus rollover crashworthiness under European standard: an optimal analysis of superstructure strength using successive response surface method, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 14, nº 6, p. 623–639, 2009.
- [5] G. Munez, "Simulación de un ensayo de vuelco de un autobús mediante LS-DYNA", Universidad Carlos III de Madrid , Madrid , 2010.
- [6] Agencia Nacional de Tránsito , Estadísticas de siniestros de tránsito, [En línea]. Available: <https://www.ant.gob.ec/estadisticas-siniestros-de-transito/>. [Último acceso: 24 07 2022].
- [7] K. Özgün, "Rollover crashworthiness of a multipurpose coach", Istanbul Technical University, Istanbul, 2015.
- [8] F. Murillo, "Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses", Universidad Politecnica de Madrid , Madrid, 2018.
- [9] D. Kecman, "Vending collapse of rectangular section tubes in relation to the bus roll over problem", Cranfield Institute of Technology, United Kingdom, 1979.

- [10] J. Ambrósio, M. Seabra y F. Pina, *Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection*, vol. 332, Boston: Kluwer Academic, 1997.
- [11] H. Liu, Z. Chng, G. Wang y B. Ng, Crashworthiness improvements of multi-cell thin-walled tubes through lattice structure enhancements., *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 210, n° 106731, 2021.
- [12] G. J y O. J, "Aluminium foams. Manufacture, properties and applications", *Revista de Metalurgia*, vol. 44, n° 5, 2008.
- [13] E. Andrews, W. Sanders y L. J. Gibson, "ompressive and tensile behaviour of aluminum foams", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 270, n° 2, p. 113–124, 1999.
- [14] M. Romero, Obtención de estructura de poros homogénea de espumas de Aluminio A356, utilizando como agente espumante partículas NÚCLEO/MULTI-CORAZA basadas en TiH<sub>2</sub>, Centro de investigación en materiales avanzados, S.C, Chihuahua, 2018.
- [15] E. F. Yautibug Yuquilema , Análisis Estructural De Una Furgoneta De Tipo M2 Aplicando La Carga Dispuesta Del Anexo 7 De Cepe R66 Mediante Análisis Computacional, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, 2021.
- [16] NTE INEN 2415, "Tubos de acero al carbono soldados para aplicaciones estructurales y usos generales", Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2016.
- [17] D. H. Acosta Ramón, "Análisis de los efectos del AIRBAG del conductor de autobus en colisiones frontales mediante simulación", Universidad Técnica de Ambato , Ambato, 2022.
- [18] LS-DYNA | Livermore Software Technology Corp., Home | Livermore Software Technology Corp., [En línea]. Available: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>.

- [19] W. Zhou, "Computational Analysis of Motorcoach Rollover for Passenger Safety Assessment", University of Manitoba, Manitoba, 2018.
- [20] LSTC Lsdyna. [En línea]. Available: [https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA\\_manual\\_Vol\\_I\\_R6.1.0.pdf](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_manual_Vol_I_R6.1.0.pdf). [Último acceso: 10 01 2023].
- [21] D. D. Illescas Pérez , Simulación De Un Choque Frontal De Un Vehículo Automóvil Contra Diferentes Tipos De Barrera, Universidas Carlos III de Madrid Escuela Politecnica Superior , Madrid , 2009.
- [22] C. H. Arroba Arroba , “Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobús interprovincial marca Miral Infiniti en chasis Hino Ak sometida a volcadura, mediante los programas Ansys Ls-Dyna y su incidencia en el espacio de supervivencia, Universidad Tecnica de Ambato, Ambato, 2013.
- [23] M. Styles, P. Compston y S. Kalyanasundaram, Finite element modelling of core thickness effects in aluminium foam/composite sandwich structures under flexural loading, *Composite Structures*, vol. 86, n° 1-3, p. 227–232, 2008.
- [24] CEPE R66, Reglamento no 66 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE/ONU), Diario Oficial de la Unión Europea, 2007, pp. 321 - 355.
- [25] S. Wicaksono, R. Faisal, S. Mihradi y S. Prifiharni, Finite Element Analysis of Bus Rollover Test in Accordance with UN ECE R66 Standard, *journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 49, n° 79, pp. 799-810 , 2017.
- [26] M. Islam y O. Netula, "Study of Behavior of RCC Beam under Impact Loading and Effect", *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 8, pp. 127-134, 2019.
- [27] J. Niachimba, Análisis de lesiones producidas en el vuelco de autobuses interprovinciales evaluadas según los criterios del reglamento n 95 de la

comisión económica para EUROPA (CEPE) de las Naciones Unidas utilizando el modelo computacional antropométrico del maniquí, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2021.

- [28] LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, 8 31 2016. [En línea]. Available: [https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA\\_Manual\\_Volume\\_II\\_R9.0.pdf](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/LS-DYNA_Manual_Volume_II_R9.0.pdf).

# **ANEXOS**

## Anexo 1

MASA	LARGURA	HORA	FUERZA	ESTRÉS	ENERGÍA	DENSIDAD	YOUNG's	35MPH 56.33KMPH	GRAVEDAD
kg	m	s	N	Papá	J	7.83e+03	2.07e+11	15.65	9.806
kg	cm	s	1,0E-02 N			7.83E-03	2.07e+09	1.56e+03	9,806E+02
kg	cm	Sra.	1.0e+04 N			7.83E-03	2.07e+03	1.56	9.806E-04
kg	cm	nos	1.0e+10 N			7.83E-03	2.07E-03	1.56E-03	9.806E-10
kg	milímetro	Sra.	Kn	GPa	kN-mm	7.83E-06	2.07e+02	15.65	9.806E-03
g	cm	s	dina	dinam/cm <sup>2</sup>	ergio	7.83e+00	2.07e+12	1.56e+03	9,806E+02
g	cm	nos	1.0e+07 N	Mbar	1.0e+07 Ncm	7.83e+00	2.07e+00	1.56E-03	9.806E-10
g	milímetro	s	1,0E-06 N	Papá		7.83E-03	2.07e+11	1.56e+04	9.806e+03
g	milímetro	Sra.	N	BPN	N-mm	7.83E-03	2.07e+05	15.65	9.806E-03
tonelada	milímetro	s	N	BPN	N-mm	7.83E-09	2.07e+05	1.56e+04	9.806e+03
lbf-s <sup>2</sup> /entrada	en	s	Lbf	Psi	LBF-IN	7.33E-04	3.00e+07	6.16e+02	386
trago	Pies	s	Lbf	Psf	lbf-ft	1.52e+01	4.32e+09	51.33	32.17
kgf-s <sup>2</sup> /mm	milímetro	s	Kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf-mm	7.98E-10	2.11e+04	1.56e+04	9.806e+03
kg	milímetro	s	Mn	1.0e+03 Pa		7.83E-06	2.07e+08		9.806e+03
g	cm	Sra.	1.0e+1 N	1.0e+05 Pa		7.83e+00	2.07e+06		9.806E-04

### Datos curva esfuerzo – deformación unitaria del material ASTM A-500 GRADO A

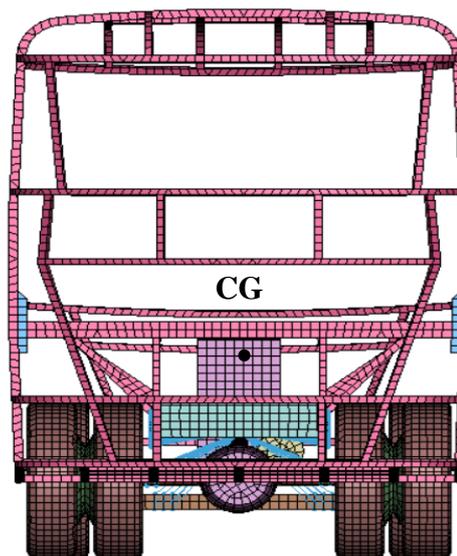
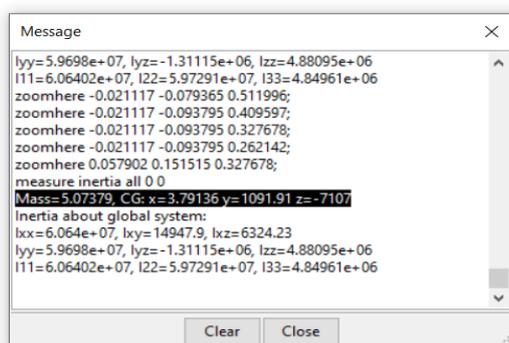
Deformación	Carga
0.0	270.0
0.015867	2.728.571
0.0308755	2.757.143
0.0464282	2.785.714
0.062529	2.814.286
0.0791818	2.842.857
0.0963904	2.871.429
0.1141588	290.0
0.1324909	2.928.571
0.1513905	2.957.143
0.1708616	2.985.714
0.1909081	3.014.286
0.2115339	3.042.857
0.2327429	3.071.429
0.25	310.0

### Véase 4.2.1 Entrada para propiedades mecánicas del material

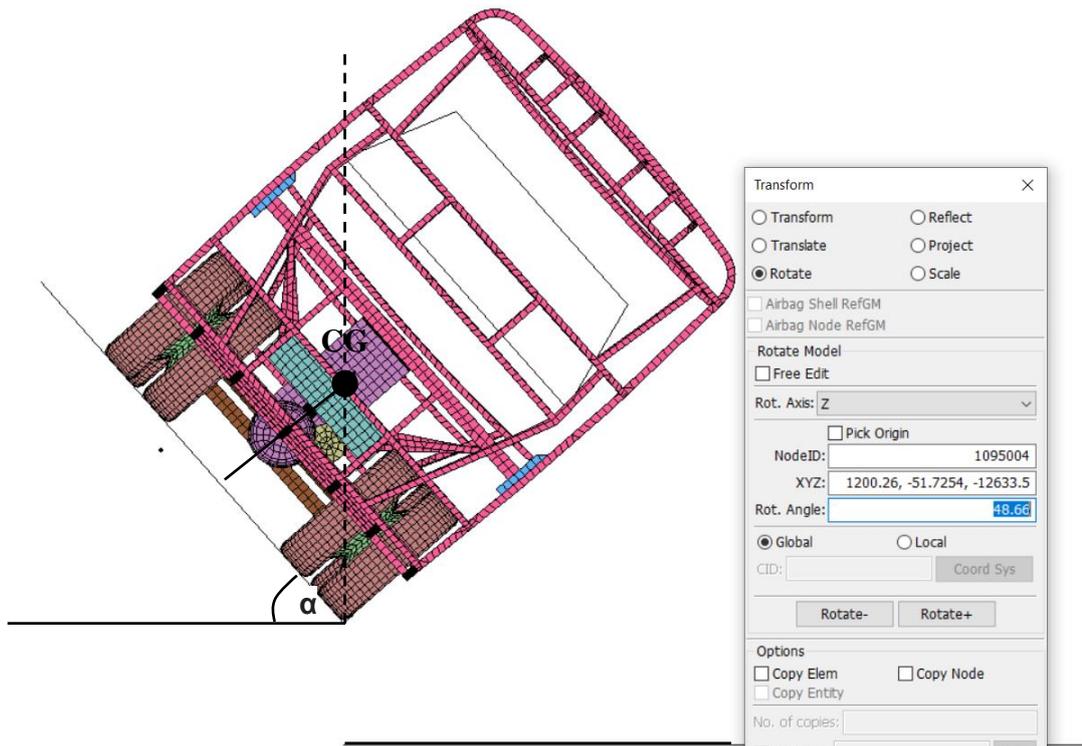
<b>020-Rigid</b>	
Densidad	7.89e – 09 ton/mm <sup>3</sup>
Módulo de Young	2.1e05 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3

01-Elastic	
Densidad	1.750e-09 ton/mm <sup>3</sup>
Módulo de Young	300 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3

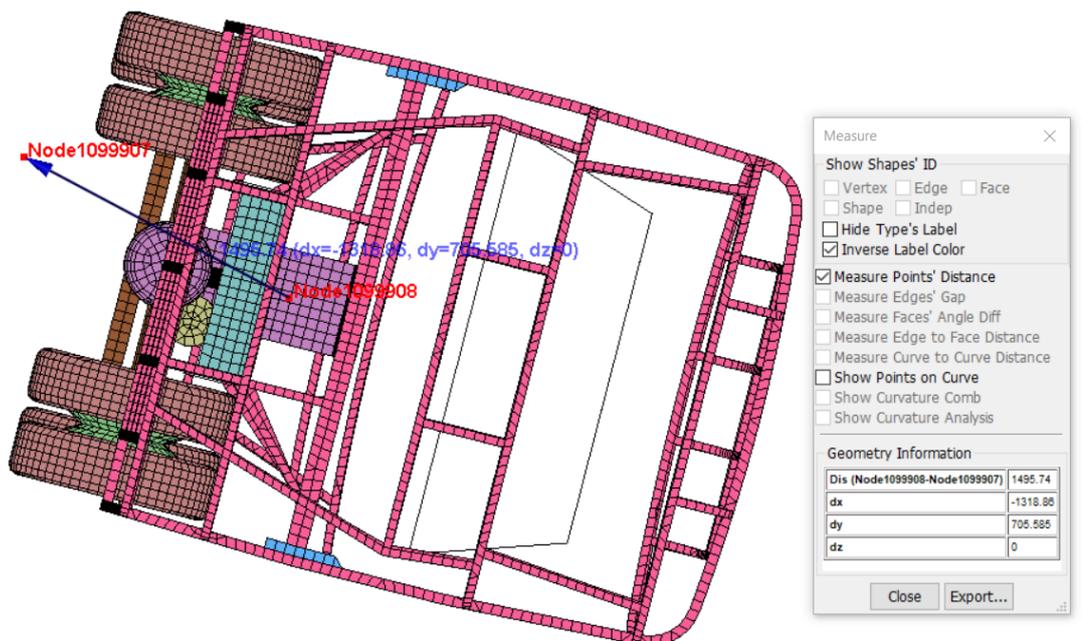
**Anexo 2A** Refuerzo con juntas entre la pared lateral y el piso



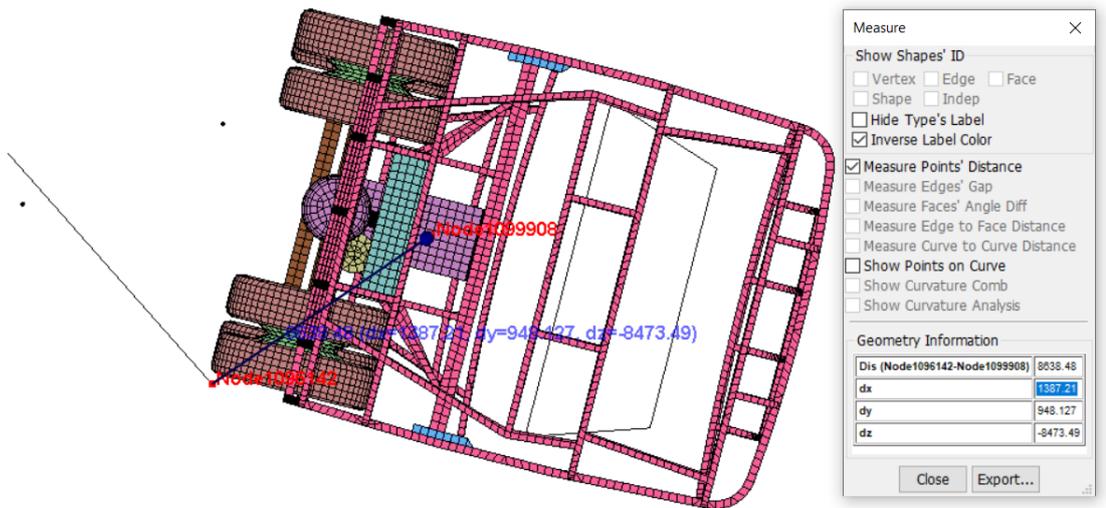
**Véase 2.5.14 centro de gravedad:** Como se indicó para determinar los valores del centro de gravedad debe asignarse el material y espesor a todos los componentes y estructura del autobús, ocultando elementos como zona de supervivencia, piso, rampa caso contrario los valores serán erróneos.



Véase 2.5.1.5 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral de los refuerzos estructurales

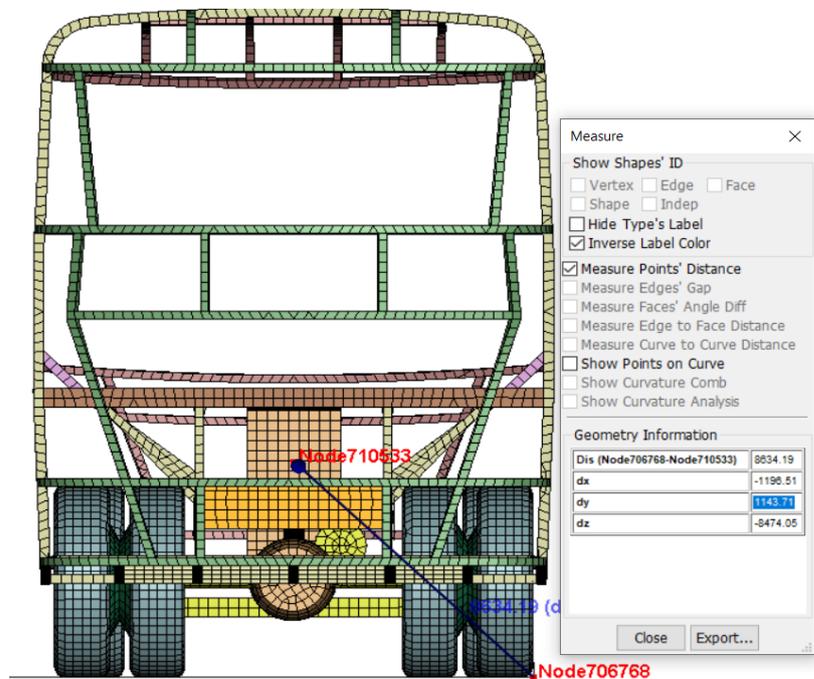


Véanse 2.5.1.6 Cálculo de la velocidad angular para los refuerzos estructurales: valor desplazamiento vertical medido desde el CDG al eje de referencia  $\Delta h = dy$



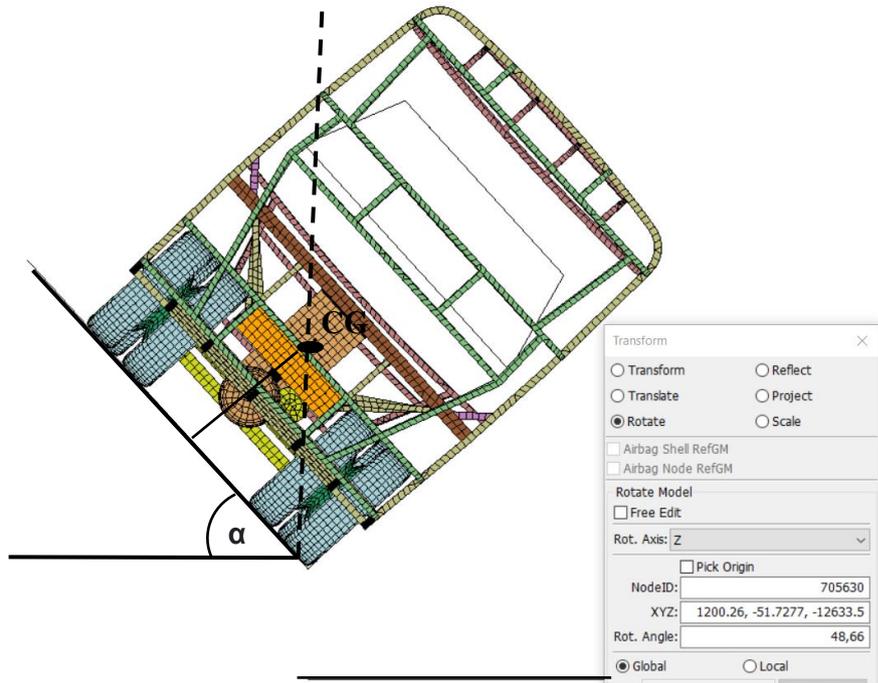
**Véanse 2.5.1.6 Cálculo de la velocidad angular para los refuerzos estructurales:** distancia radio de giro, representa la distancia del punto de giro hasta el punto del CDG antes del impacto.

### Anexo 2B Refuerzo entre la pared lateral y el piso

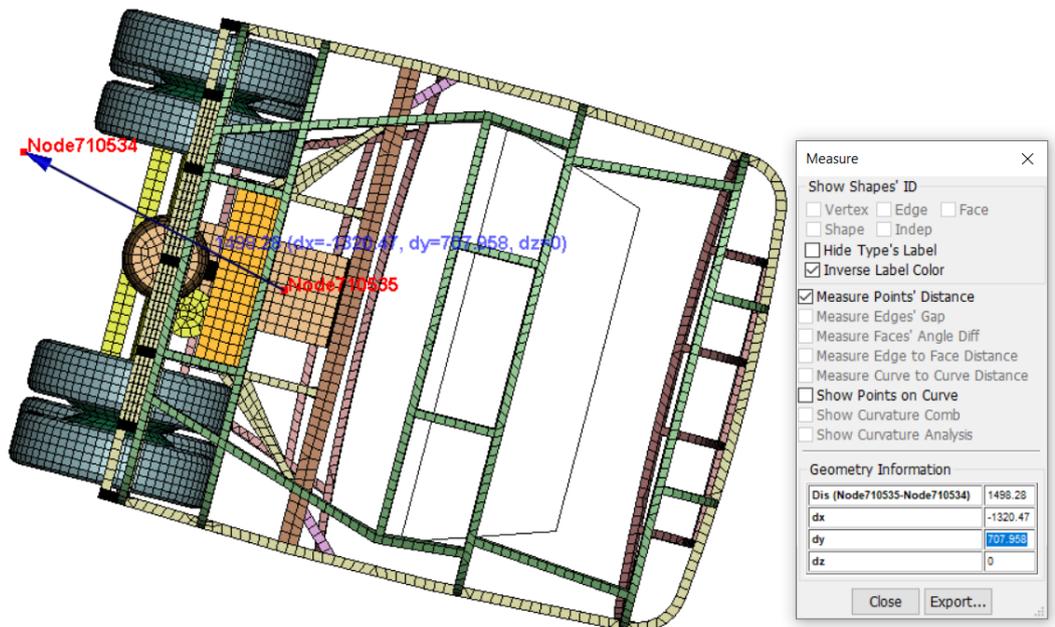


**Véase 2.5.14 centro de gravedad:** Como se indicó para determinar los valores del centro de gravedad debe asignarse el material y espesor a todos los componentes y

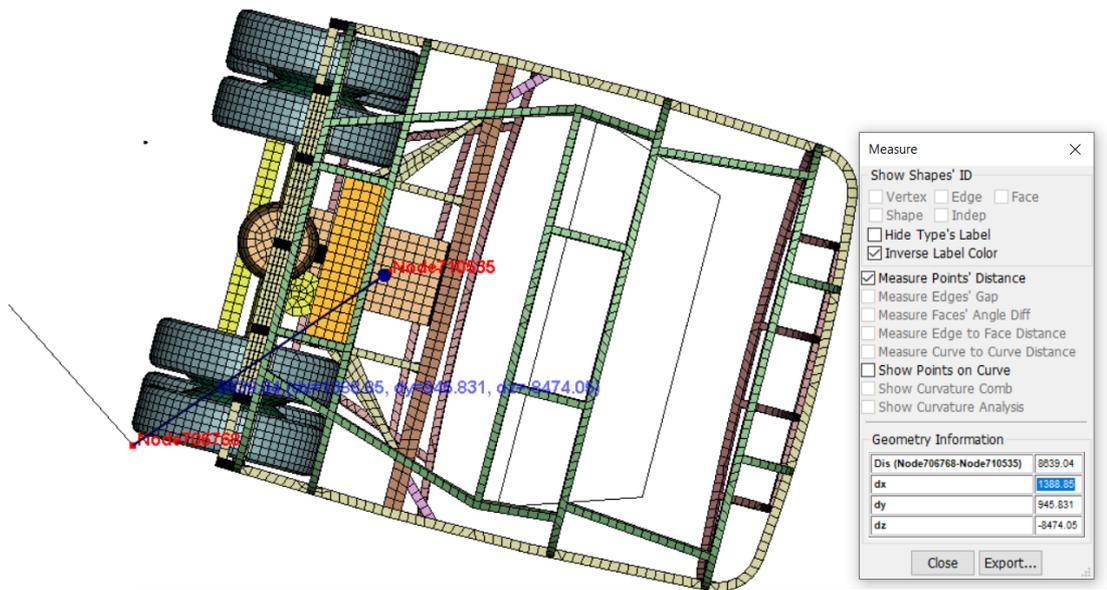
estructura del autobús, ocultando elementos como zona de supervivencia, piso, rampa caso contrario los valores serán erróneos.



Véase 2.5.1.5 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral de los refuerzos estructurales

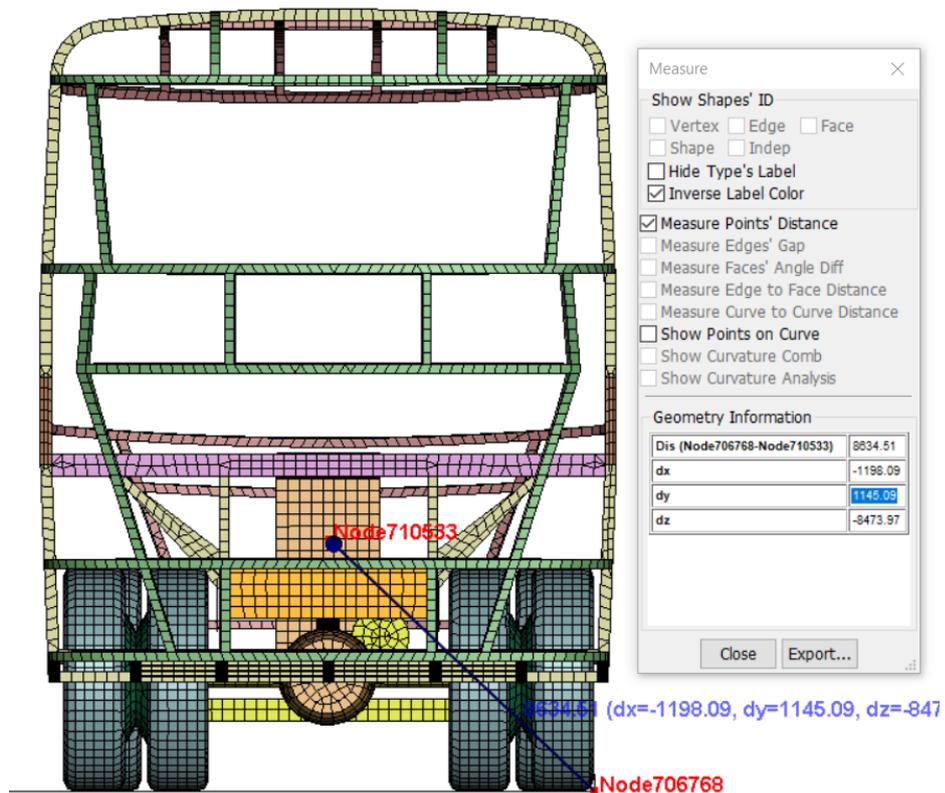


Véanse 2.5.1.6 Cálculo de la velocidad angular para los refuerzos estructurales: valor desplazamiento vertical medido desde el CDG al eje de referencia  $\Delta h = dy$

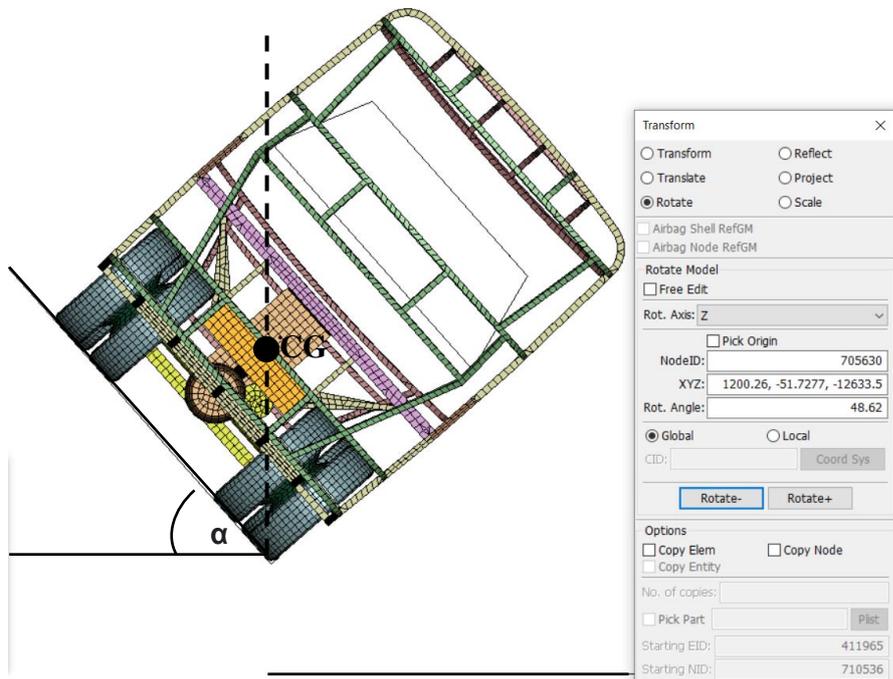


Véanse 2.5.1.6 Cálculo de la velocidad angular para los refuerzos estructurales: distancia radio de giro, representa la distancia del punto de giro hasta el punto del CDG antes del impacto

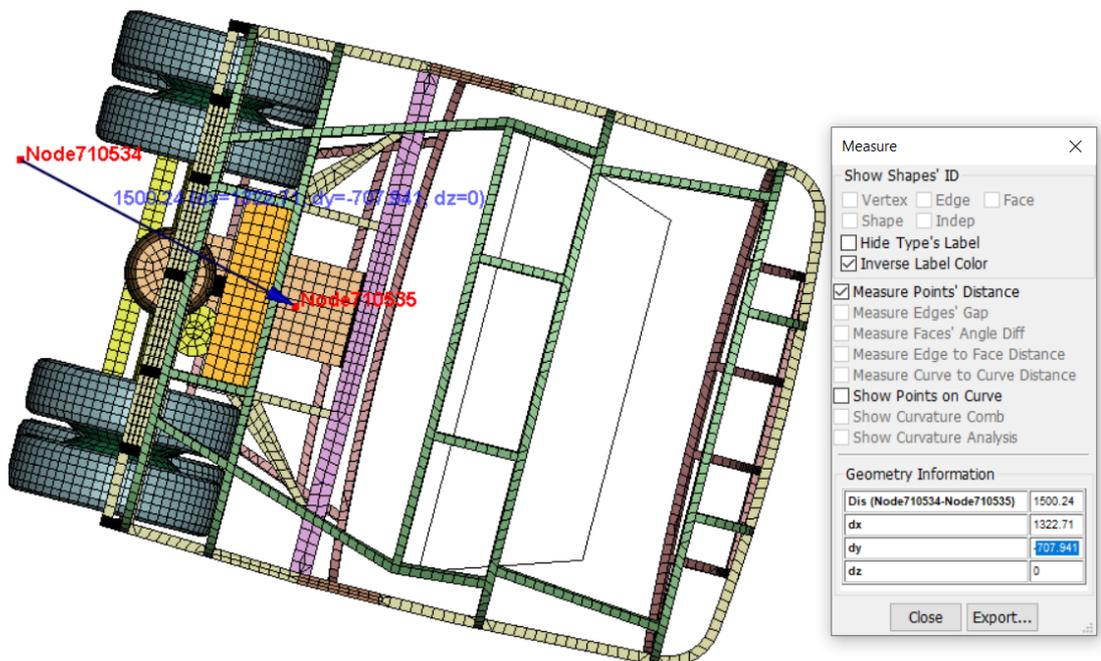
### Anexo 3A Refuerzo Multi-cell



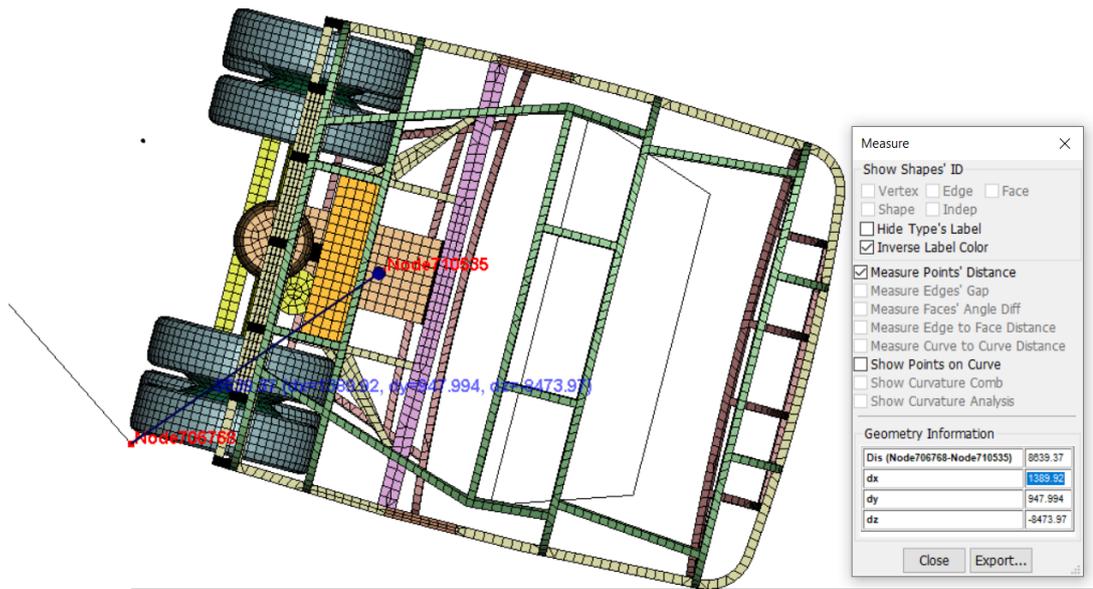
Véase 2.5.2.3 centro de gravedad: datos del centro de gravedad



Véase 2.5.2.4 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral

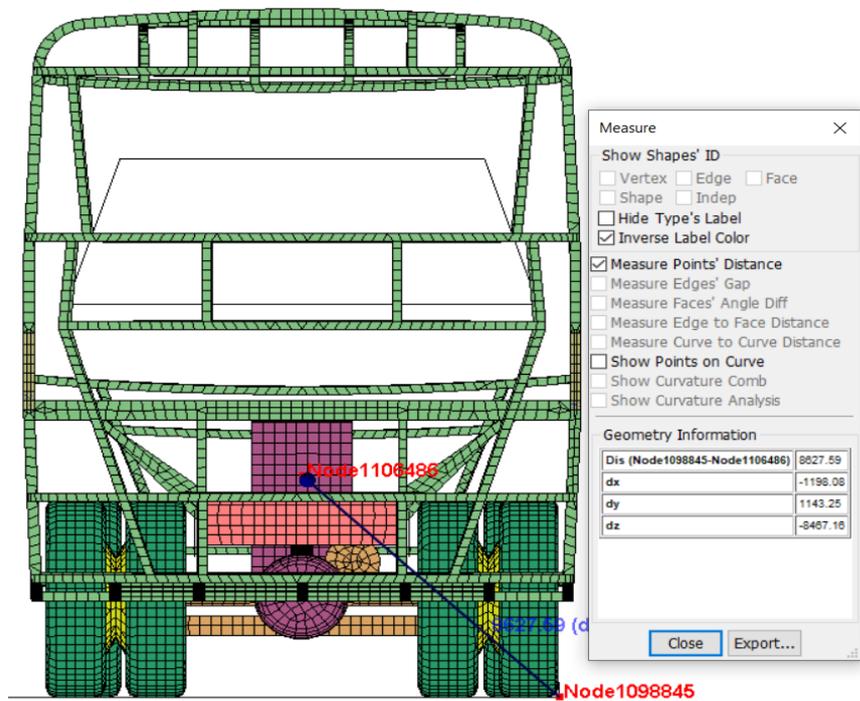


Véase 2.5.2.5 Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo multi-cell: valor desplazamiento vertical medido desde el CDG al eje de referencia  $\Delta h = dy$

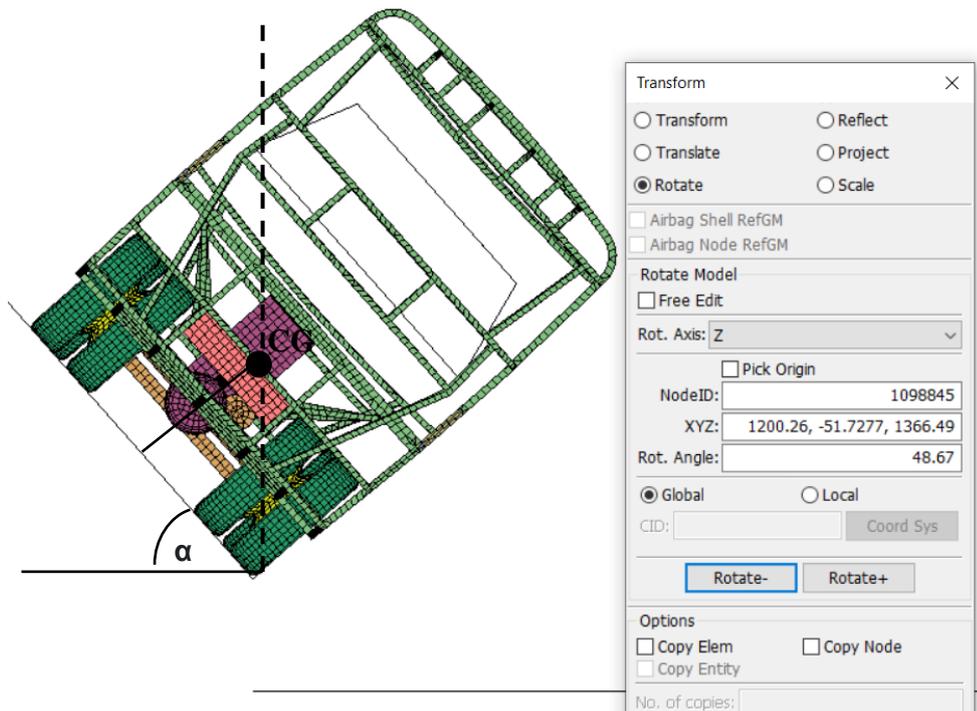


Véase 2.5.2.5 Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo multi-cell: valor radio de giro.

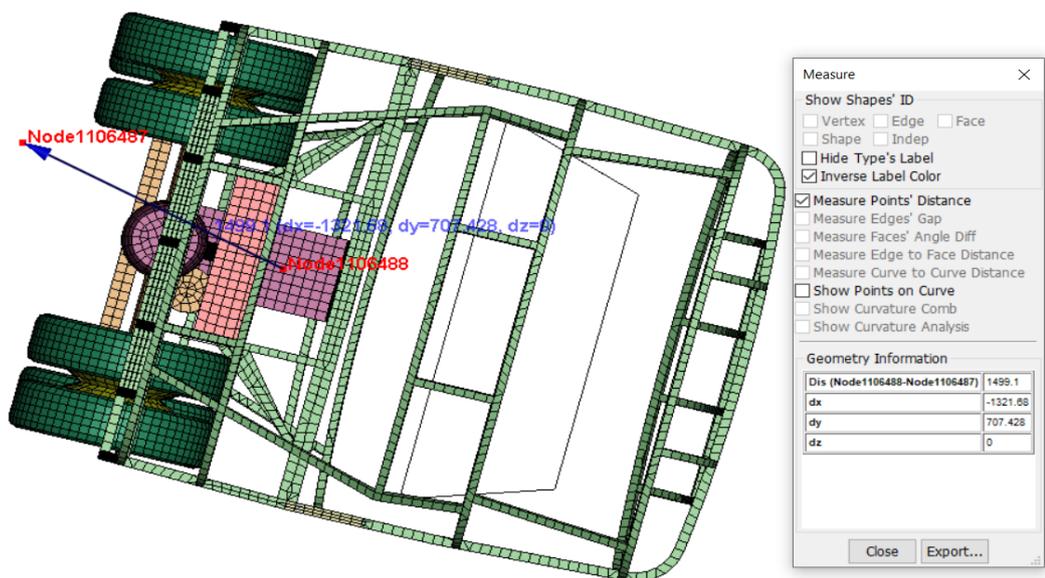
### Anexos 4A Refuerzo Espuma de Aluminio



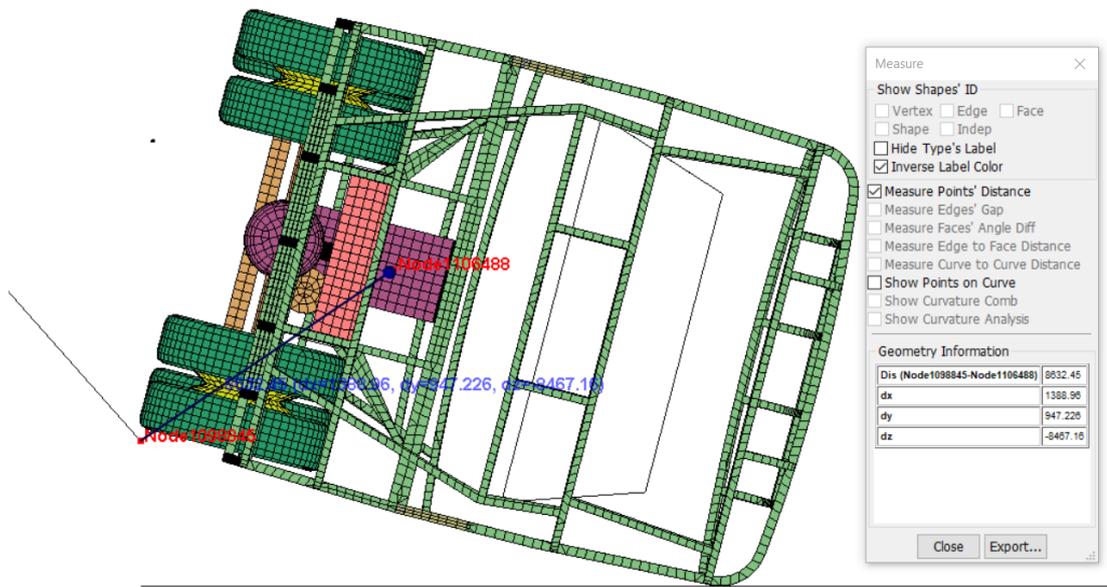
Véase 2.5.3.3 centro de gravedad: datos del centro de gravedad



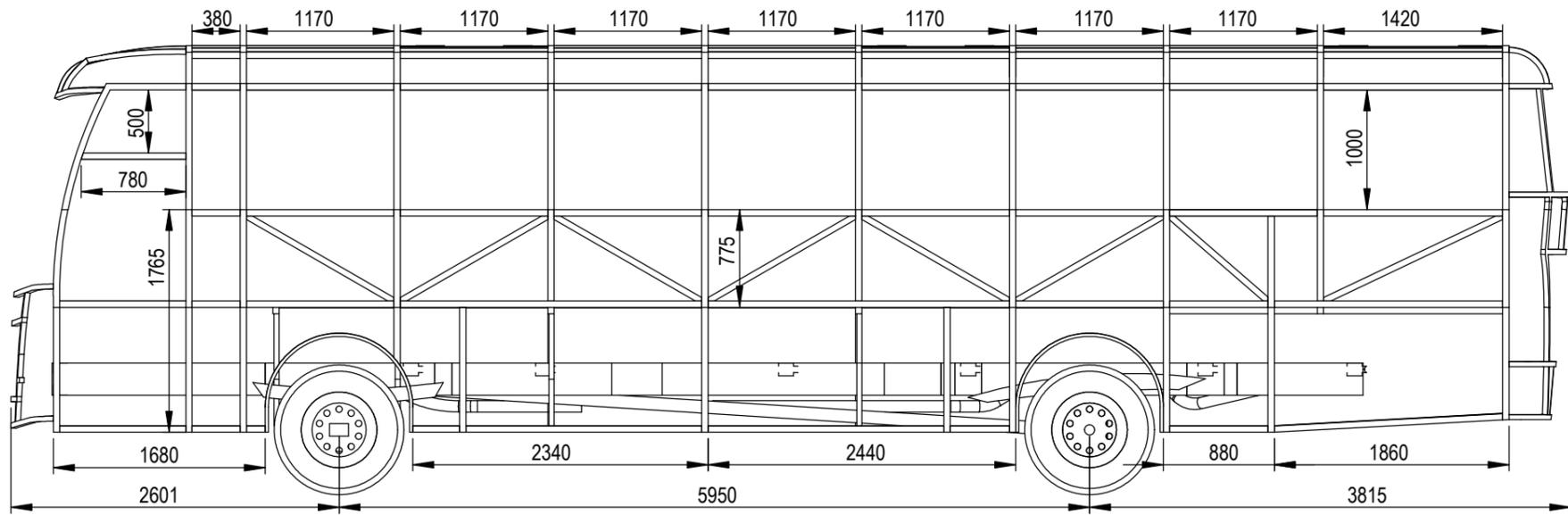
Véase 2.5.3.4 Cálculo del ángulo de inestabilidad lateral



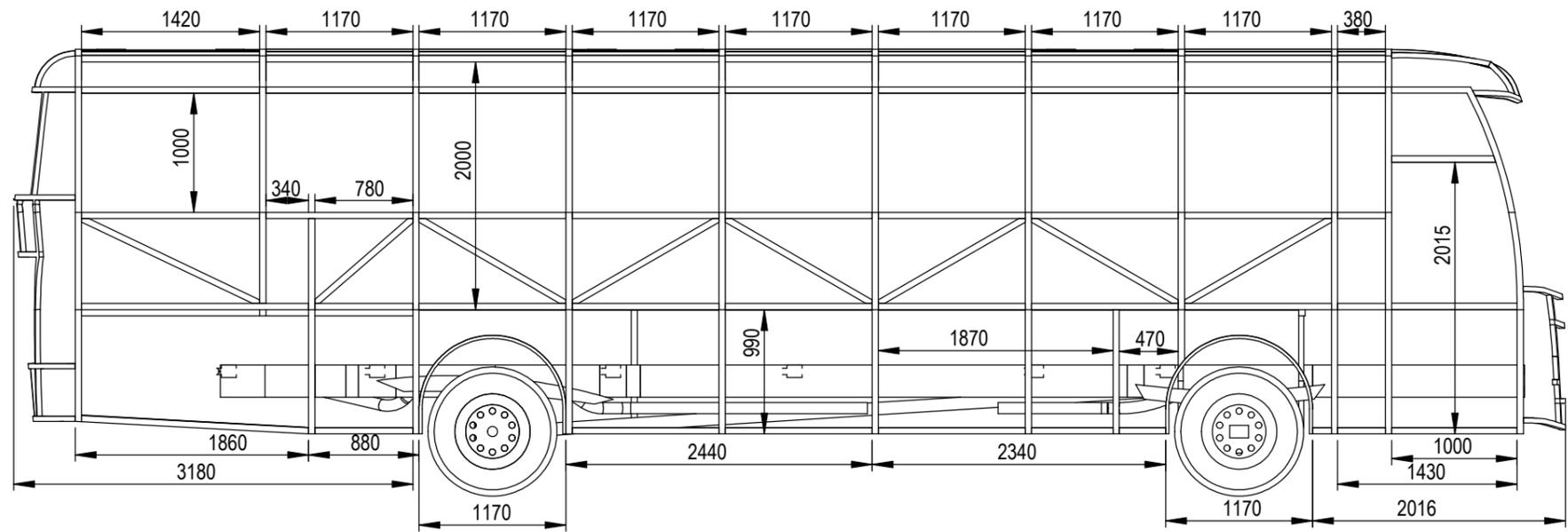
Véase 2.5.3.5 Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo espuma de aluminio: valor desplazamiento vertical medido desde el CDG al eje de referencia  $\Delta h = dy$



Véase 2.5.3.5 Cálculo de la velocidad angular de la estructura con refuerzo espuma de aluminio: valor radio de giro.

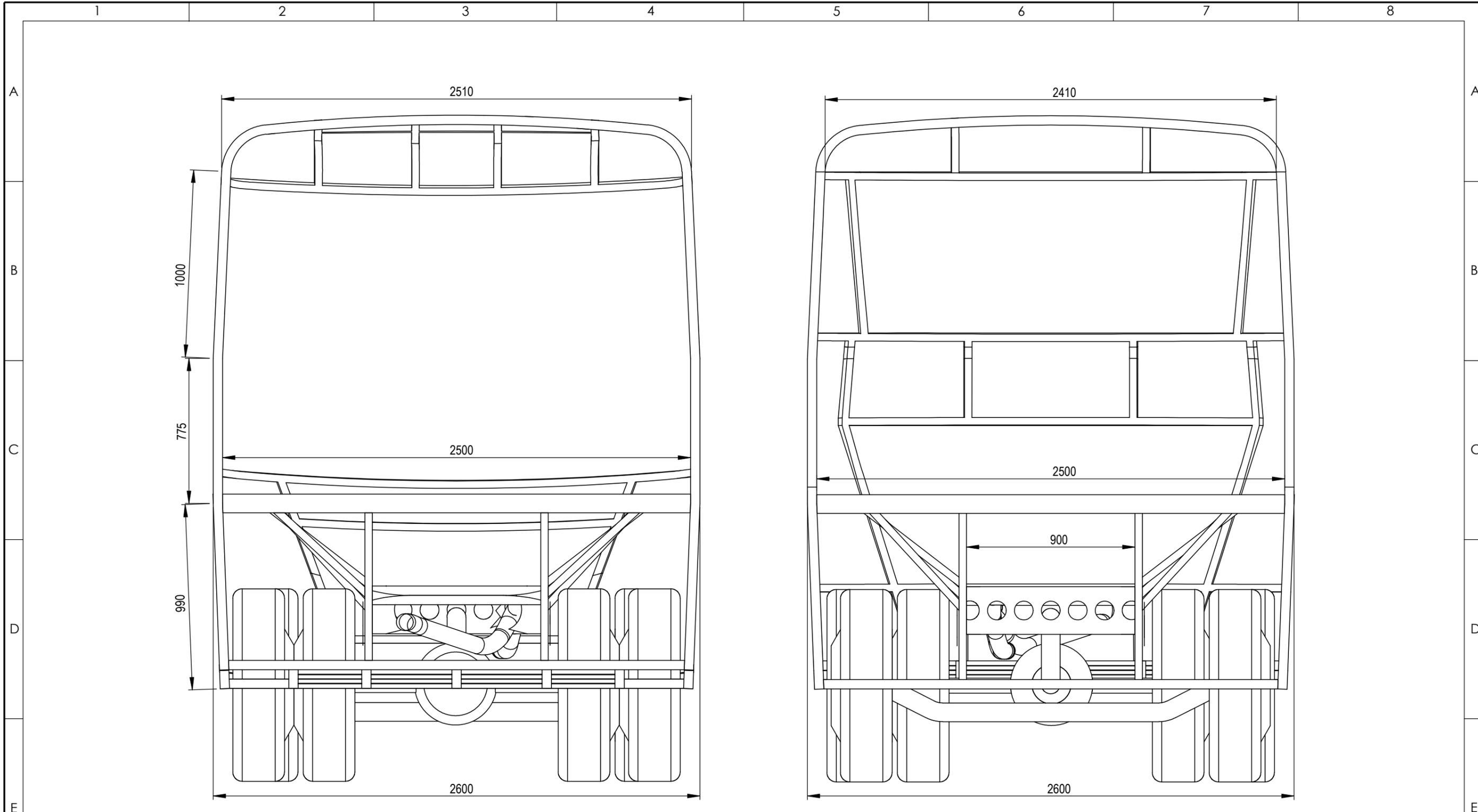


LATERAL IZQUIERDO



LATERAL DERECHO

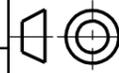
				TOLERANCIA: ±5 mm	PESO: No dispone	MATERIAL: Acero estructural ASTM A-500	
				FECHA DIBUJO: 15/2/2023	NOMBRE Caisaguano S	TÍTULO: Vistas laterales	
				REVISO: 16/2/2023	Ing. Arroba C	ESCALA: 1:50	
				APROBO: 16/2/2023	Ing. Arroba C	REGISTRO: N.º DE LAMINA 1 de 3	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	U.T.A. INGENIERIA MECANICA		SUSTITUCION:	

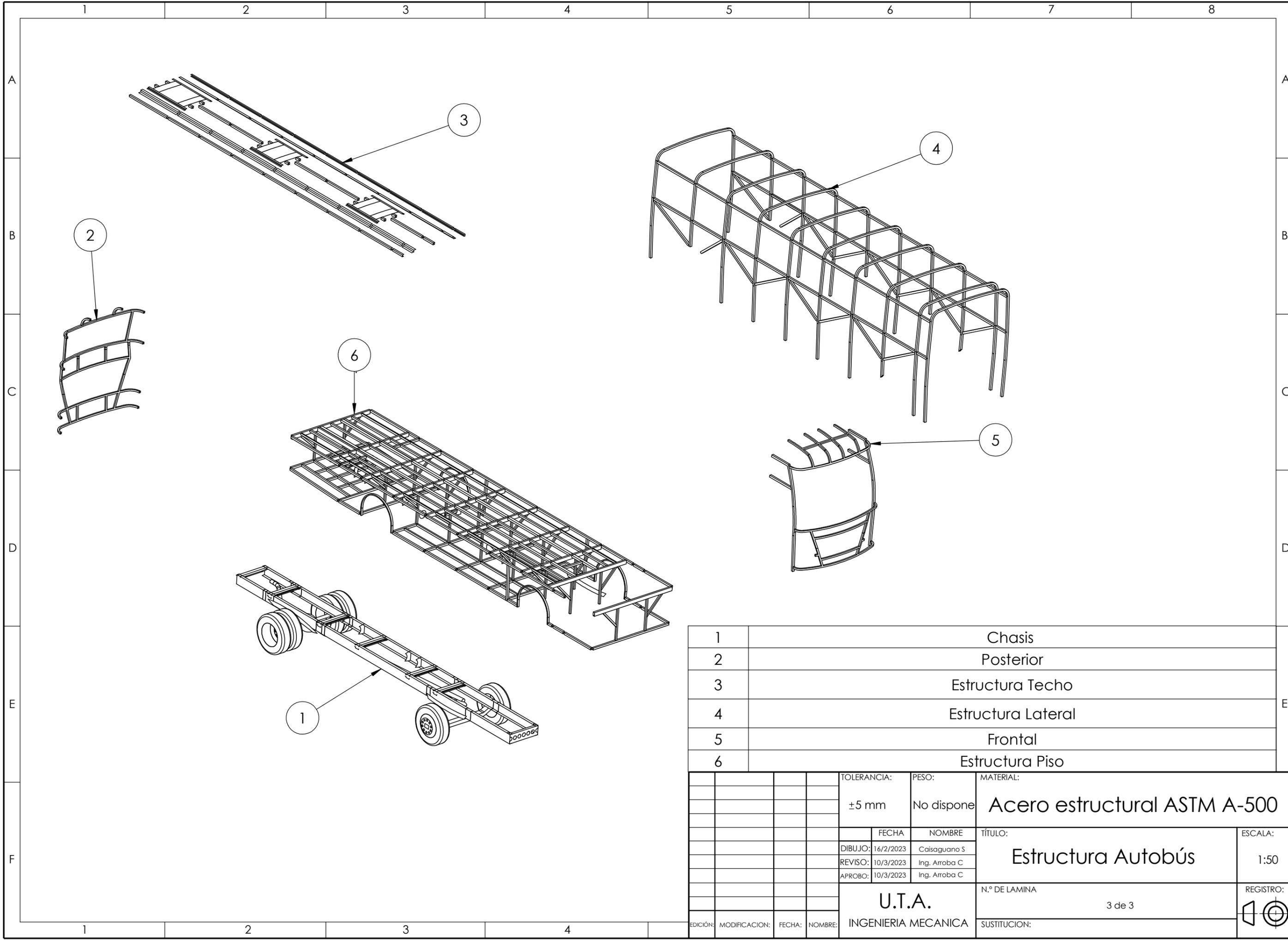


FRONTAL

RESPALDO

TOLERANCIA:		PESO:		MATERIAL:	
±5 mm		No dispone		Acero estructural ASTM A-500	
FECHA		NOMBRE		TÍTULO:	
DIBUJO: 16/2/2023		Caisaguano S		Frontal y Respaldo	
REVISO: 16/2/2023		Ing. Arroba C		ESCALA:	
APROBO: 16/2/2023		Ing. Arroba C		1:20	
U.T.A.				N.º DE LAMINA	
INGENIERIA MECANICA				2 de 3	
EDICIÓN:		MODIFICACION:		SUSTITUCION:	
FECHA:		NOMBRE:		REGISTRO:	





1	Chasis
2	Posterior
3	Estructura Techo
4	Estructura Lateral
5	Frontal
6	Estructura Piso

TOLERANCIA:		PESO:		MATERIAL:	
±5 mm		No dispone		Acero estructural ASTM A-500	
FECHA:		NOMBRE:		TÍTULO:	
DIBUJO: 16/2/2023		Caisaguano S		Estructura Autobús	
REVISO: 10/3/2023		Ing. Arroba C		ESCALA:	
APROBO: 10/3/2023		Ing. Arroba C		1:50	
U.T.A.				N.º DE LAMINA	
INGENIERIA MECANICA				3 de 3	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:	

