



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ANÁLISIS ESTRUCTURAL BASADO EN SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE UNA CARROCERÍA DE BUS INTERPROVINCIAL SOMETIDA A PRUEBA DE VOLTEO PARA DETERMINAR LA GEOMETRÍA Y MATERIALES APLICABLES QUE GARANTICEN LA SEGURIDAD DE LOS PASAJEROS

AUTOR: JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PROAÑO

DIRECTOR: ING. STALIN MENA

2016





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVO GENERAL:

Analizar estructuralmente una carrocería de bus interprovincial sometida a pruebas de volteo basado en simulación por el método de elementos finitos para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Obtener la información teórica para el desarrollo del proyecto de investigación.
- Analizar las Normas Técnicas de Estándares Nacionales e Internacionales para la simulación virtual de pruebas volteo de una carrocería de un bus.
- Ejecutar un modelo en 3D de la geometría de la carrocería de un bus tipo Interprovincial en un sistema CAE (ANSYS Versión Demo), con ayuda de los planos facilitados por la empresa CARROCERÍAS PERES.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Configurar y ejecutar una simulación virtual por elementos finitos con los parámetros necesarios para la prueba de volteo en el Sistema CAE.
- Obtener datos de la prueba de volteo de la simulación virtual que permitan evaluar y analizar las consideraciones de la geometría y materiales de construcción de una carrocería.
- Elaborar un informe de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la simulación para la empresa.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

HIPÓTESIS:

La geometría de la carrocería y los materiales que forman parte de la misma son afectadas al producirse un volcamiento, el método de elementos finitos permite identificar cómo se deformará esta estructura cuando se la someta a un ensayo virtual de volteo, siendo este de fenómeno uno de los que más afecta la integridad de los ocupantes en un autobús, debido a la deformación del habitáculo.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

HIPÓTESIS:

- Ningún elemento que conforma la estructura invadirá la zona de supervivencia.
- Ningún elemento que conforma la estructura saldrá proyectada hacia la zona de supervivencia.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR:

La terminología “simulación computacional” se ha vuelto muy popular en las aplicaciones ingenieriles actuales, llegando a representar uno de los procesos de diseño y evaluación más importantes de nuestros días en cuanto a investigación y aplicación se refiere, en consecuencia en los últimos tiempos han emergido muchos trabajos dedicados a estas teorías, técnicas y aplicaciones de simulación (Shen R. & Lei, 2012).





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR:

En el sector automotriz en particular la aplicación del método explícito de elementos finitos ha tenido gran acogida, por el hecho de que el ingeniero pueda poner en práctica ideas innovadoras en el ramo, que previamente sean evaluadas por un software reduciendo en gran medida el coste económico de realizar demasiados prototipos de prueba.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ELEMENTOS TIPO SHELL:

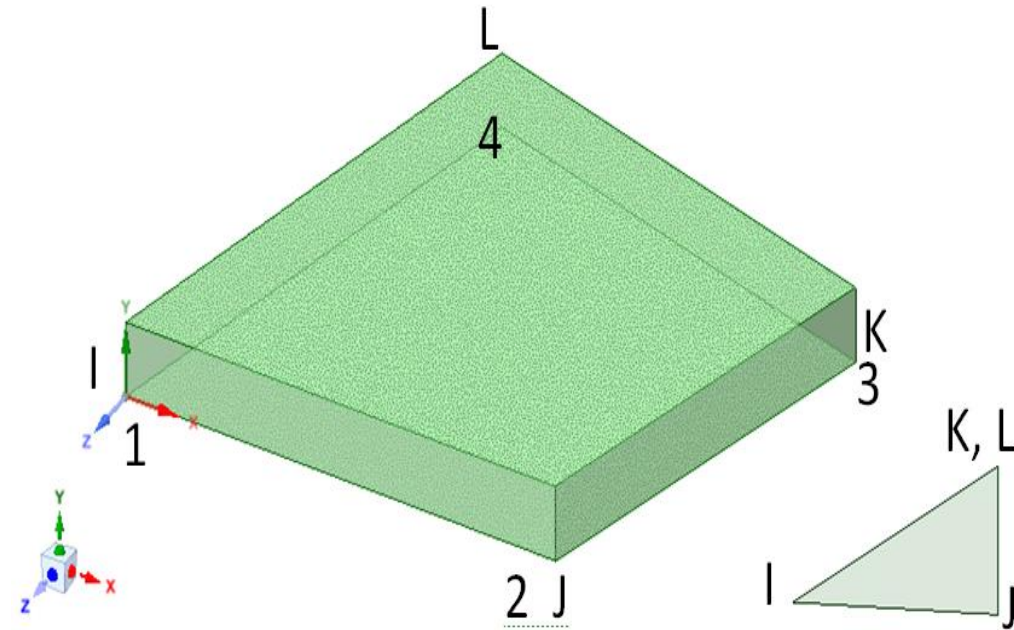
- ✓ Modelo matemático de dos dimensiones configurado para caracterizar el comportamiento paredes tridimensionales.
- ✓ Son ideales para caracterizar estructuras de paredes delgadas a moderadamente gruesas.
- ✓ Obtiene resultados satisfactorios al analizar estructuras sometidas a flexión y deformación.
- ✓ Espesor integrado a los cálculos a modo de constante, lo cual reduce el tiempo de cómputo, es decir reduce el gasto computacional (© 2015 ANSYS, Inc., 2014).





ELEMENTOS TIPO SHELL:

- ✓ Pueden ser aplicados a superficies complejas.
- ✓ Se debe modelar apropiadamente para evitar el Hourglassing.
- ✓ Shell (163) para dinámica explícita, 4 nodos, 12 grados de libertad (© 2015 ANSYS, Inc., 2014).



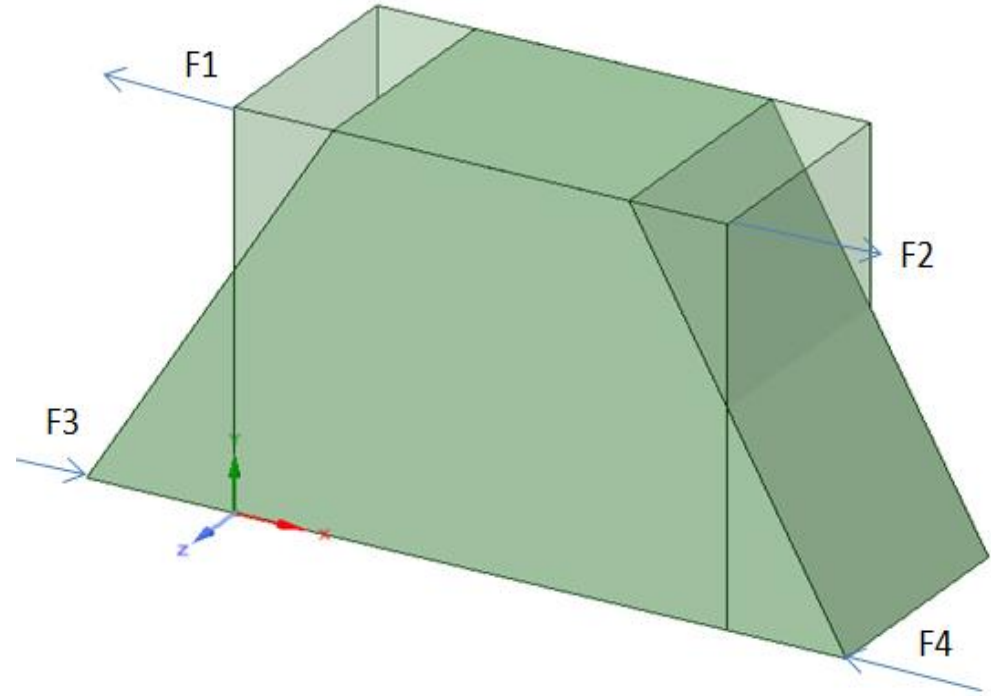


ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

HOURGLASSING:

- ✓ Shell son propensos a modos de energía cero.
- ✓ Modifica la malla a manera de zigzag.
- ✓ Aunque presentan rigidez despreciable, tienden a concentrar esfuerzos.
- ✓ Según la cantidad puede invalidar el estudio.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

FORMULACIÓN FLANAGAN BELYTSCHKO STIFFNESS:

- ✓ Es recomendada para problemas de velocidad baja que provocan grande deformaciones, incluyendo simulaciones de choques.
- ✓ Las formas de Stiffness pueden endurecer artificialmente los resultados de la simulación.
- ✓ Reducir el coeficiente de reloj de arena, por ejemplo de 0,1 a 0,03, se puede minimizar el efecto de rigidez (© 2015 ANSYS, Inc., 2014)..





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PROCEDIMIENTO GENERAL DEL MÉTODO EXPLÍCITO DE ELEMENTOS FINITOS:

- ✓ Pre proceso.
- ✓ Solución.
- ✓ Pos proceso.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PREPROCESO:

- ✓ Definir el dominio geométrico del problema.
- ✓ Definir el tipo de elemento a ser usado.
- ✓ Definir las propiedades de los materiales de los elementos.
- ✓ Definir las propiedades geométricas de los elementos (longitud, área, espesor, etc.,).
- ✓ Definir la conectividad de los elementos.
- ✓ Definir las restricciones físicas (condiciones de frontera).
- ✓ Definir las cargas.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SOLUCIÓN:

- ✓ Miles/millones de ecuaciones representan el sistema.
- ✓ Se almacenan las variables (memoria del computador).
- ✓ Tiempo de solución.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

POS PROCESO:

- ✓ Representa el comportamiento mediante animaciones.
- ✓ Representa los resultados requeridos mediante arreglos numéricos.





ENSAYOS DE VOLTEO SEGÚN ECE R66:

- ✓ Prueba de volteo en vehículo completo a escala real.
- ✓ Prueba de volteo usando secciones de cuerpo.
- ✓ Prueba cuasi-estática de secciones de cuerpo.
- ✓ Cálculo cuasi-estático basado en la prueba de componentes, y
- ✓ Simulación computarizada de la prueba de volteo.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SIMULACIÓN COMPUTARIZADA DE PRUEBA DE VOLTEO:

- ✓ Este último método es uno de los más utilizados actualmente.
- ✓ Evaluación completa de la superestructura.
- ✓ Se lo puede ejecutar en cualquier software que tenga esa capacidad.
- ✓ Algunos países norman la reproducción del evento en ANSYS, aunque en otros países queda a consideración del manufacturero (Huang & Xie, 2010).





LA CARROCERÍA:

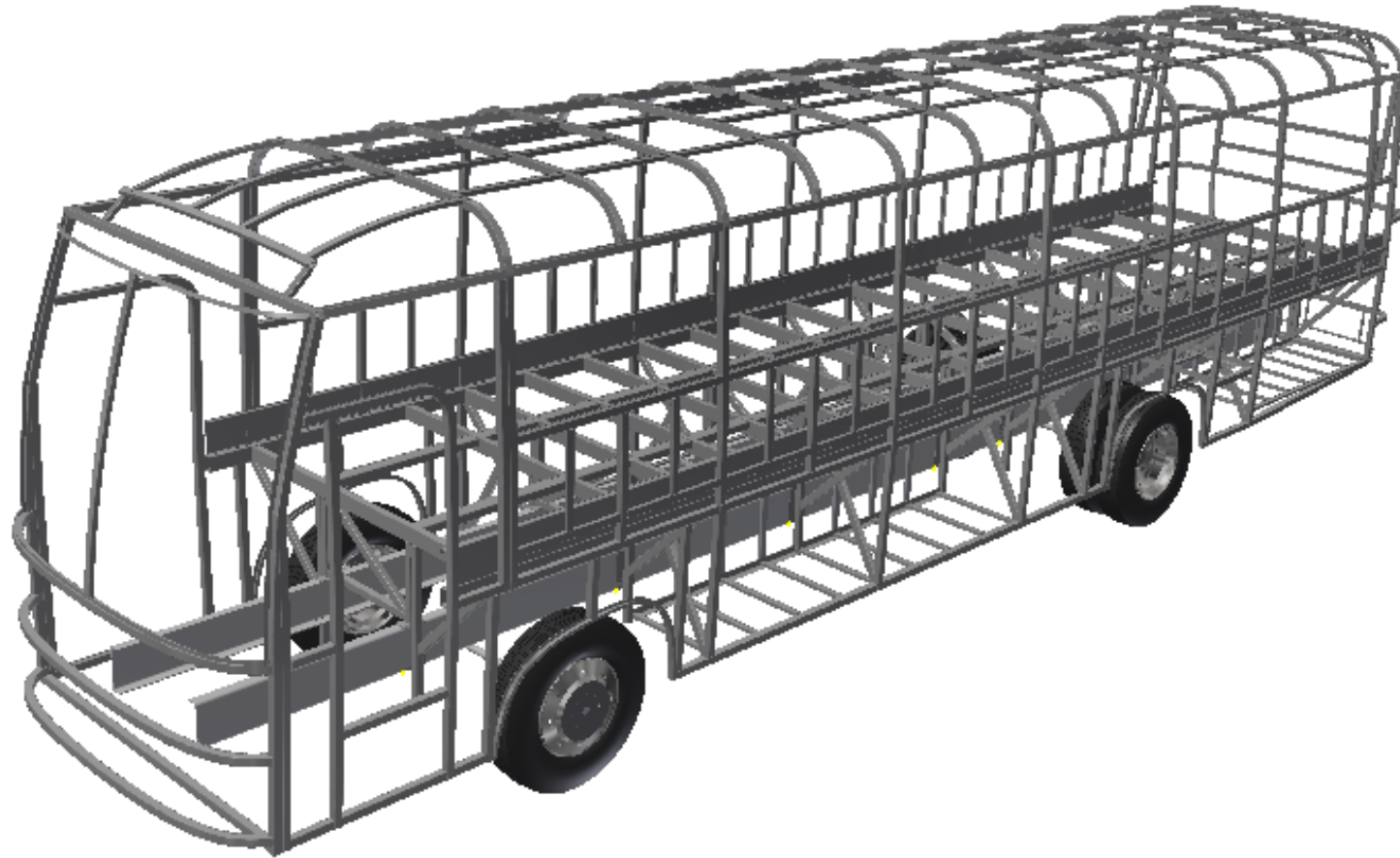
- ✓ “Conjunto de estructura, elementos de seguridad y confort que se adiciona al chasis de forma fija, para el transporte de personas.” (INEN, 2009)
- ✓ Interprovincial con capacidad para 46 pasajeros.
- ✓ Montado sobre el chasis de bus HINO AK J08EUD.
- ✓ Modelada en un software CAD.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





MATERIAL DE CONSTRUCCION DE LA CARROCERÍA:

- ✓ El acero es ampliamente utilizado por sus excelentes propiedades.
- ✓ Actualmente se ha popularizado el uso del acero ASTM A500.
- ✓ Resiste de mejor manera la corrosión.
- ✓ Propiedades mecánicas similares al ASTM A36.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Propiedades Mecánicas

ACERO ASTM A500

Módulo de elasticidad:

$E = 200 \text{ GPa}$

Módulo de elasticidad por cortante:

$G = 76.923 \text{ GPa}$

Resistencia a la fluencia:

$F_y = 320 \text{ MPa}$

Resistencia última:

$F_u = 405 \text{ MPa}$

Porcentaje de elongación:

21%-25%

Grafico de materiales usados graf esfuerzo deformación, tratamiento superficial o químico





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

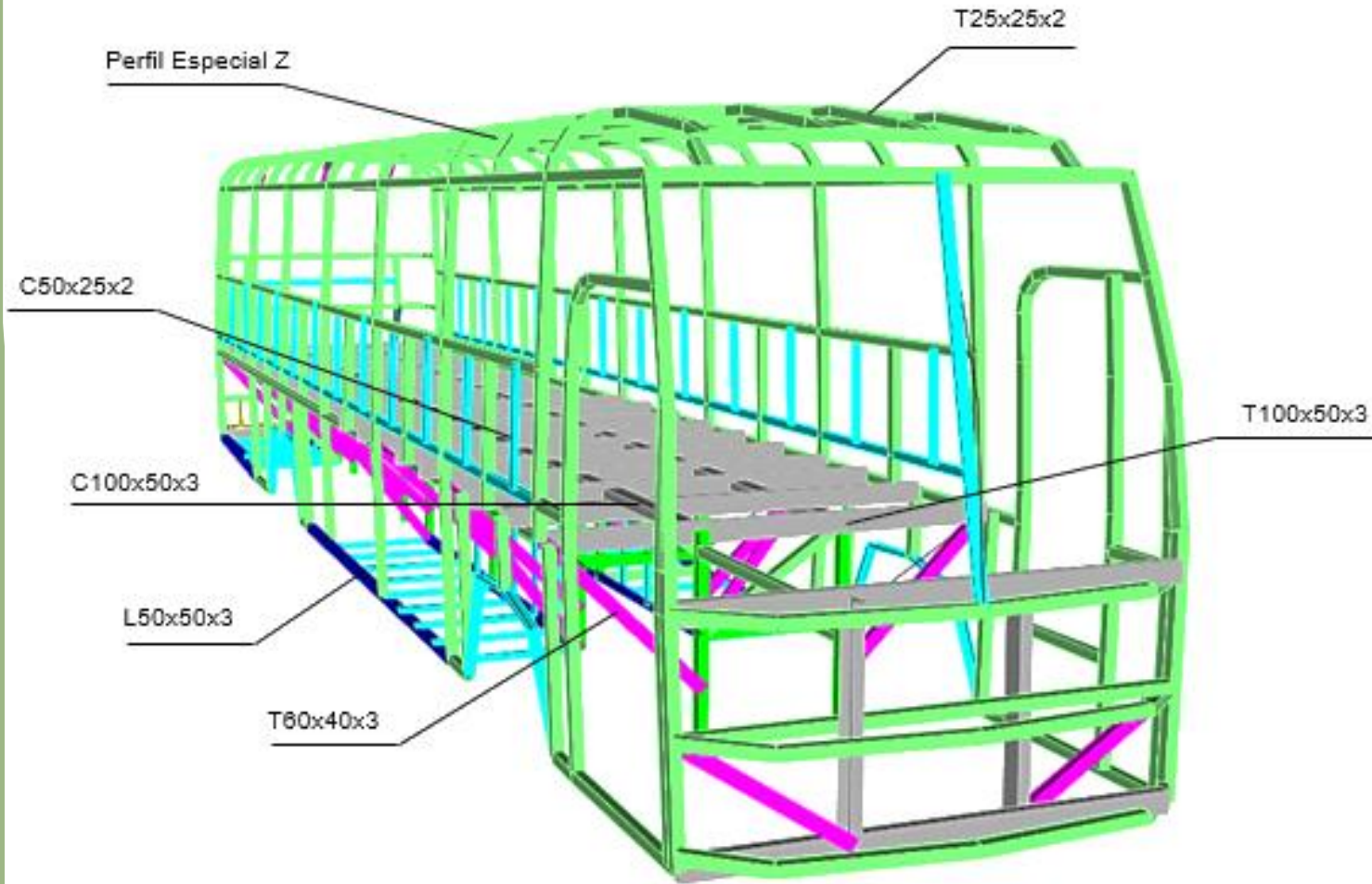
PERFILERÍA:

- ✓ La industria ofrece una amplia gama de perfiles en diferentes espesores, tratamientos térmicos y propiedades anticorrosivas.
- ✓ Son aplicadas según la utilidad en las diferentes secciones de la estructura.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PREPROCESO





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELADO:

- ✓ El modelado parte del “esqueleto”, que es un arreglo tridimensional de elementos de línea.
- ✓ El esqueleto se deriva de las mediciones realizadas a la estructura; es compatible para su aplicación en los softwares de análisis estático y dinámico.
- ✓ Se debe procurar el contacto (coincidencia) de los nodos de los elementos de línea.





MODELADO: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

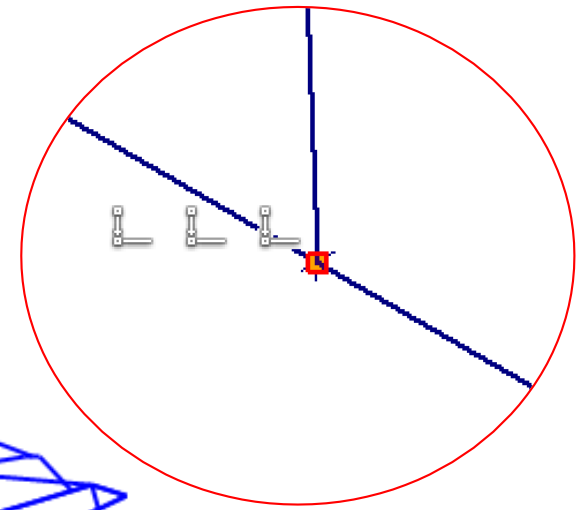
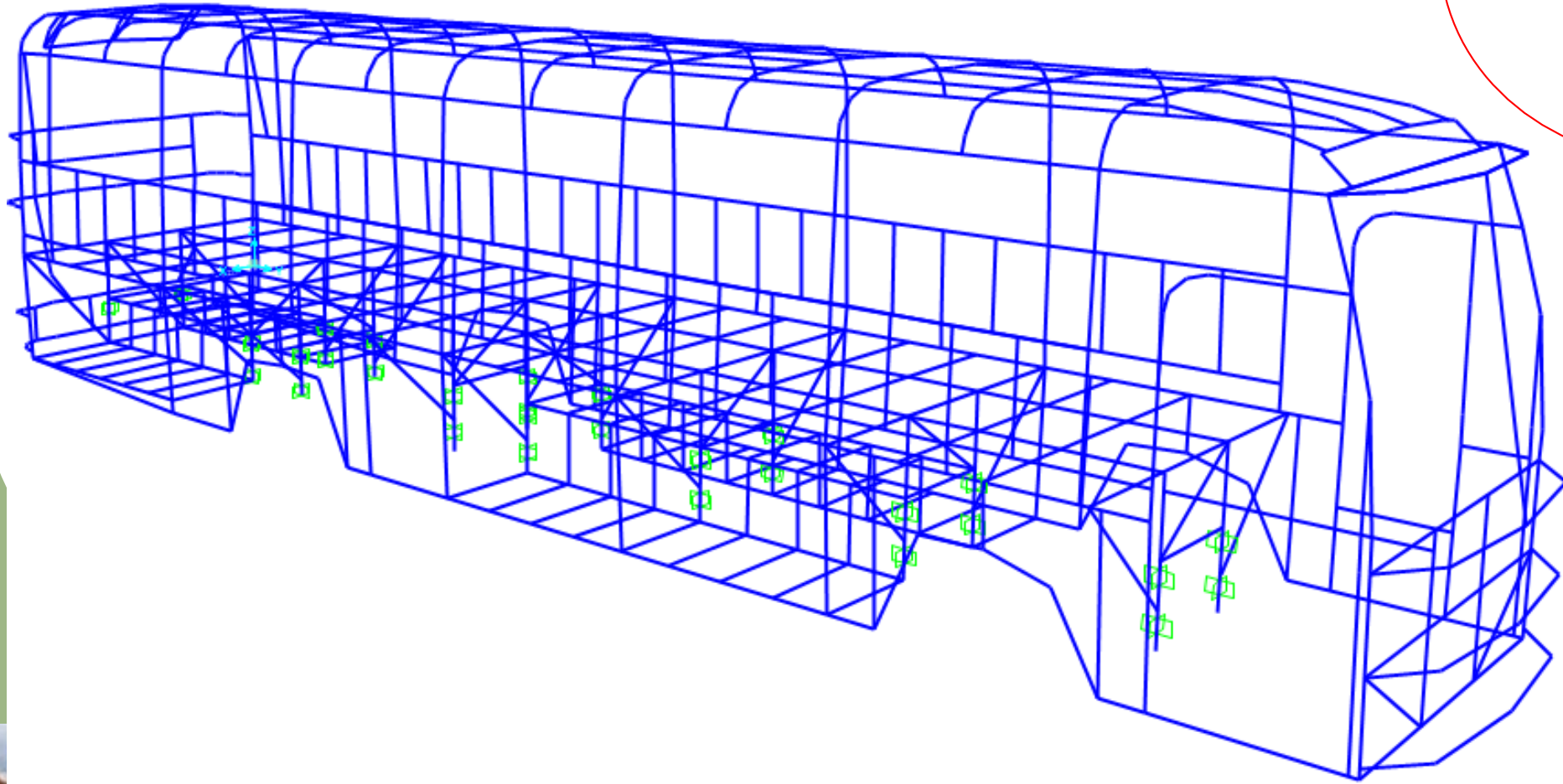
- ✓ Se debe procurar el contacto (coincidencia) de los nodos de los elementos de línea.
- ✓ El archivo admitido para la importación de la geometría es de extensión ".dxf".





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELADO: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELADO: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO

- ✓ Representar los perfiles estructurales sobre el esqueleto.
- ✓ Una buena práctica de modelado evita errores de mallado, cálculo y resultados, además de una considerable disminución del gasto computacional.
- ✓ Se debe evitar cometer errores como duplicación de superficies, espacios residuales, etc.
- ✓ La simplificación de elementos que conforman la estructura siempre y cuando no afecten a la resistencia de la estructura.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELADO: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO

Imágenes de errores de modelado

- ✓ Una vez corregidos estos errores el modelo estará listo para la integración del espacio de supervivencia.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELADO: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO





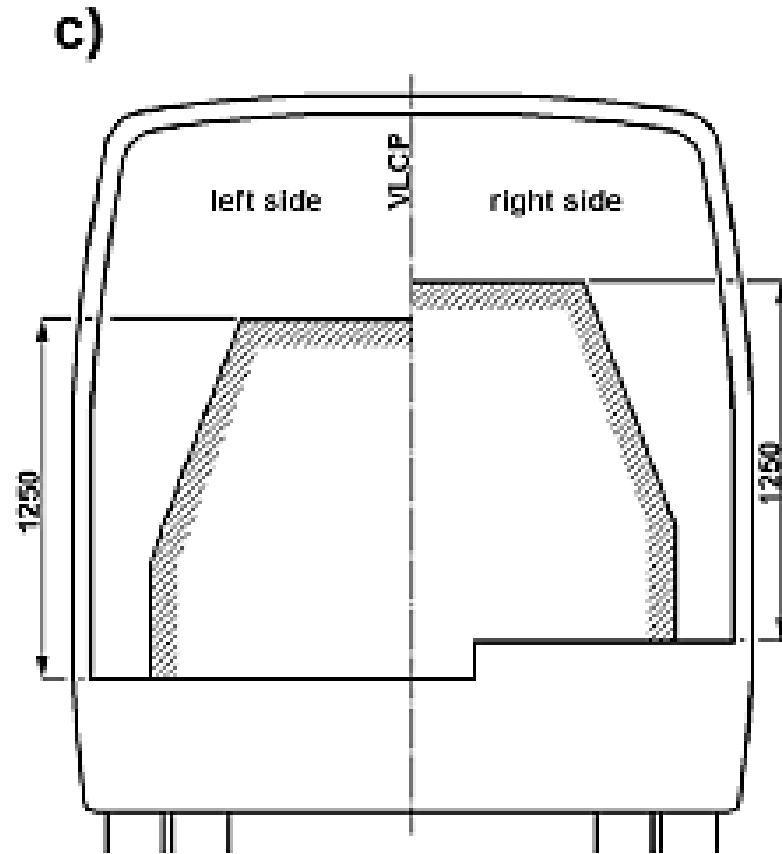
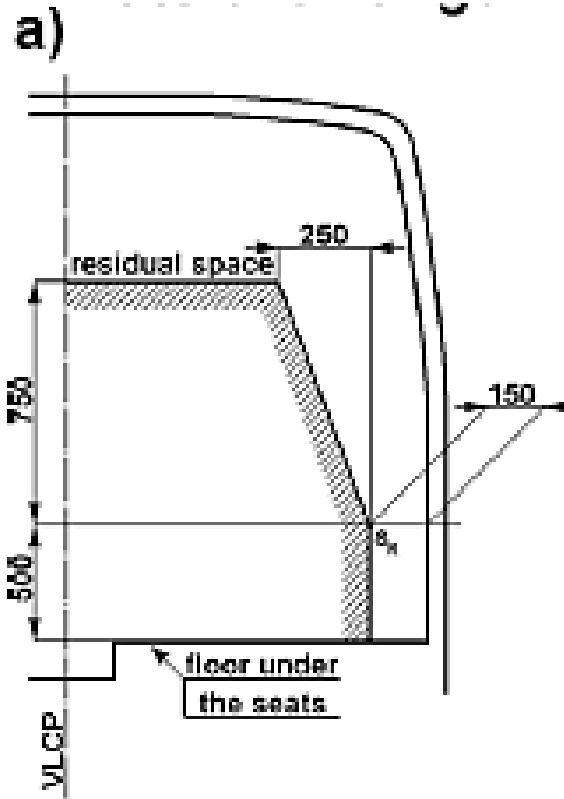
ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELADO: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO *ESPACIO DE SUPERVIVENCIA.*

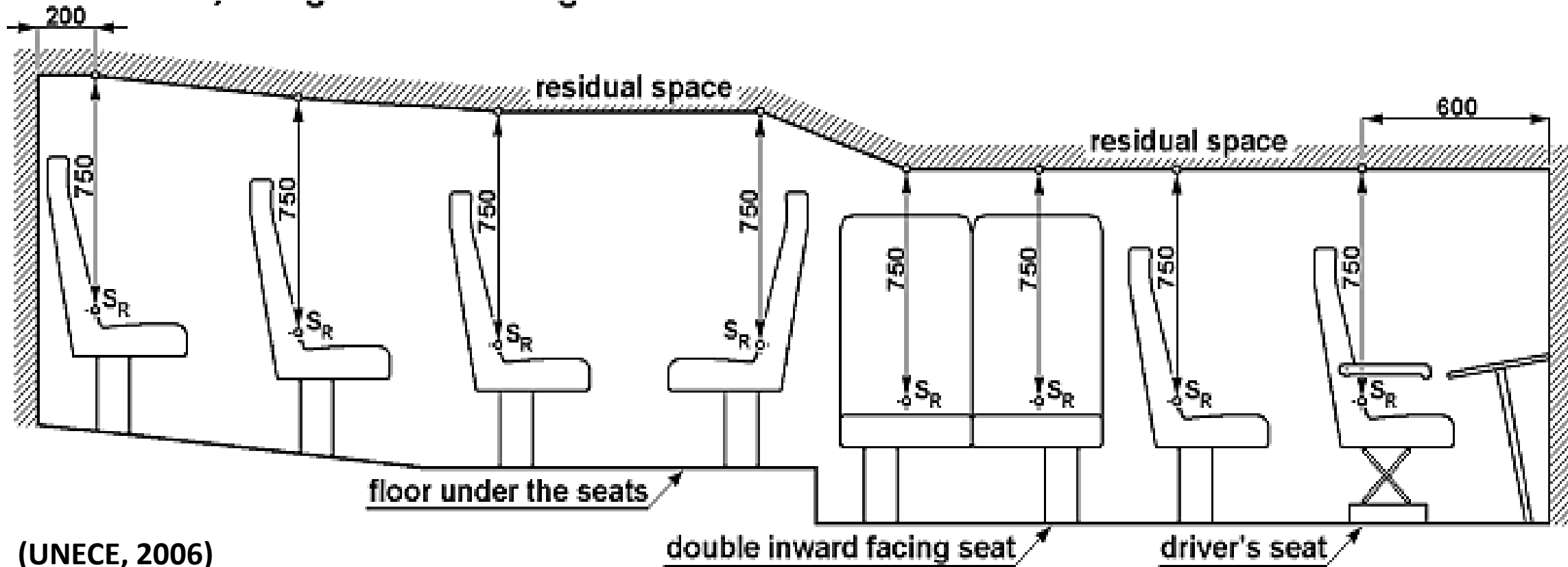
- ✓ Volumen imaginario que se ubica al interior del habitáculo (INEN NTE 1323:2009).
- ✓ Zona en la que los ocupantes podrán mantenerse a salvo en caso de un accidente.
- ✓ En un ensayo de vuelco verificar que no exista intrusión de elementos estructurales a esta zona.





(UNECE, 2006)



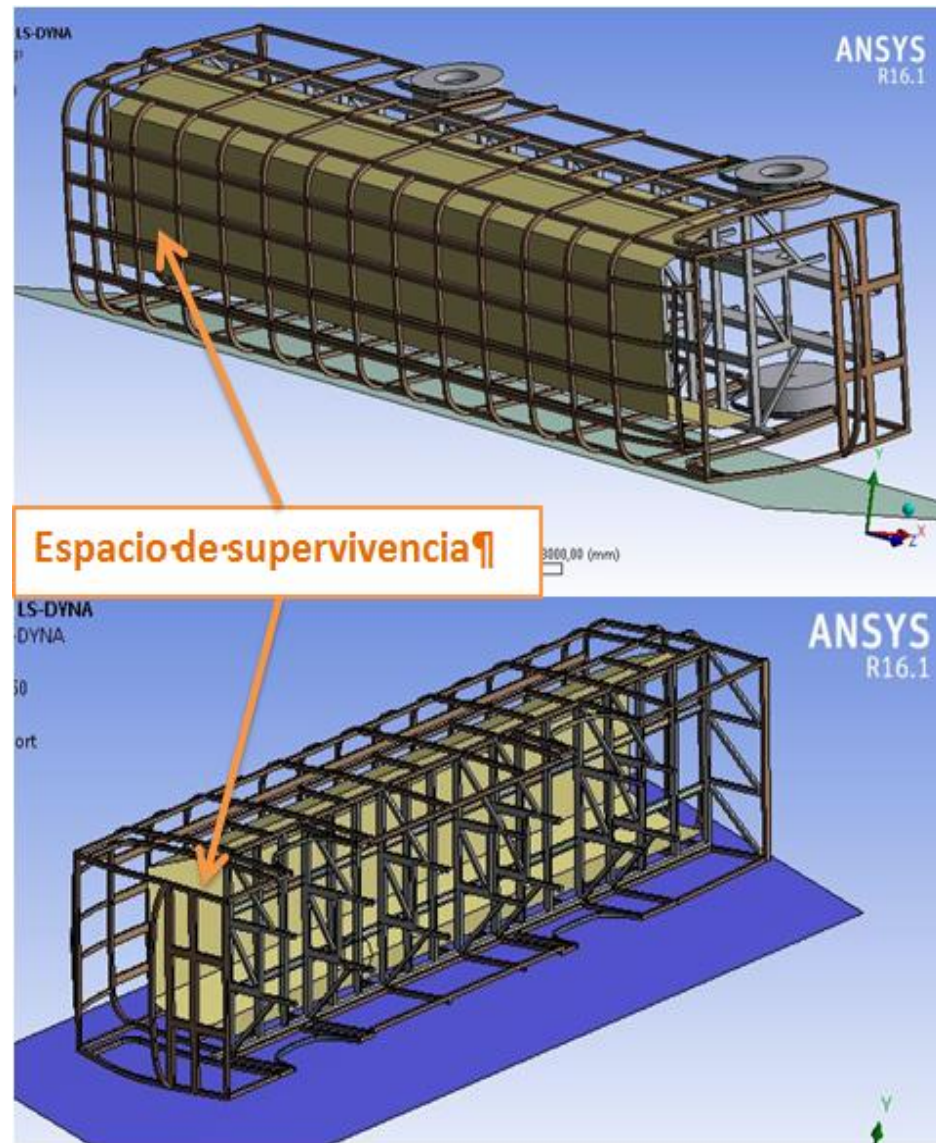


(UNECE, 2006)





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





ASIGNACIÓN DE MATERIALES:

- ✓ El material usado es el acero estructural ASTM 500.
- ✓ Se configuran los mismos parámetros tanto en el análisis estático, como en el análisis dinámico.
- ✓ En ambos estudios se configura un comportamiento no-lineal del componente.



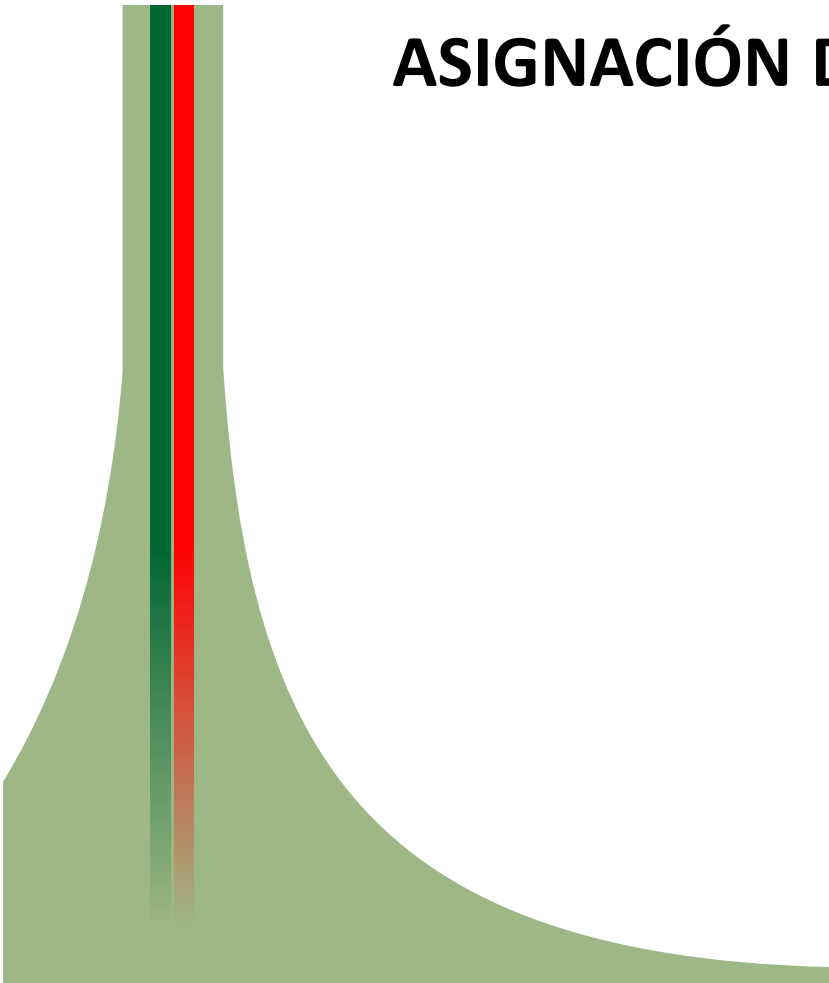


ASIGNACIÓN DE MATERIALES: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

The image shows two overlapping software windows. The left window, titled "Define Materials", displays a list of materials: 4000Psi, A416Gr270, A615Gr60, A992Fy50, and ASTM A500. The "ASTM A500" material is selected and highlighted in blue. The right window, titled "Material Property Data", shows the configuration for the selected material. It includes sections for General Data, Weight and Mass, Isotropic Property Data, and Other Properties for Steel Materials.

Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	ASTM A500
	Material Type	Steel
	Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	7,697E-05
	Mass per Unit Volume	7,849E-09
Isotropic Property Data	Modulus of Elasticity, E	199947,98
	Poisson, U	0,3
	Coefficient of Thermal Expansion, A	1,170E-05
	Shear Modulus, G	76903,07
Other Properties for Steel Materials	Minimum Yield Stress, Fy	320,
	Minimum Tensile Stress, Fu	405,
	Effective Yield Stress, Fye	320,
	Effective Tensile Stress, Fue	405,

At the bottom of the "Material Property Data" window, there is a checkbox labeled "Switch To Advanced Property Display" which is currently unchecked. Below the checkbox are "OK" and "Cancel" buttons.





ASIGNACIÓN DE MATERIALES: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO

Outline of Schematic B2: Engineering Data

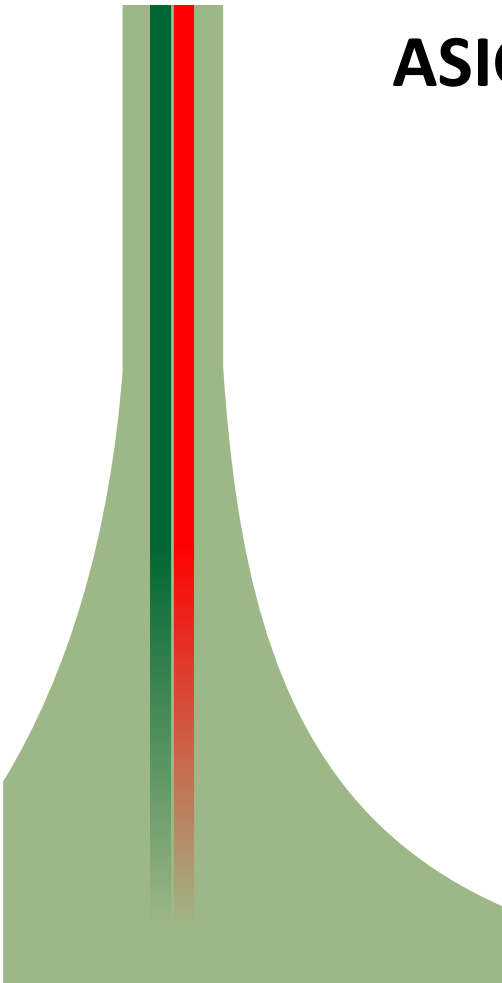
2 Material

3 Acero Negro General Materials Non-linear.xml

Ingreso de propiedades mecánicas del material

Properties of Outline Row 3: Acero Negro

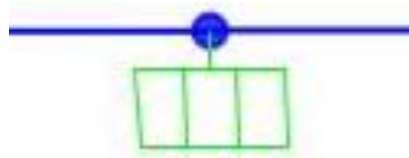
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulus and Poiss...			
5	Young's Modulus	2E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0,3			
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
9	Field Variables				
10	Temperature	Yes			
11	Shear Angle	No			
12	Degradation Factor	No			
13	Bilinear Isotropic Hardening				
14	Yield Strength	320	MPa		
15	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa		
16	Tensile Yield Strength	405	MPa		
17	Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹		





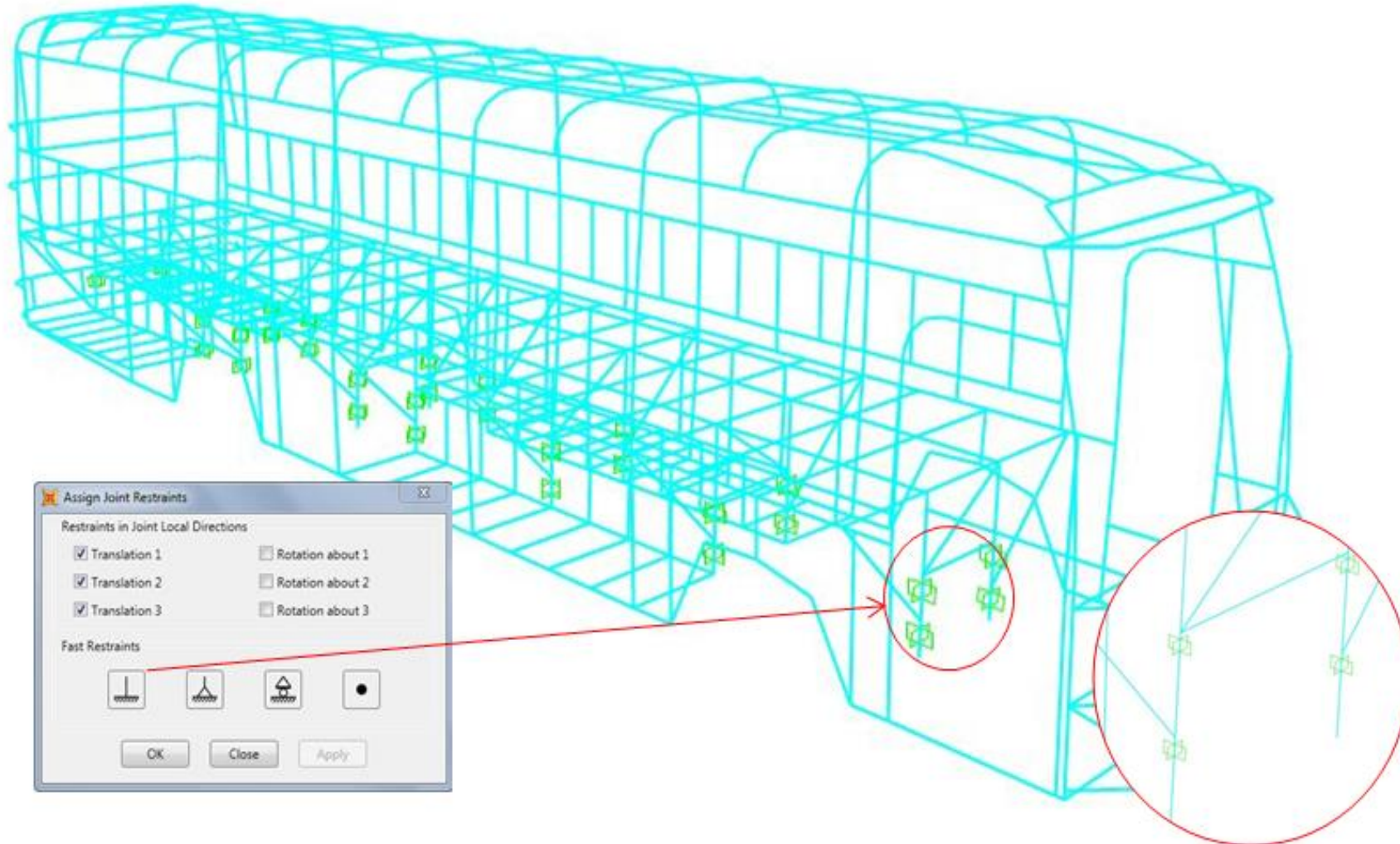
ASIGNACIÓN DE APOYOS: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

- ✓ Indispensable para estudio estático.
- ✓ Determinan las reacciones en los apoyos.
- ✓ Se ubican en las juntas con el chasis
- ✓ Son de tipo empotramiento a fin de restringir traslaciones y rotaciones





ASIGNACIÓN DE APOYOS: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ASIGNACIÓN DE CARGAS: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

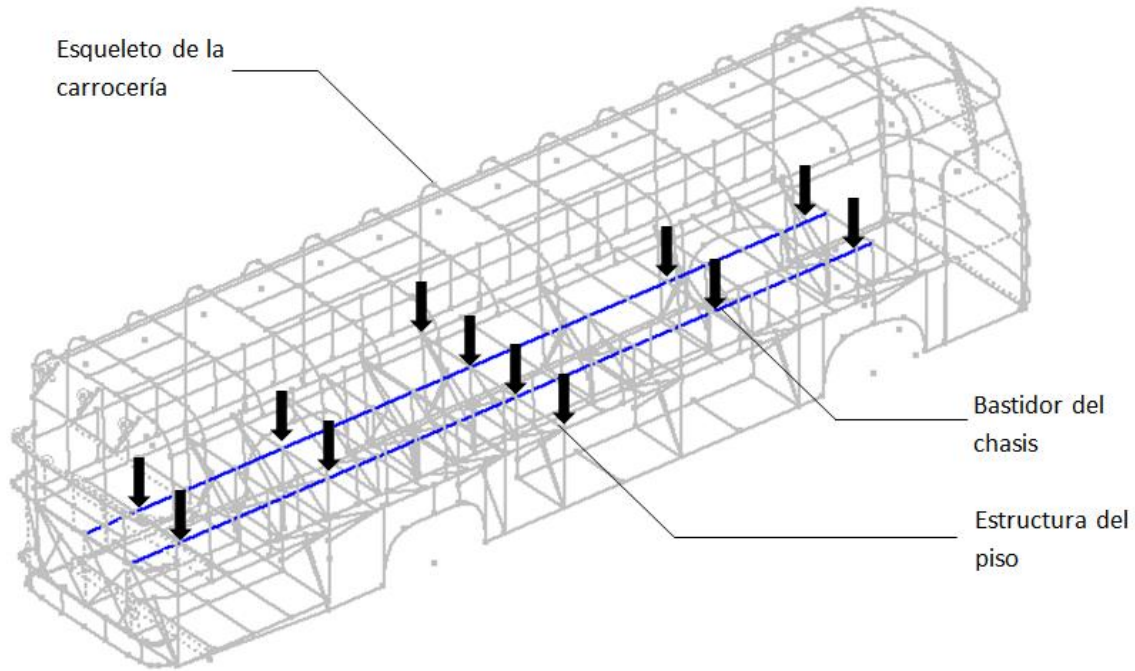
- ✓ Se ubican según la naturaleza de la carga.
- ✓ El software de análisis estático permite la aplicación de cargas en elementos de punto, o elementos de línea.
- ✓ Facilita la aplicación de cargas la agrupación de elementos.





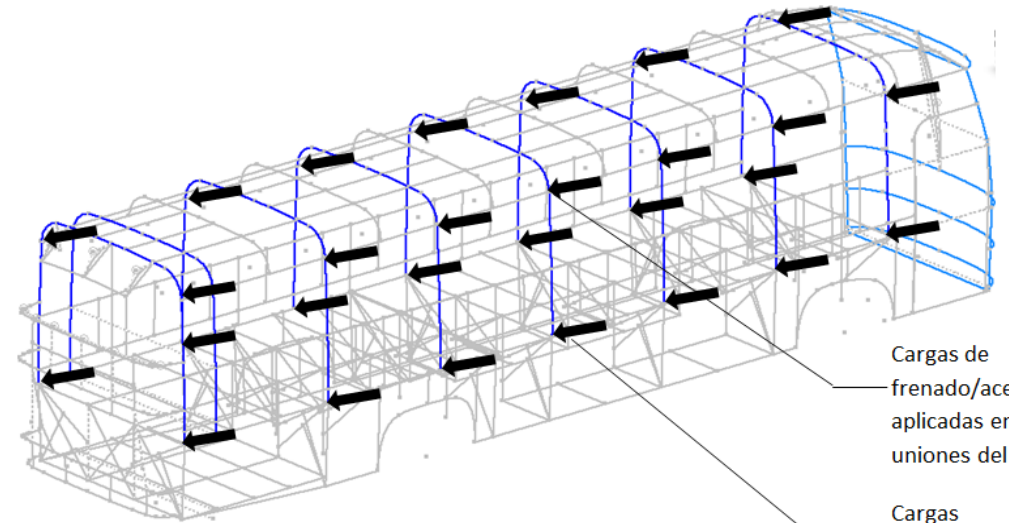
ASIGNACIÓN DE CARGAS: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

Esqueleto de la carrocería



Bastidor del chasis

Estructura del piso



Cargas de frenado/aceleración aplicadas en las uniones del techo

Cargas frenado/aceleración aplicadas en las uniones del piso





ASIGNACIÓN DE CARGAS: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

Cargas de diseño de la superestructura	
DESCRIPCIÓN	VALOR [N]
Carga viva	105741.938
Carga muerta	42530.017
Carga de frenado	67667.848
Carga de aceleración brusca	67667.848
Carga de giro	14329.653
Resistencia del aire frontal	2149.377





ASIGNACIÓN DE CARGAS: SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTÁTICO

Combinaciones de cargas método LRFD		
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR
1	1.4M+V	190568,7296
2	1.2M+1.6V+0.5G	202103,1786
3	1.2M+0.5V+1.6G	171082,7781
4	1.2M+1.6F+0.8Raf	236878,3832
5	1.2M+0.5V+0.5F+1.3Raf	184783,4476
6	1.2M+1.5Ab+0.5V	203968,1974
7	0.9M-1.3Raf	92373,5537
8	0.9M+1.3Raf	97961,9340





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

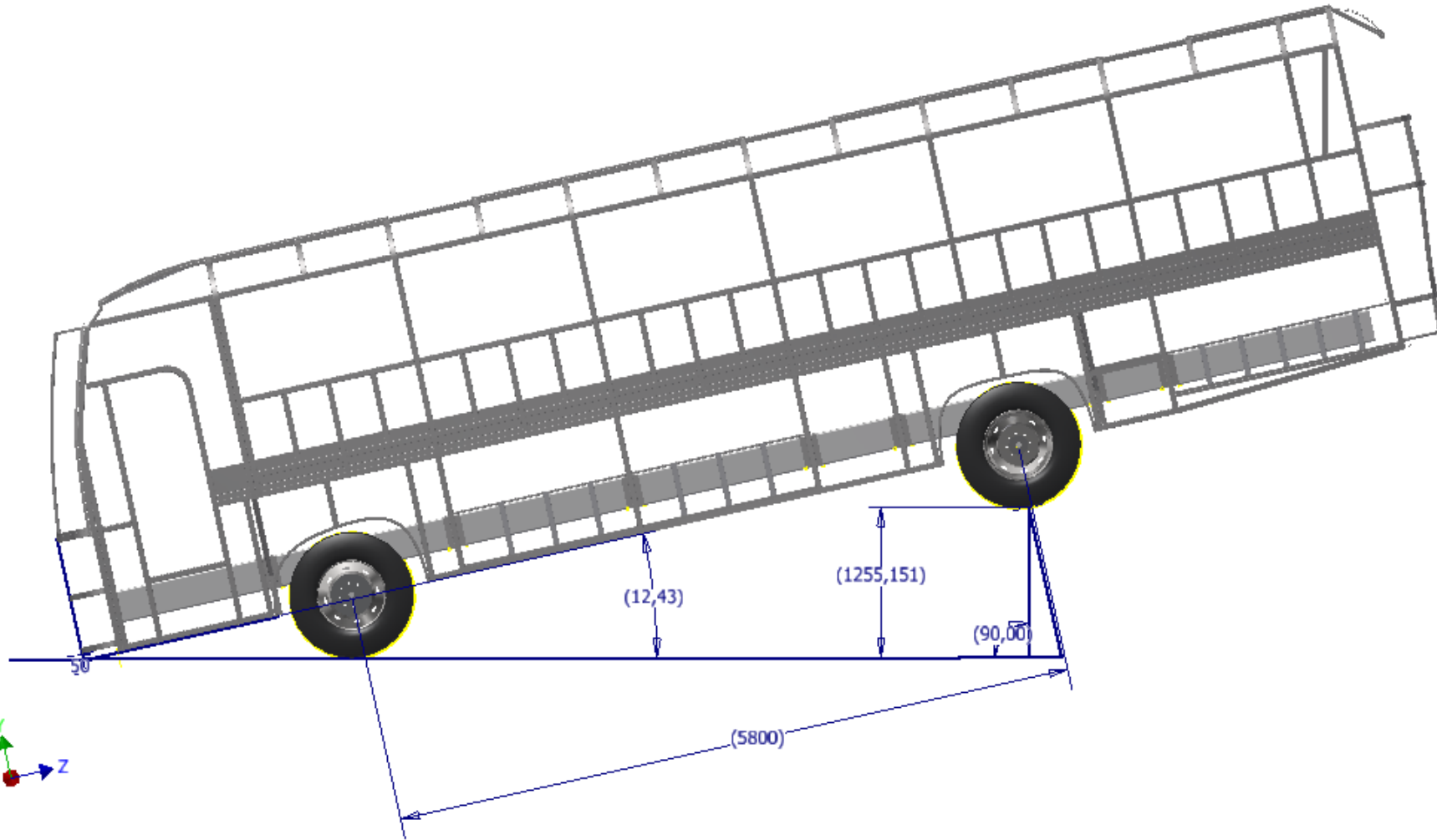
SIMULACIÓN: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO

- ✓ Se debe determinar la posición de impacto.
- ✓ Tener en cuenta el tiempo de cálculo del simulación.



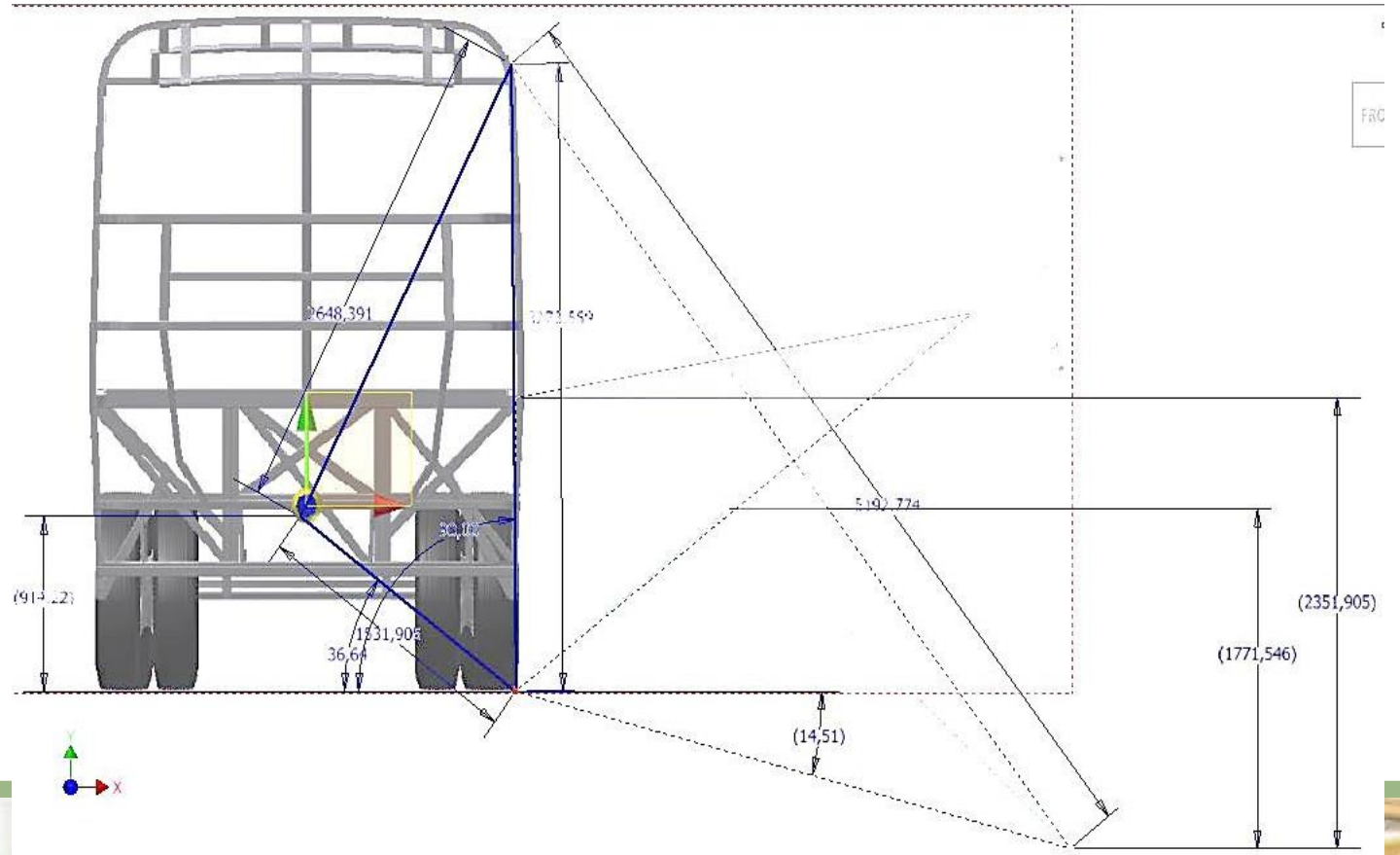


SIMULACIÓN: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO





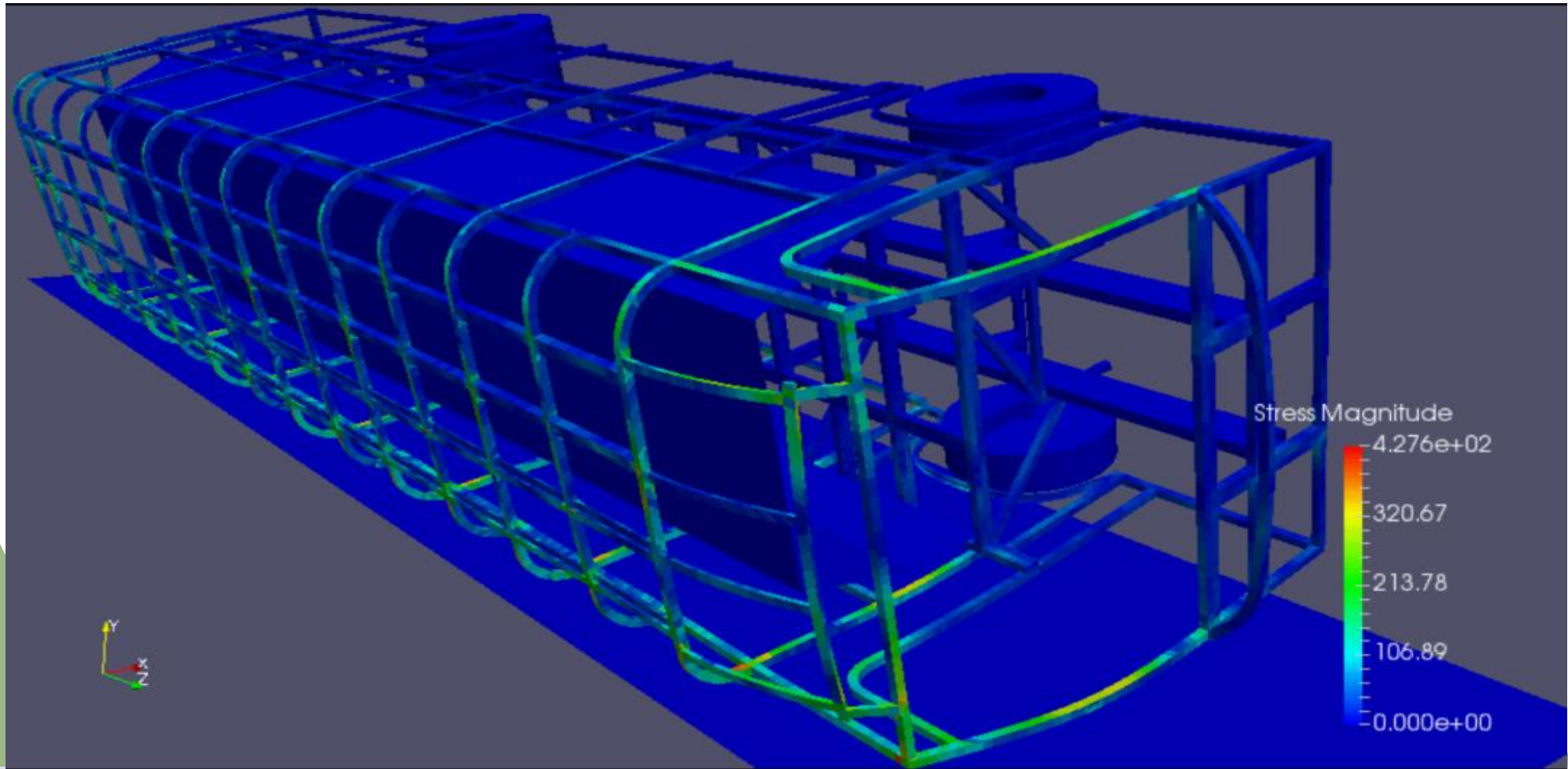
SIMULACIÓN: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO





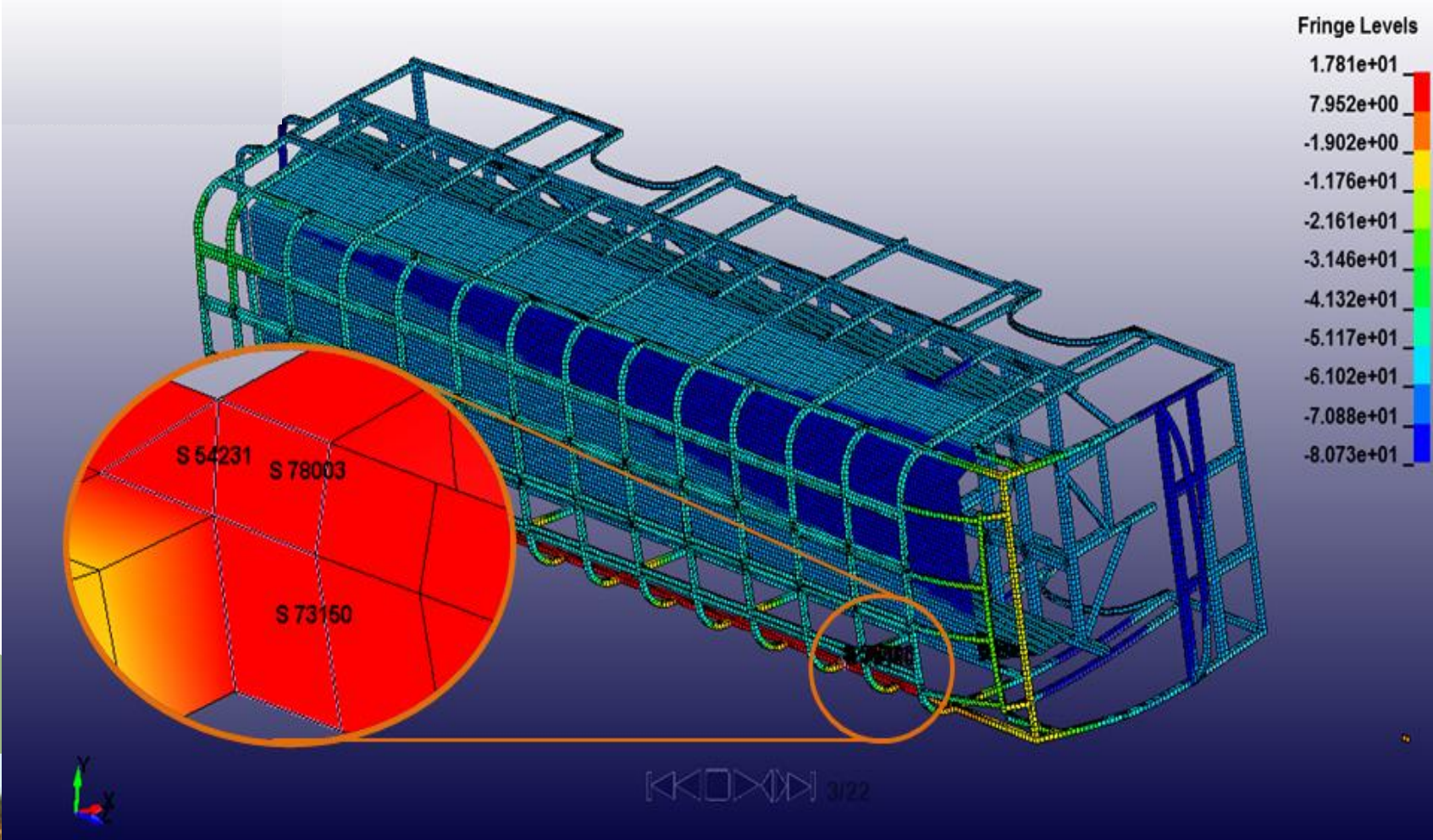
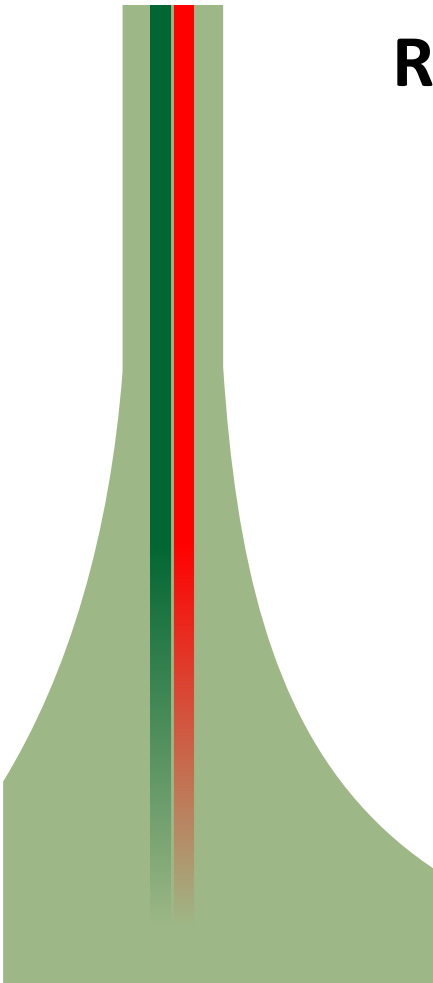
ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



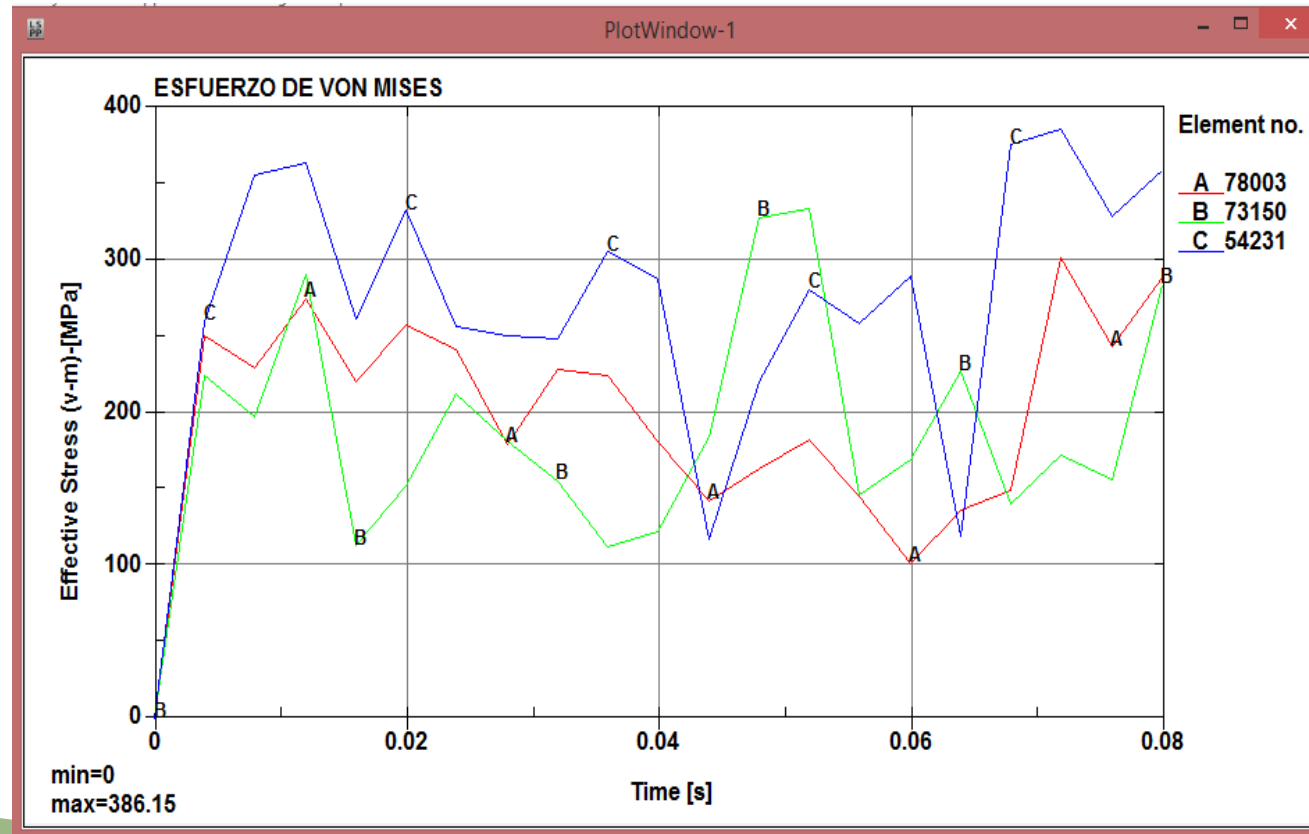


RESULTADOS: SOFTWARE DE ANÁLISIS DINÁMICO



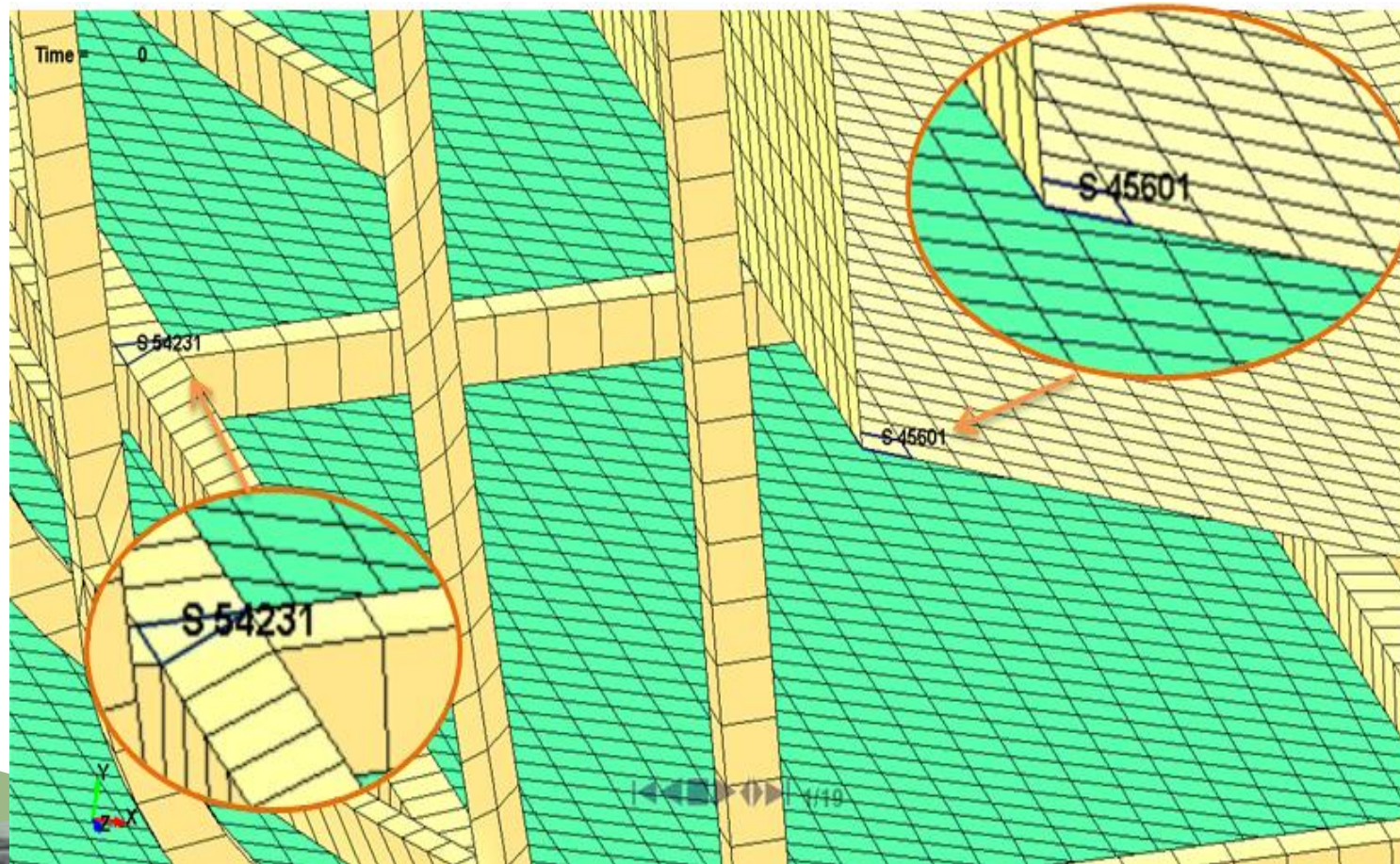


RESULTADOS: COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DISCRETOS



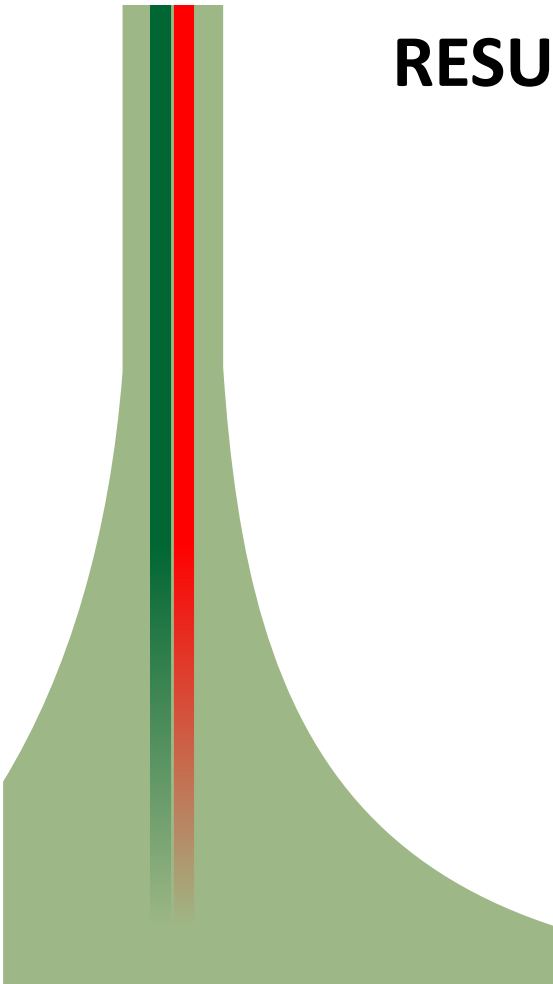
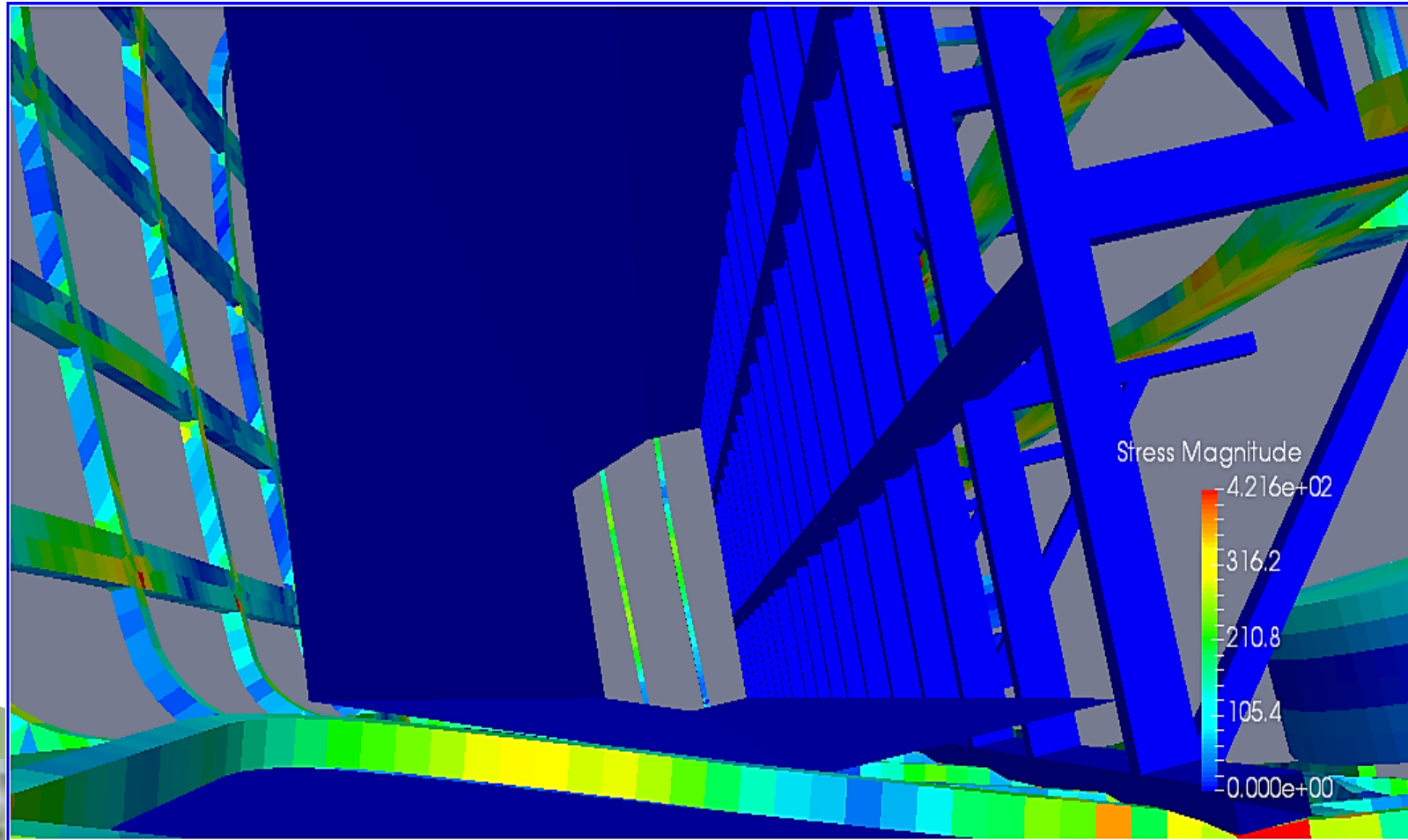


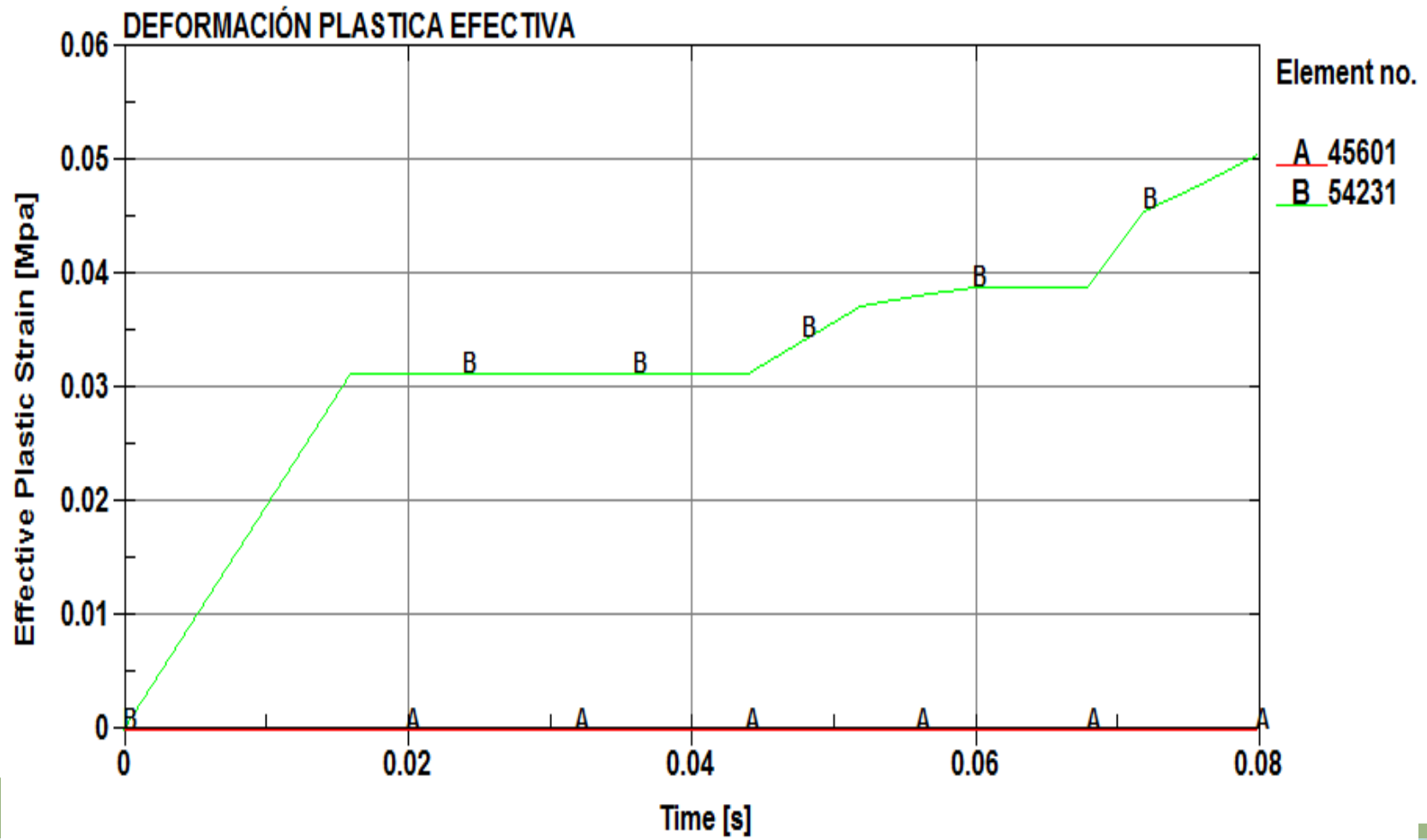
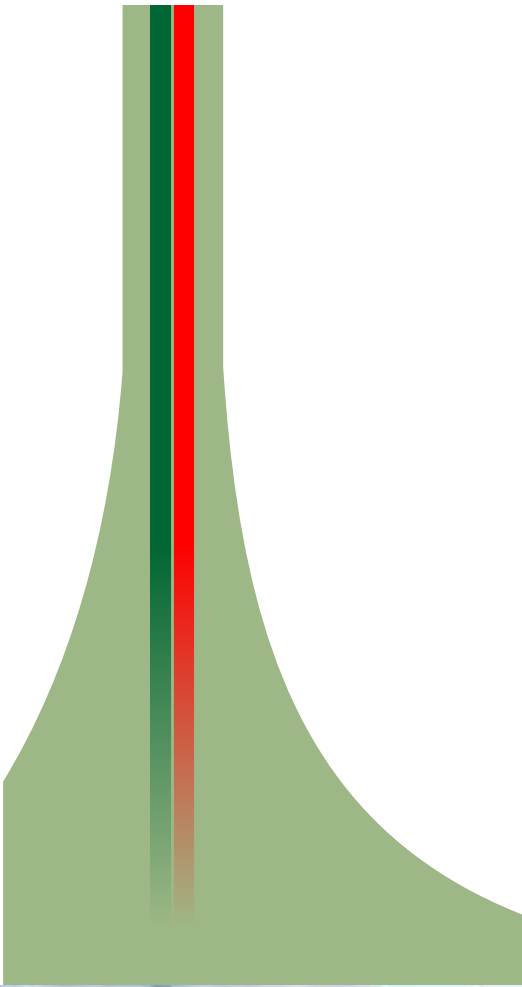
RESULTADOS: INVASIÓN DEL ESPACIO DE SUPERVIVENCIA

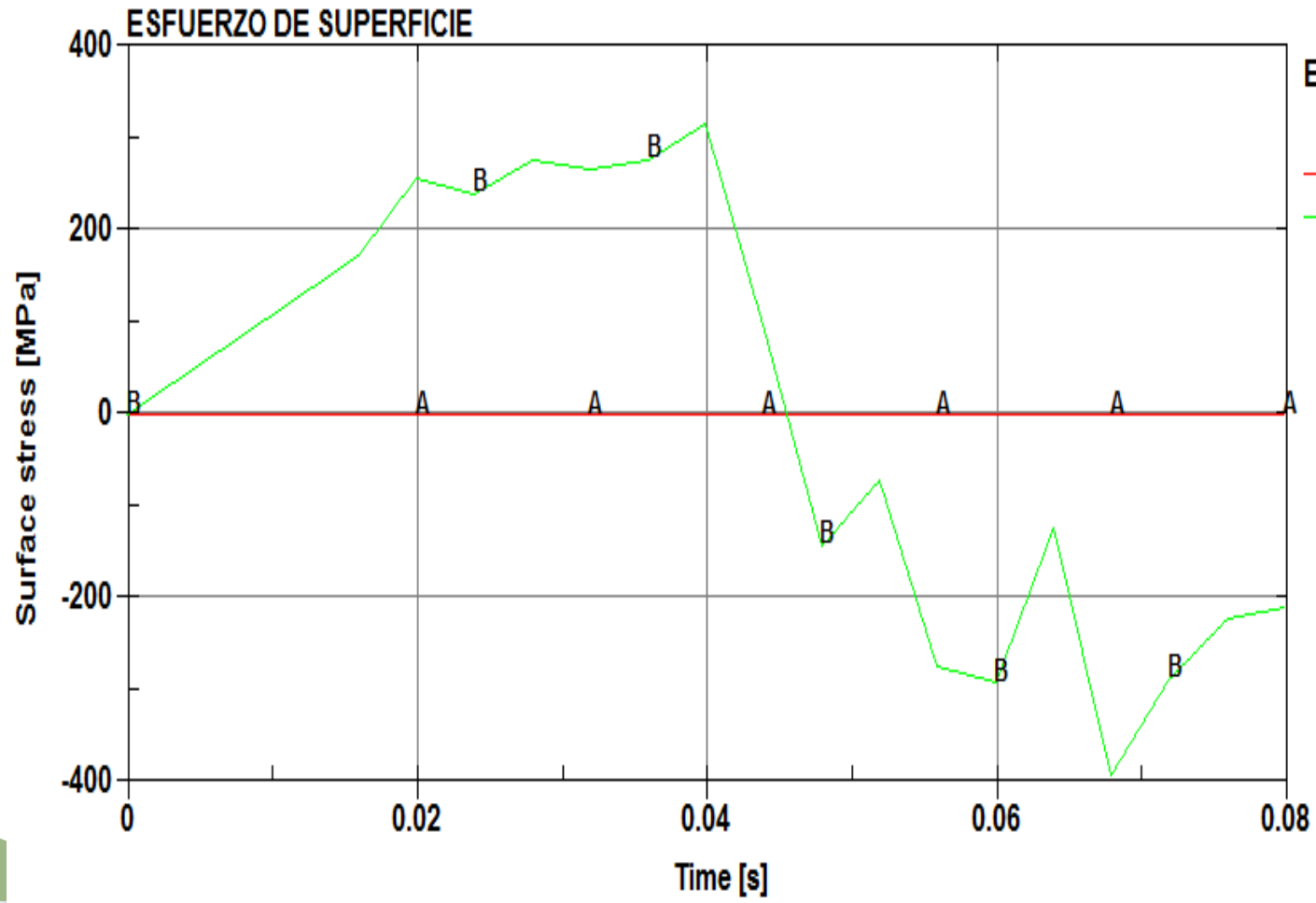
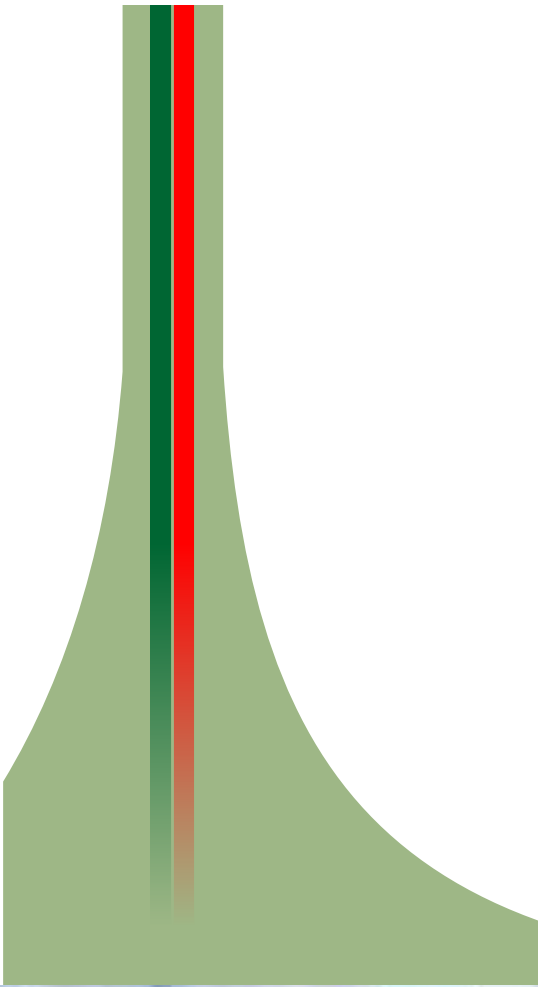




RESULTADOS: INVASIÓN DEL ESPACIO DE SUPERVIVENCIA







Element no.

A 45601

B 54231





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

1. El diseño estructural de la carrocería de bus interprovincial CP1001 cumple con los parámetros mínimos de diseño según la norma NTE INEN 1323:2009, ya que los valores referenciales de deformación no superaron los valores máximos de deformación que indica la norma.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

2. Ningún elemento que conforma la estructura invadió el espacio de supervivencia, ya que basados en los resultados del Diagrama Deformación Plástica Efectiva Vs. Tiempo se verifica que el valor de deformación plástica del elemento finito mantiene un valor constante en el tiempo de cero MPa, por lo que el espacio de supervivencia no se ve afectado por el ensayo.





CONCLUSIONES

3. El material utilizado para la construcción de la carrocería es el adecuado, ya que en el análisis de deformación se verifica que el mismo presenta una absorción apropiada de energía de impacto por su módulo de elasticidad y resistencia que le da a la estructura.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

4. El muestreo de 3 elementos finitos seleccionados por el criterio de concentración de esfuerzos de Von Mises permite la convergencia de resultados de una manera aceptable, ya que basados en los resultados de Diagrama Esfuerzo de von Mises Vs. Tiempo se visualiza que el comportamiento de éstos mantiene un patrón.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

5. La determinación de la ubicación del centro de gravedad CG, punto de impacto y el valor del peso total del autobús son los más importantes del estudio, por cuanto de ellos se derivan todos los demás parámetros y restricciones.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

6. Se verificó que la simplificación del modelo 3D, así como el buen desarrollo del modelado son directamente proporcionales a la disminución del tiempo de cálculo que requiere el SOLVER.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES

La determinación del centro de gravedad del autobús debe ser tratada con especial atención, ya que de éste se derivan los parámetros necesarios

Realizar esta simulación con otros materiales para verificar la deformación que se produce y seleccionar el más adecuado.

Realizar la validación del diseño con las demás carrocerías producidas a nivel nacional por medio de la aplicación del ensayo virtual de volteo.

