



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



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 IMPACTO LATERAL PARA DETERMINAR LA GEOMETRÍA Y MATERIALES APLICABLES QUE GARANTICEN LA SEGURIDAD DE LOS PASAJEROS

AUTOR: CARLOS ANTONIO ESMERALDAS MENESES

DIRECTOR: ING. FÉLIX J. MANJARRÉS A. MSc.

2016





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

CARROCERÍAS PERES es una empresa dedicada a la construcción y mantenimiento de carrocerías de bus tipo Urbano e Interprovincial ubicada en la provincia de Cotopaxi Cantón Latacunga, con 20 años ofertando sus servicios de manera artesanal; los requerimientos actuales para la homologación y acreditación de empresas carroceras exigen una mejora en el proceso de diseño y producción de carrocerías, motivo por el cual la empresa requiere de un estudio de sus productos para efectos de calificación.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

JUSTIFICACIÓN

El objetivo 9 del Plan Nacional del Buen Vivir: el fortalecimiento de los esquemas de formación ocupacional y capacitación necesita articularse a las necesidades del sistema de trabajo y a la productividad laboral, es necesario la práctica de nuevos métodos de evaluación de estructuras automotrices ajustándolos a los procesos productivos actuales. (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2013)





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVO GENERAL:

Analizar estructuralmente una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de impacto lateral basado en simulación por 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:

- Analizar Normas Técnicas de Estándares Nacionales para el análisis estático e Internacionales para el análisis dinámico de la carrocería.
- Efectuar un modelado en 3D de la geometría de la carrocería en un sistema CAE (ANSYS versión DEMO), con ayuda de los planos facilitados por la empresa CARROCERÍAS PERES.
- Realizar el análisis estático de la carrocería acorde a los requisitos establecidos en la Norma NTE INEN 1323:2009, mediante la ejecución de combinaciones de cargas especificadas en la misma.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Configurar y ejecutar una simulación virtual de impacto lateral por elementos finitos en un Sistema CAE.
- Obtener datos de la prueba de impacto lateral de la simulación virtual que permita evaluar y analizar las consideraciones de geometría y materiales de construcción de una carrocería.





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 una colisión lateral; el método de elementos finitos permite identificar la deformación la estructura.
- Ninguna parte del vehículo que está fuera del espacio de supervivencia al inicio del ensayo deberá invadir esta zona.
- Ninguna parte del espacio de supervivencia deberá proyectar fuera del contorno de la estructura deformada.



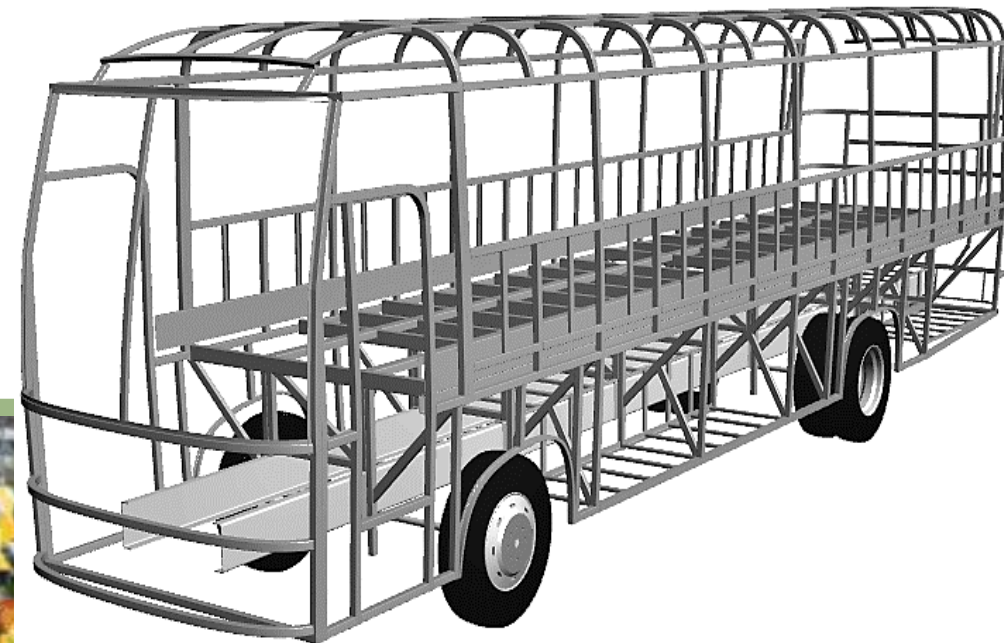


ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

LA CARROCERÍA

La carrocería del automóvil es la parte estructural en la que se encuentran los pasajeros o la carga, la cual debe soportar las fuerzas estáticas y dinámicas al estar en movimiento, poseer la resistencia y rigidez necesaria para que al momento de suscitarse un impacto brinde la máxima seguridad a los ocupantes del vehículo.





NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009)

Cargas estáticas aplicadas a la carrocería de un bus

- **Carga muerta**
Peso total de la carrocería en condiciones operativas.
- **Carga viva**
Carga externa movible sobre una estructura que actúa verticalmente.

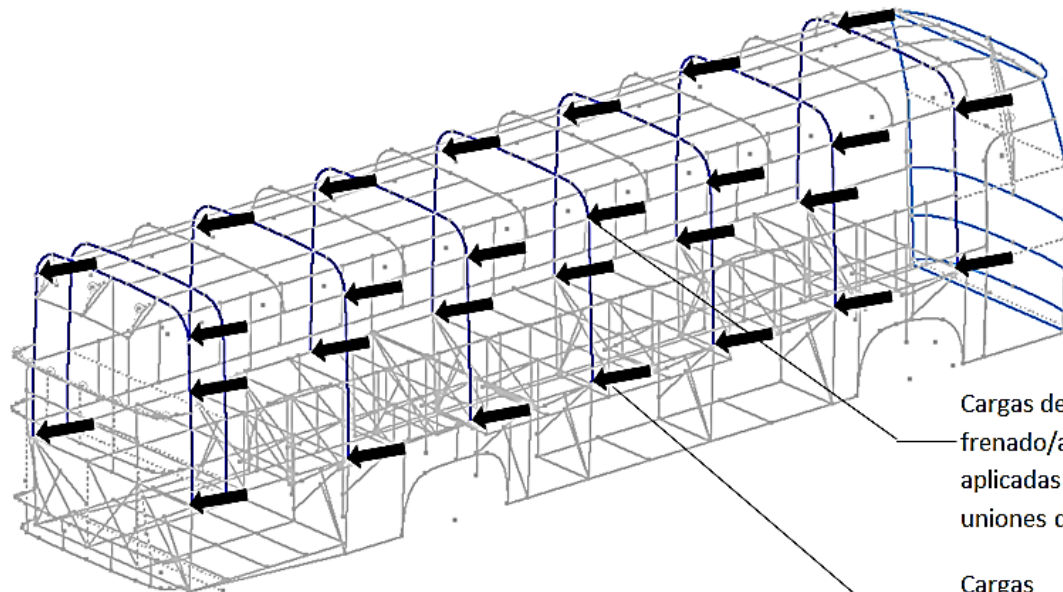




NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009)

Cargas dinámicas aplicadas a la carrocería de un bus

- Cargas de frenado y aceleración brusca



Cargas de frenado/aceleración aplicadas en las uniones del techo

Cargas frenado/aceleración aplicadas en las uniones del piso

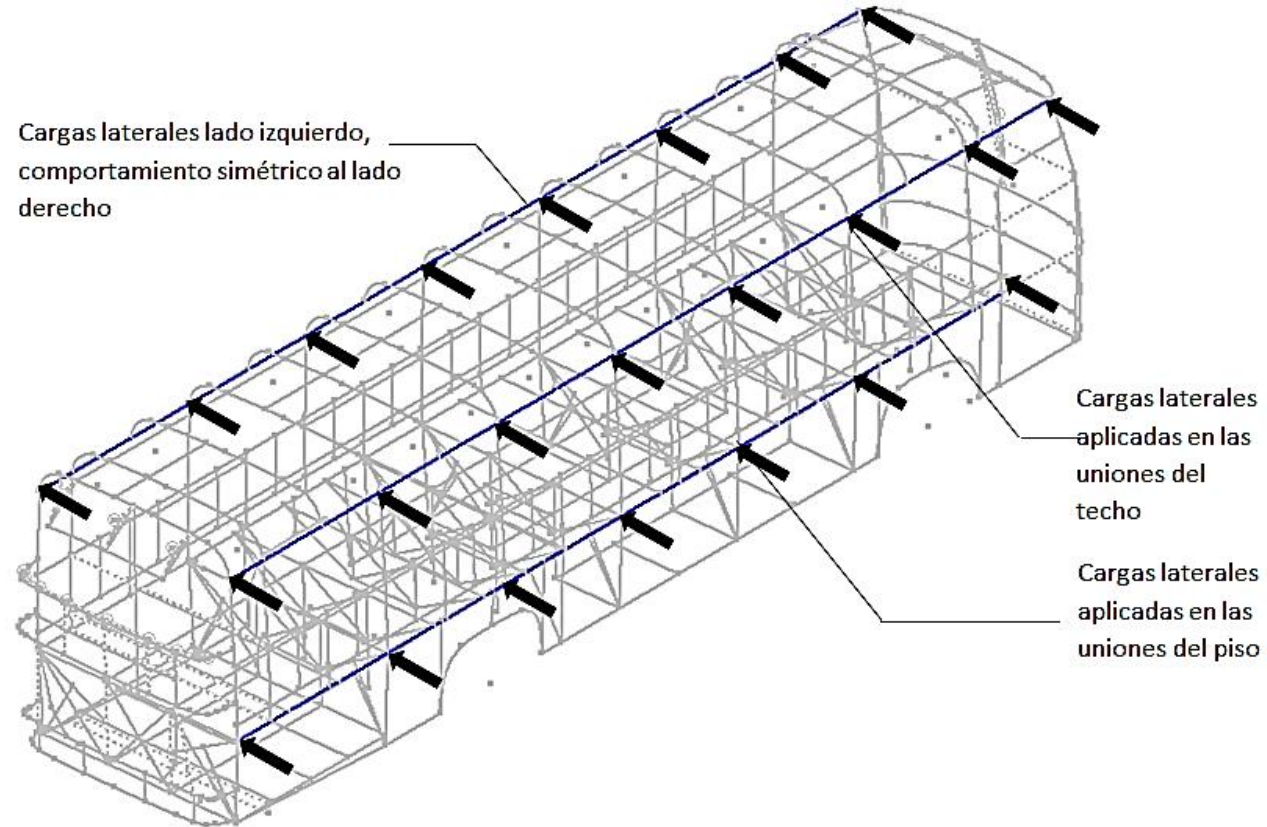




NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009)

Cargas dinámicas aplicadas a la carrocería de un bus

- **Cargas de giro**

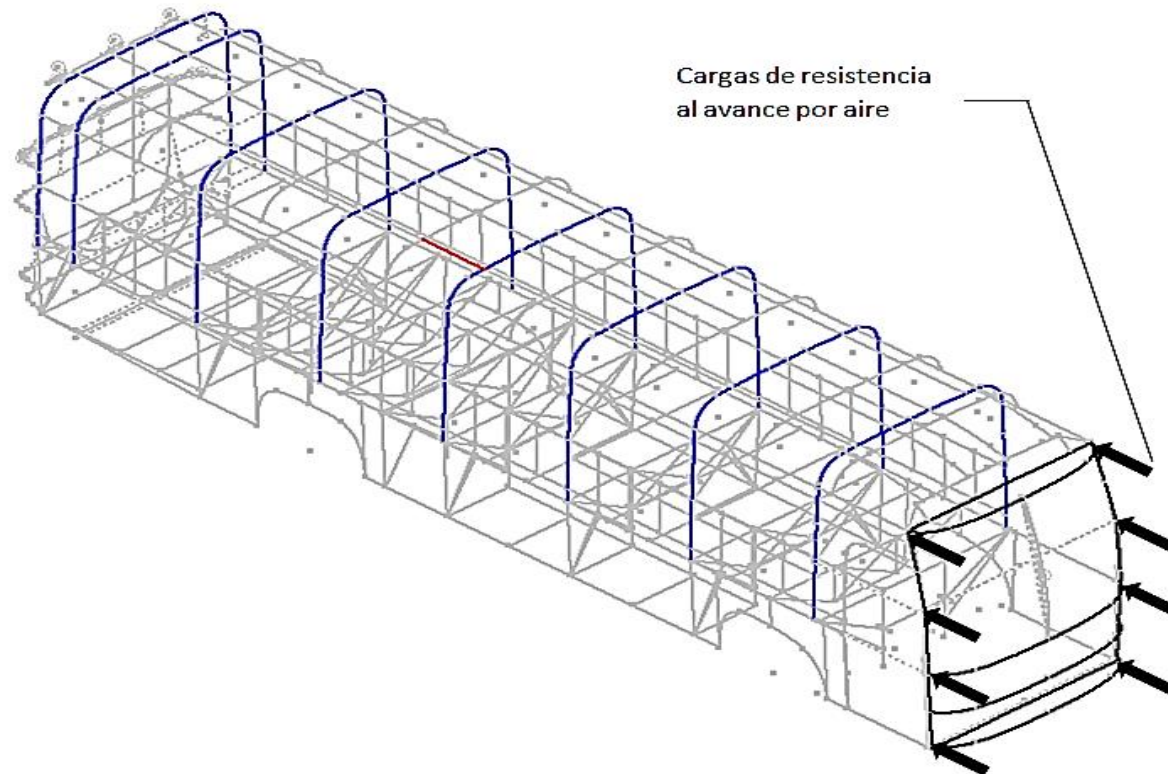




NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009)

Cargas dinámicas aplicadas a la carrocería de un bus

- Cargas por resistencia al aire frontal





NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009)

Combinaciones de cargas básicas

Método ASD (Diseño por Esfuerzo Permisible)

Se diseña de tal manera que las tensiones calculadas por efectos de las cargas de servicio no superen los valores máximos en las especificaciones.

Los elementos deben ser diseñados para comportarse elásticamente.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-ENEN 1323:2009) Combinaciones de cargas básicas

Método ASD (Diseño por Esfuerzo Permisible)

Combinaciones Método ASD

1: M

2: M + V

3: M + V + G

4: M + V + F

5: M + V + F + Raf

6: M + V + Raf

7: M + V + Ab

8: M + V + Ab + Raf

Fuente: (Norma NTE ENEN 1323, 2009)





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009) Combinaciones de cargas básicas

Método LRFD (Diseño por el Factor de Resistencia de Carga)

Basado en estados límites de confiabilidad. Emplea como criterios de análisis y diseño los de la teoría plástica o una combinación de análisis y diseño plástico.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009) Combinaciones de cargas básicas

Método LRFD (Diseño por el Factor de Resistencia de Carga)

Combinaciones Método LRFD

1: $1,4M+V$

2: $1,2M + 1,6V + 0,5G$

3: $1,2M + 0,5V + 1,6G$

4: $1,2M + 1,6F + 0,8 Raf$

5: $1,2M + 0,5 V + 0,5F + 1,3Raf$

6: $1,2M + 1,5Ab + 0,5V$

7: $0,9M - 1,3Raf$

8: $0,9M + 1,3Raf$

Fuente: (Norma NTE INEN 1323, 2009)





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE-INEN 1323:2009)

Resistencia de la estructura

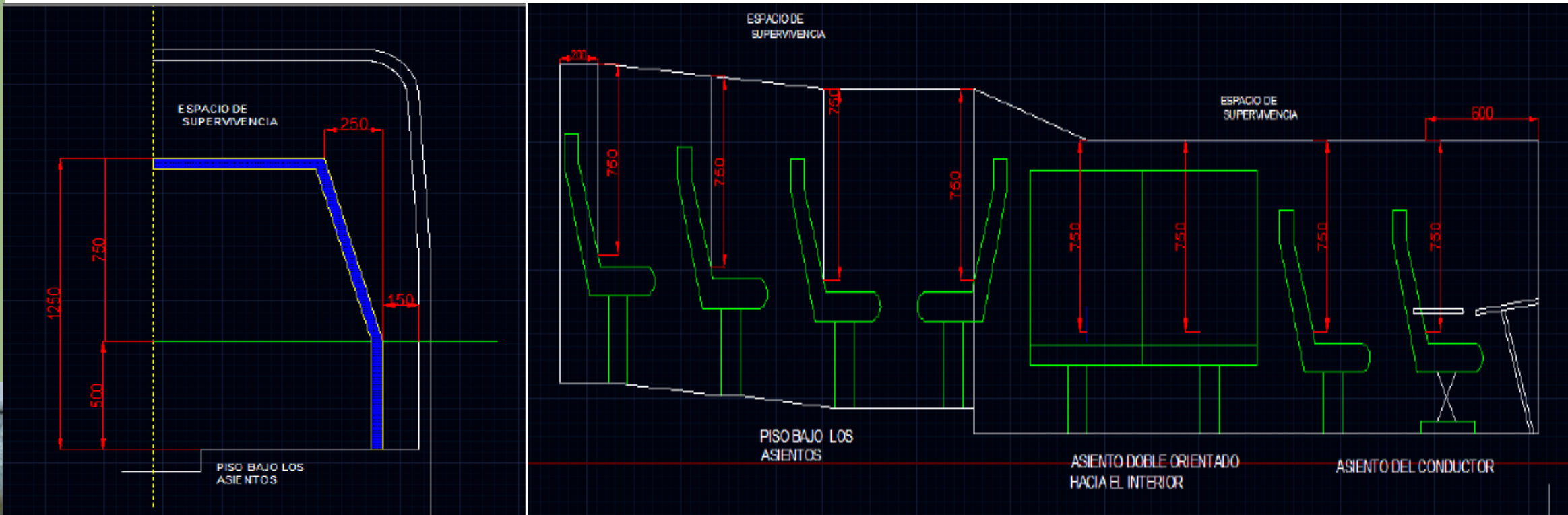
La carrocería debe resistir una carga estática del 50% del peso máximo admisible para el chasis, distribuido uniformemente sobre el techo, sin experimentar deformaciones en ningún punto que superen los 70 mm. (INEN, 2009)





ZONA DE SUPERVIVENCIA

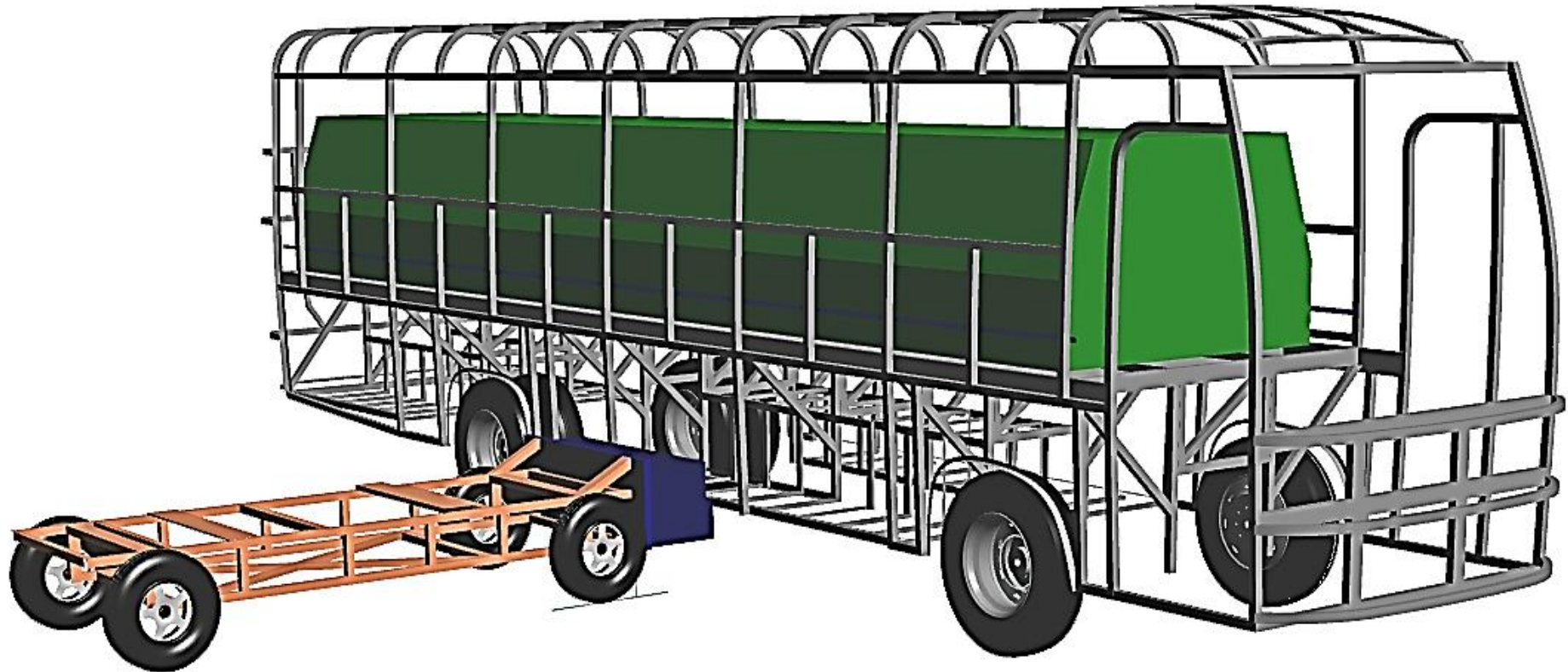
Es el volumen que se obtiene en el compartimento de ocupantes, desplazando en línea recta el plano vertical y transversal.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ZONA DE SUPERVIVENCIA MODELADA EN EL INTERIOR DEL BUS





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

NORMA INTERNACIONAL

REGLAMENTO 95 DE LA COMISIÓN ECONÓMICA PARA EUROPA

Establece prescripciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en lo relativo a la protección de los ocupantes, la cual se aplica a la conducta de colisión lateral de la estructura de vehículos.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PARÁMETROS PARA LA PRUEBA DE COLISIÓN LATERAL BASADO EN LA ECE R95

- El vehículo que se somete a prueba se encuentra en estado estacionario.
- La trayectoria de la barrera deformable móvil es perpendicular al vehículo impactado.
- La velocidad de la BDM en el momento del impacto es de 50 ± 1 km/h. Esta velocidad debe ser estable al menos 0,5 m antes del impacto.





PARÁMETROS PARA LA PRUEBA DE COLISIÓN LATERAL BASADO EN LA ECE R95

- La barrera deformable móvil incluye un impactador y una carreta.
- La masa total es de 950 ± 20 kg.
- La distancia al suelo del impactador es de 300 ± 5 mm medidos en condiciones estáticas, antes del





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Técnica computacional para resolver problemas de ingeniería, el sistema se subdivide en elementos finitos, para luego volverlo a reconstruir ensamblando la contribución de cada elemento y predecir así su comportamiento global.

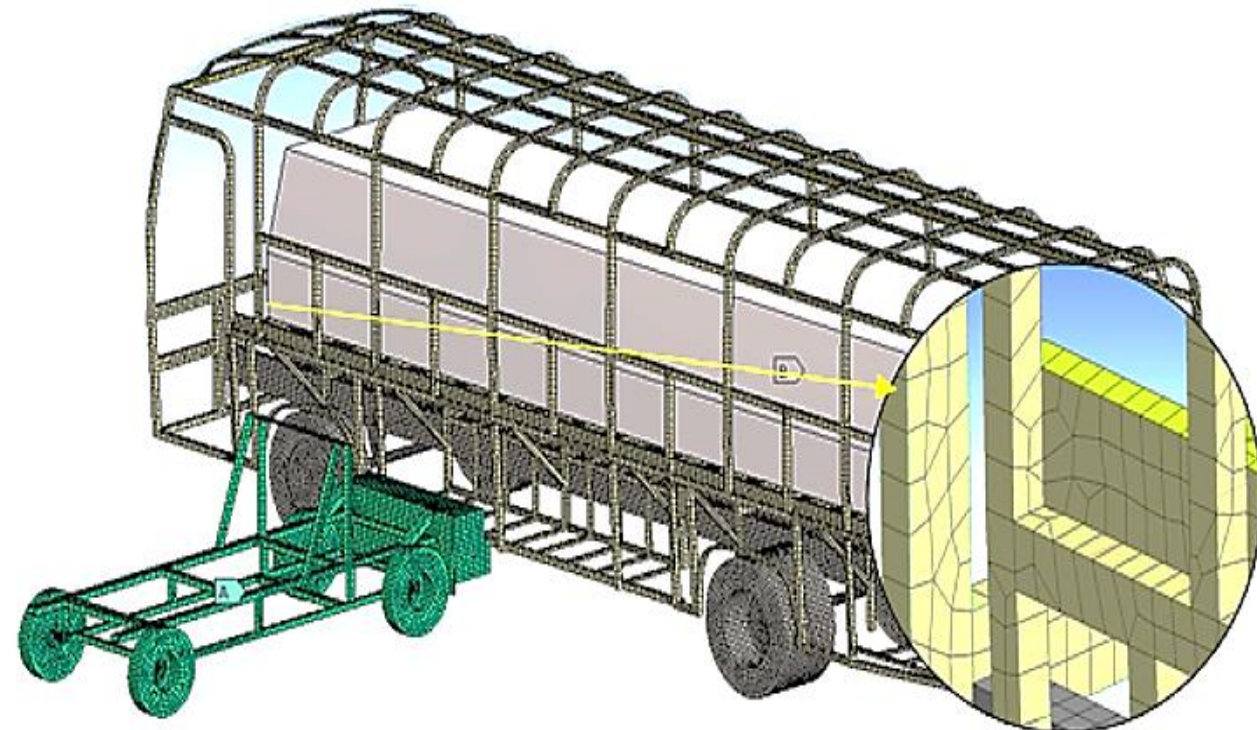
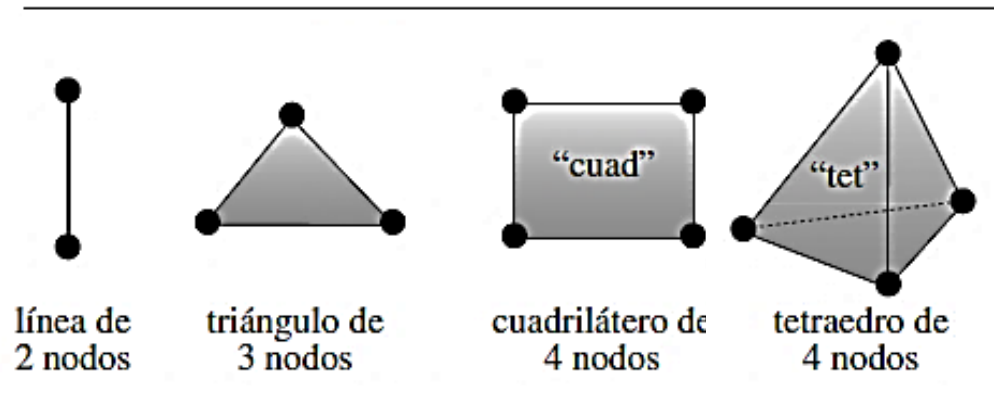




EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Tipos de elementos

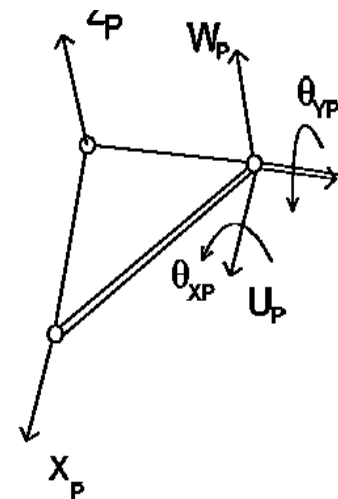
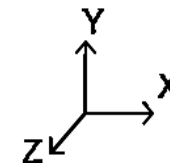
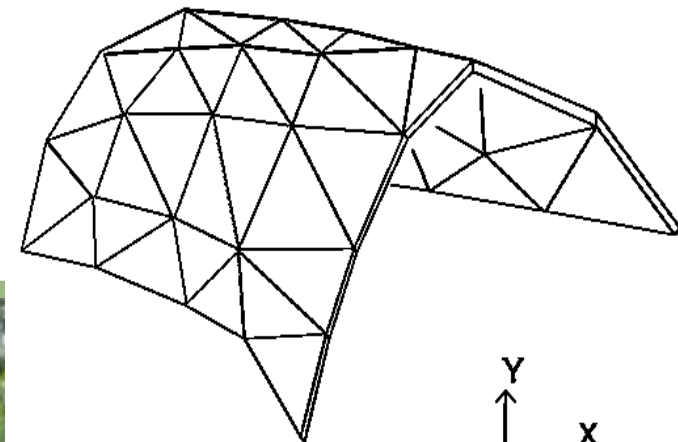
Los elementos cuadriláteros y ladrillos tienen funciones de desplazamiento y distribución de deformación dentro del elemento, los mismos que ofrecen mejores estimaciones de esfuerzo. (Norton, 2011)





ELEMENTOS TIPO SHELL:

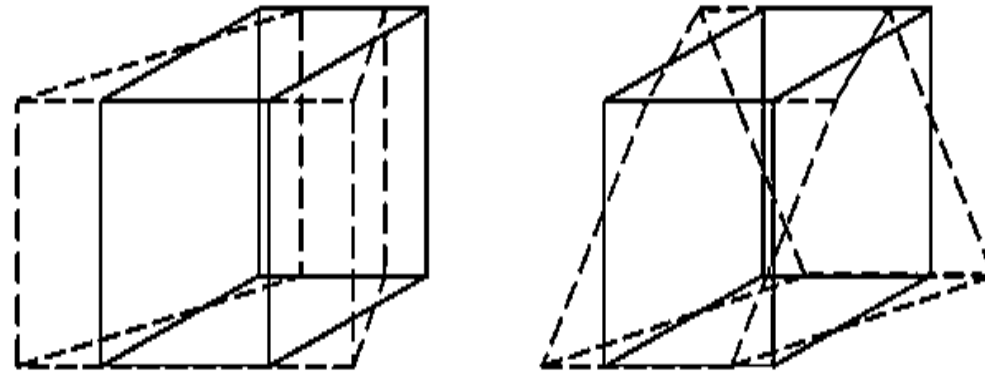
- Modelo matemático de dos dimensiones (2D) configurado para caracterizar el comportamiento de estructuras de paredes delgadas tridimensionales (3D).
- Satisfactorios para estructuras sometidas a flexión y deformación.
- Buenos resultados y costo computacional bajo.
- Disminuir los modos de reloj de arena (Hourglassing).





RELOJ DE ARENA U HOURGLASSING

- Son el resultado de matemáticas de los estados que no son físicamente posibles.
- No tienen una rigidez y dan una apariencia en zigzag a una malla.
- Pueden invalidar los resultados



Modos de Hourglass



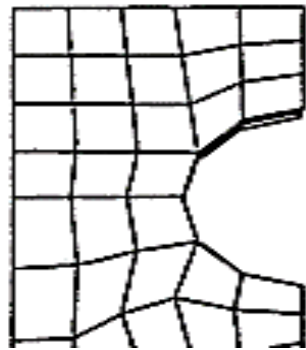


ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RELOJ DE ARENA U HOURGLASSING

La energía hourglassing no debe superar el 10% de la energía interna. (© 2015 ANSYS, Inc., 2014)





FORMULACIÓN PARA EL CONTROL DE HOURGLASS

FLANAGAN-BELYTSCHKO STIFFNESS

- Adición de rigidez elástica a un modelo, mediante coeficiente de hourglassing (no superar el 0.15)
- Problemas de velocidad baja que provocan grandes deformaciones, incluyendo simulaciones de choques.





CRITERIO JACOBIANO

- Determina la calidad de malla; calcula y prueba todos los elementos.
- Una proporción alta indica que el estudio computacional es poco fiable.
- Cuando un nodo tiende a desplazarse desde una esquina hacia el centro del elemento de línea, la proporción sube el Jacobiano, lo que puede ocasionar con el tiempo que por cualquier movimiento adicional se rompa el elemento. (© 2015 ANSYS, Inc., 2014)





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ESPECIFICACIONES DE PERFILES EMPLEADOS EN LA CARROCERÍA

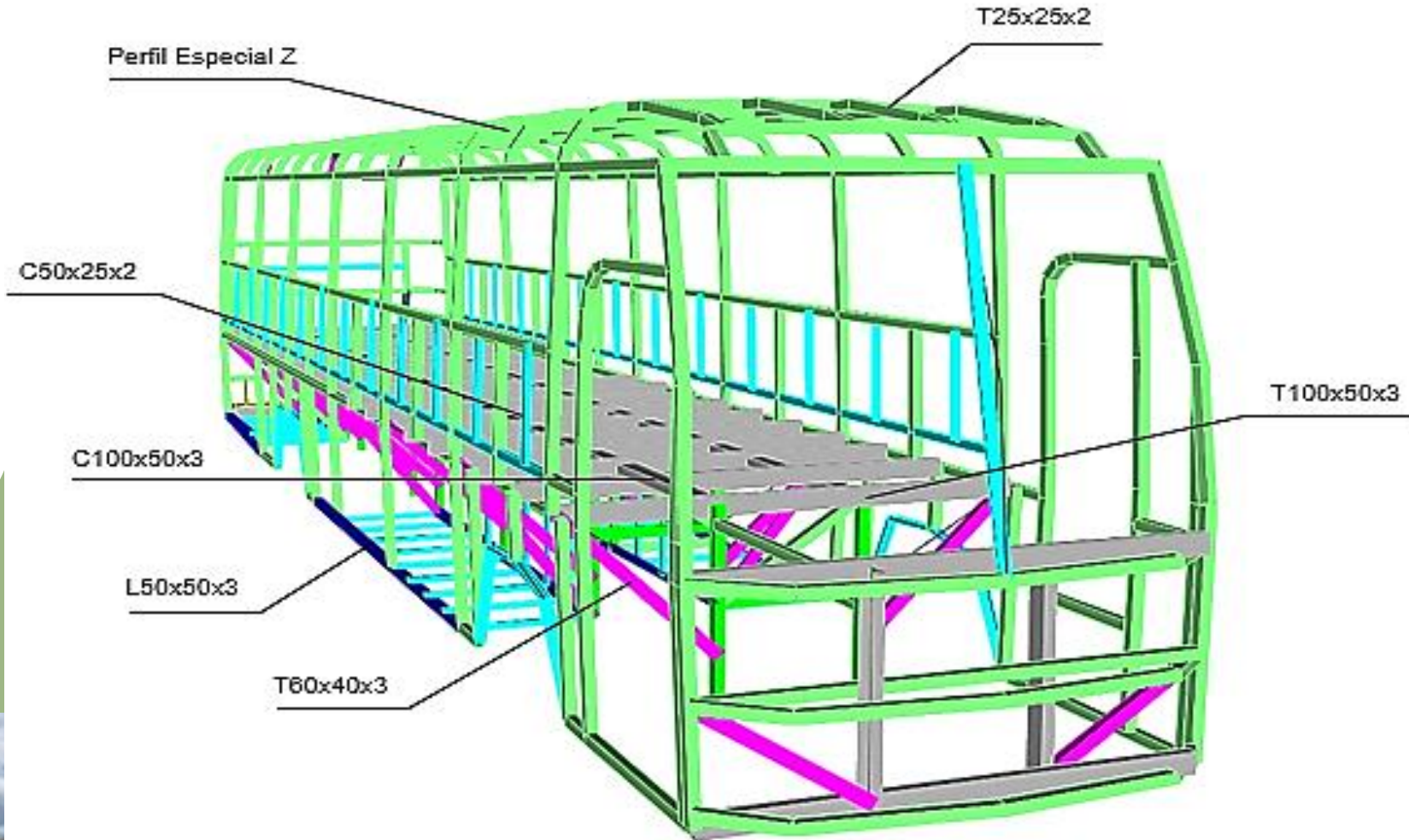
Unidad Estructural	Designación (mm)	Material Acero
Piso	Tubo cuadrado T50x50x3 Tubo rectangular T100x50x3 Tubo rectangular de refuerzo T60x40x3 Canal de refuerzo C100x50x50x3	ASTM A500
Laterales	Tubo cuadrado T50x50x2 Canal de refuerzo C50x25x25x2 L50x50x3 Zócalo 216x39x28x23x2	ASTM A500
Techo	Tubo cuadrado T50x50x2 Tubo rectangular T50x25x2 Perfil especial Z	ASTM A500
Frontal	Tubo cuadrado T50x50x2 Tubo cuadrado T40x40x2	ASTM A500
Posterior	Tubo cuadrado T50x50x2 Tubo cuadrado T40x40x2	ASTM A500

Fuente: (Perfiles estructurales y comerciales Deacero)





ESPECIFICACIONES DE PERFILES EMPLEADOS EN LA CARROCERÍA





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MATERIAL EMPLEADO EN EL ARMAZÓN DE LA CARROCERÍA

Propiedades mecánicas del Acero ASTM A500

Módulo de elasticidad:

E= 200 GPa

Módulo de elasticidad por cortante:

G=76,923 GPa

Acero ASTM A500

Resistencia a la fluencia:

Fy=320 MPa

Resistencia última:

Fu=405 MPa

Porcentaje de elongación:

21%-25%

Fuente: <http://www.ahmsa.com>





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

METODOLOGÍA DE PRE-PROCESAMIENTO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA CARROCERÍA





Asignación de materiales y perfiles estructurales

The image displays a software interface for structural analysis. The main window shows a 3D wireframe model of a building's structural frame. A menu is open, highlighting the 'Materials...' option. Below the menu, a 'Materials' dialog box is visible, listing various material types, with 'ASTM A500' selected. To the right, an 'Assign Frame Sections' dialog box is open, showing a list of structural profiles such as PC50X25X2, PL50X50X2, and PLATINA. The software interface includes a menu bar with options like Define, Draw, Select, Assign, Analyze, Display, Design, Options, Tools, and Help. A toolbar with various icons is also present. The background features a vertical green and red bar on the left and a small image of a building at the bottom left.



Asignación de cargas sobre la estructura

Cargas estáticas y dinámicas aplicadas en la carrocería

Cargas Estáticas

Carga muerta (N) 105742

Carga viva (N) 42530

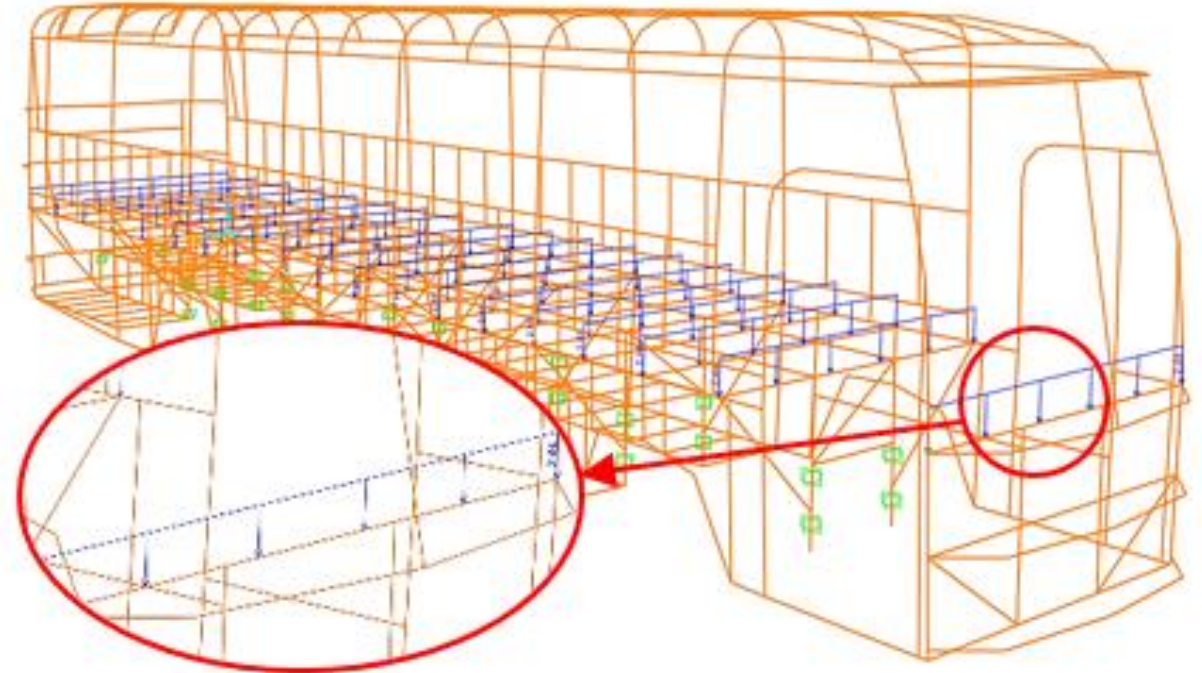
Cargas Dinámicas

Carga de aceleración brusca (N) 67668

Carga de frenado (N) 67668

Carga de giro (N) 14330

Carga por resistencia la aire frontal (N) 2149

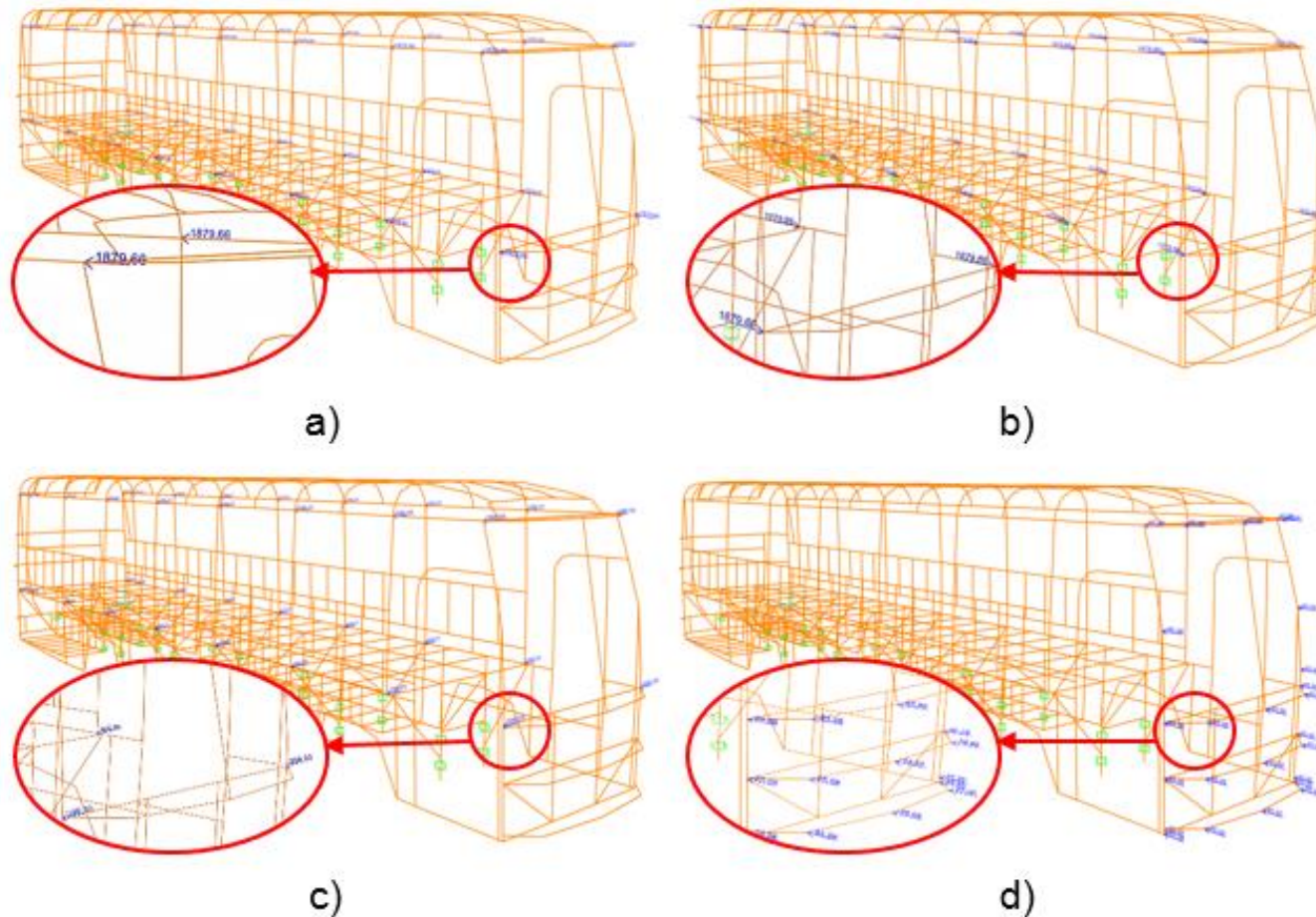


CARGAS ESTÁTICAS





Asignación de cargas sobre la estructura



**CARGAS
DINÁMICAS**

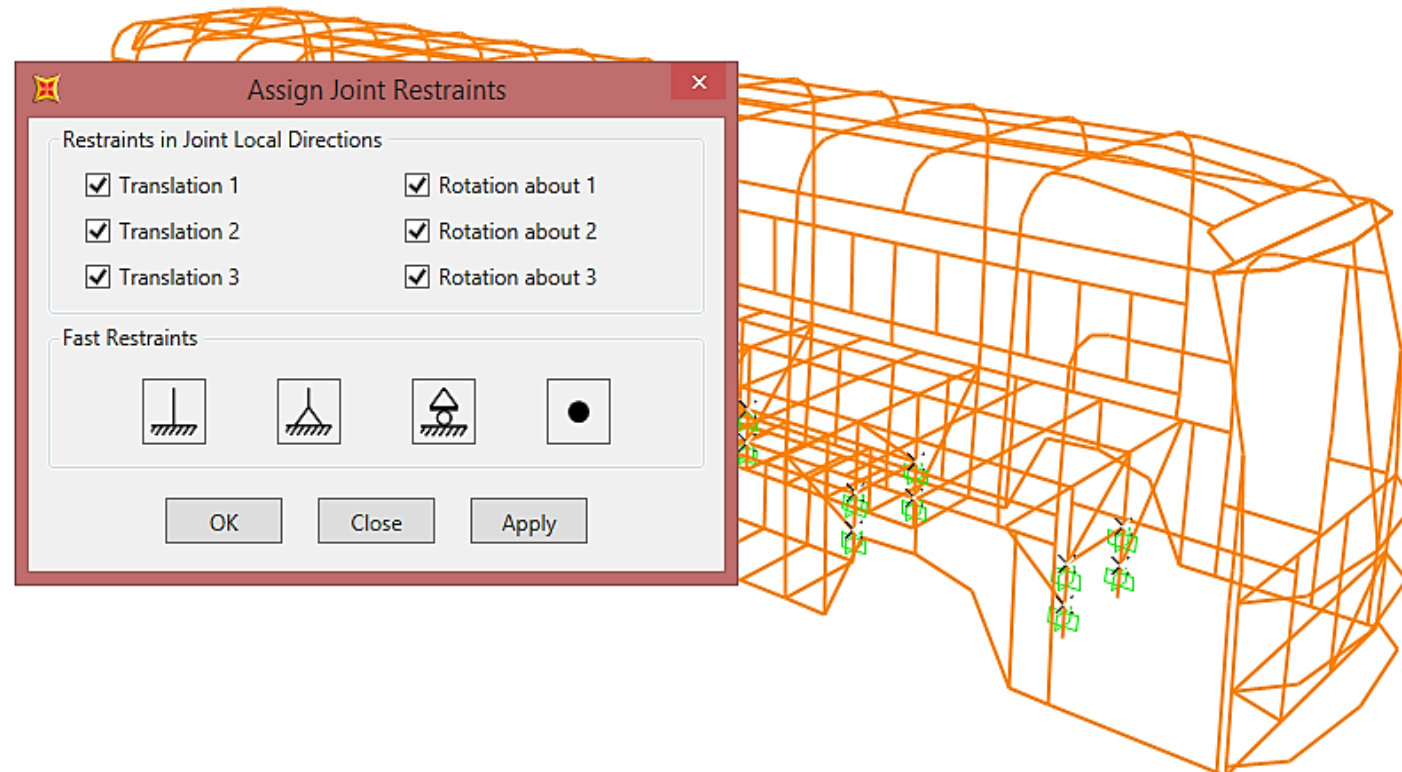
Figura 65 Asignación de cargas dinámicas, a) Carga de aceleración brusca, b) Carga de frenado, c) Carga de giro y d) Carga de resistencia al aire frontal





Asignación de soportes fijos a la estructura

Son de carácter fijo en rotación ($\phi_{xx} = \phi_{yy} = \phi_{zz} = 0$) y traslación ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$)





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

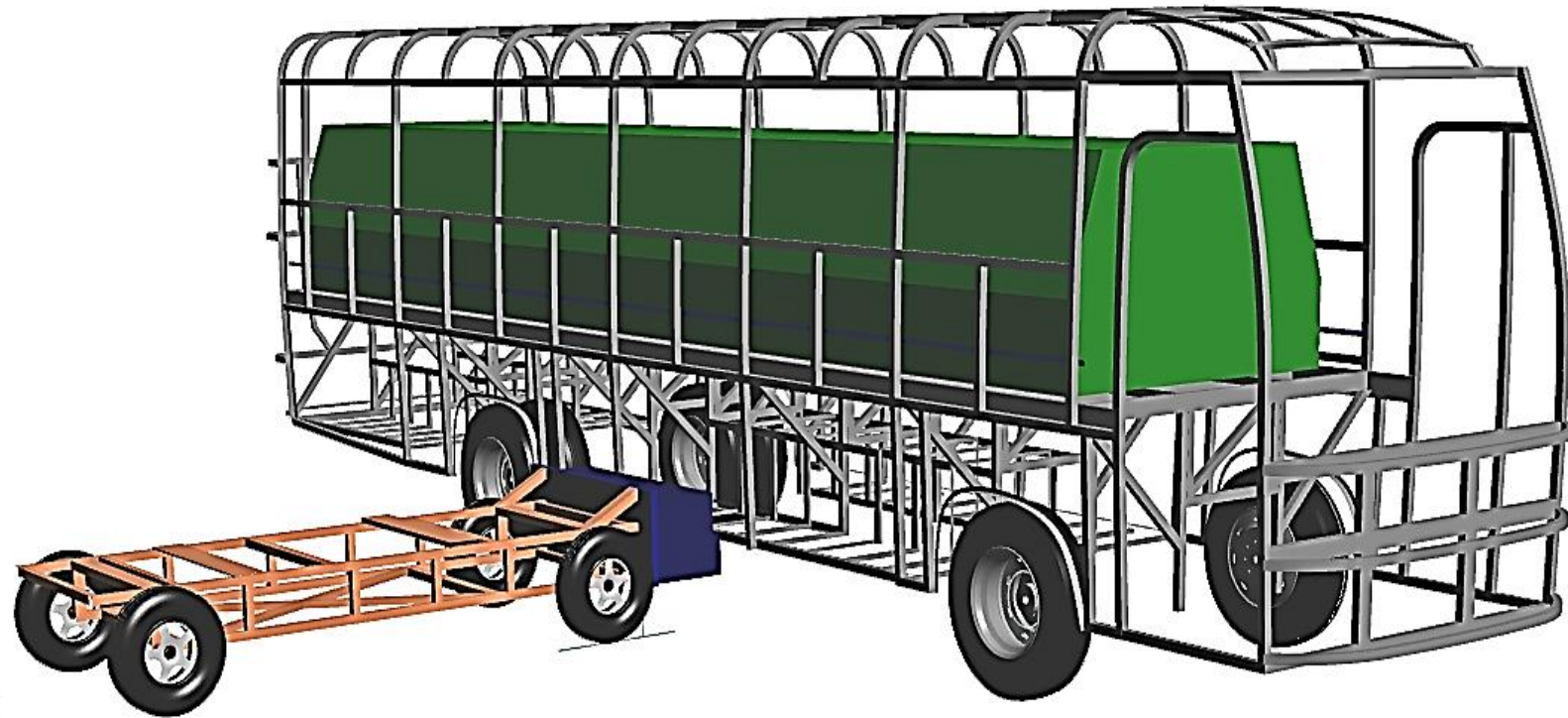
METODOLOGÍA DE PRE-PROCESAMIENTO DEL ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CARROCERÍA





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Modelado de la carrocería e impactador





Asignación del material Carrocería

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		





Generación de malla

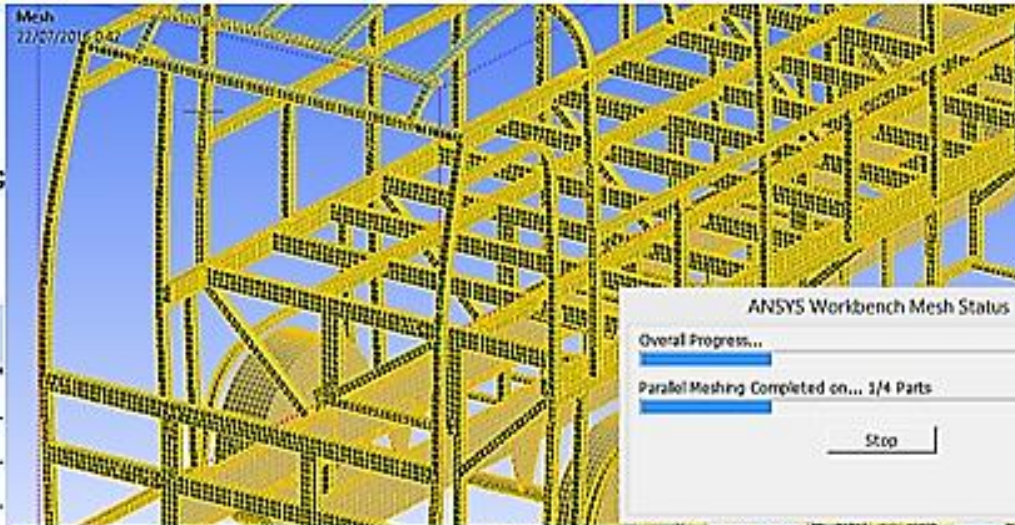
Project

- Model (B3)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh

Details of "Mesh"

- Sizing
- Inflation
- Patch Conforming Options
- Patch Independent Options
- Advanced
- Defeaturing
- Statistics

<input type="checkbox"/> Nodes	417550
<input type="checkbox"/> Elements	414860
Mesh Metric	Jacobian Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,
<input type="checkbox"/> Max	69,527
<input checked="" type="checkbox"/> Average	1,0645
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,36913

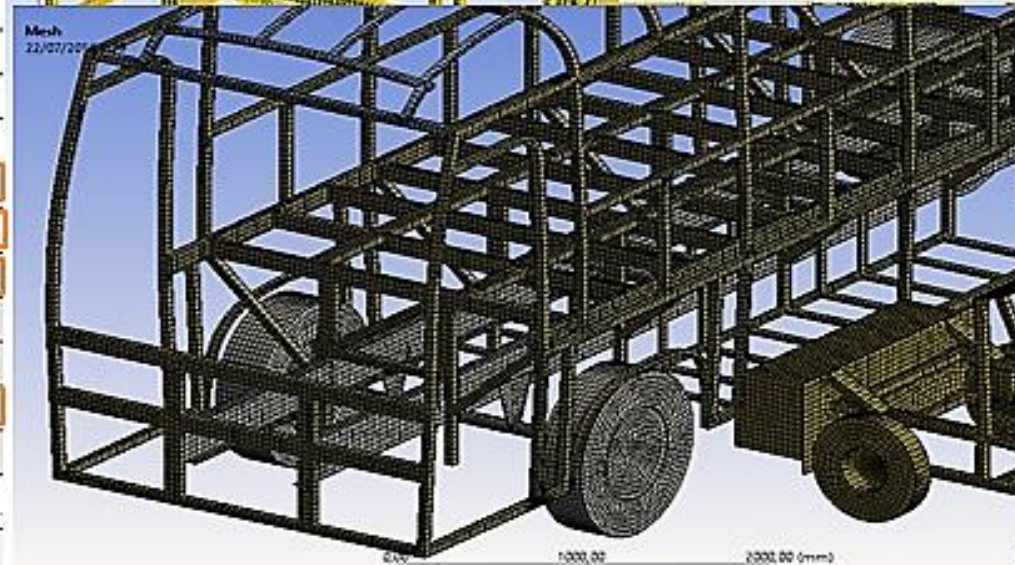


ANSYS Workbench Mesh Status

Overall Progress...

Parallel Meshing Completed on... 3/4 Parts

Stop



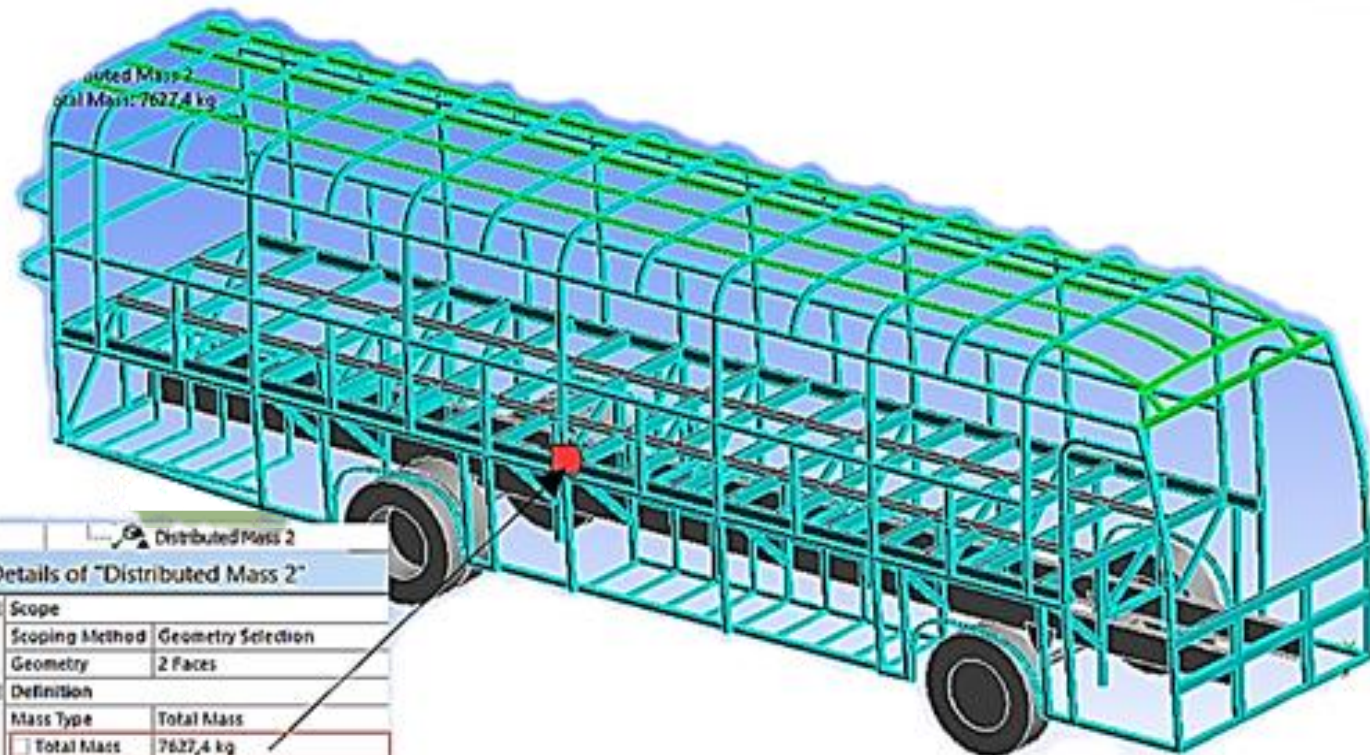


CONDICIONES DE FRONTERA

Representan las restricciones sobre una pieza real.

- **Asignación de cargas**

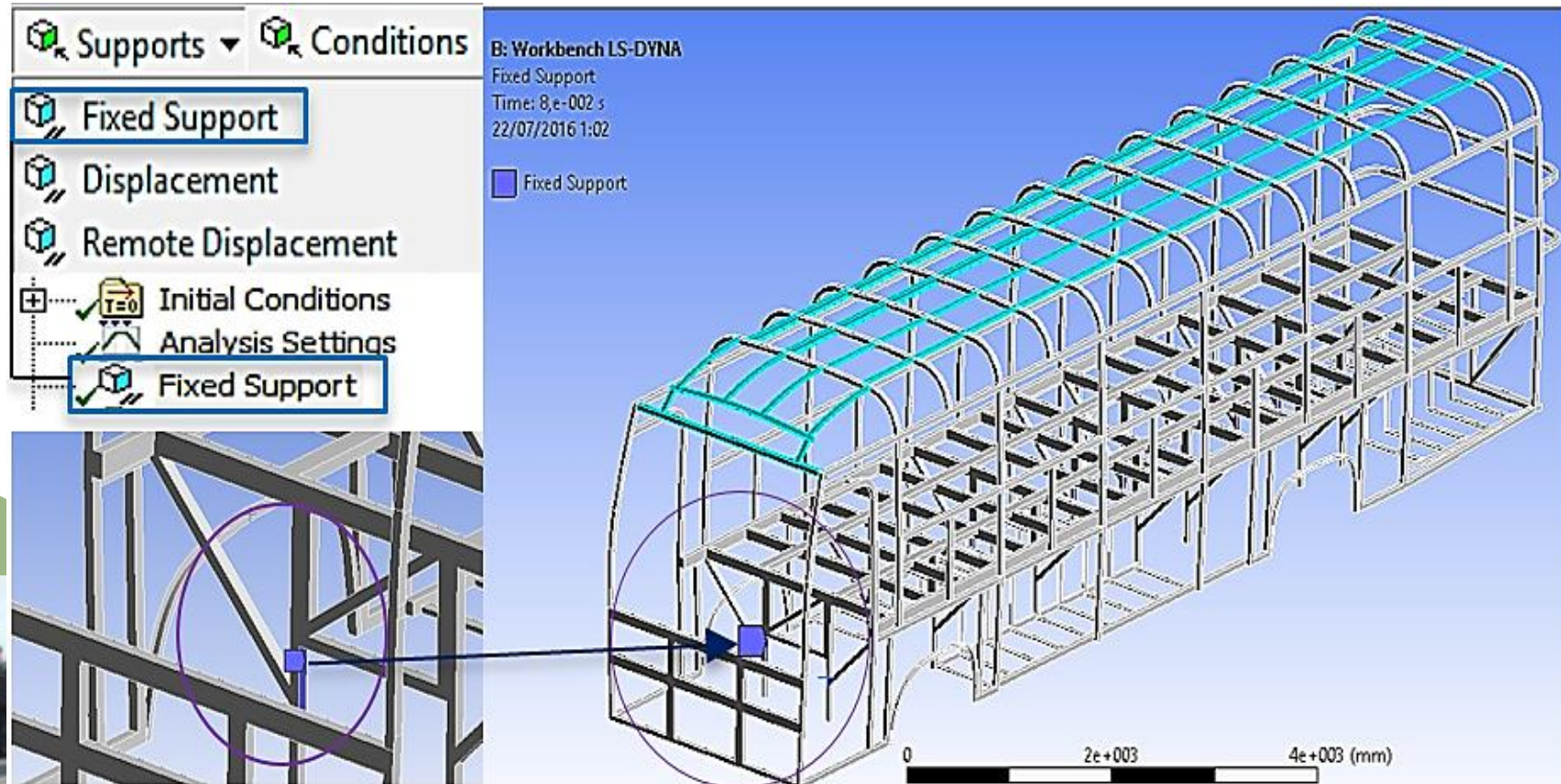
**MASA
DISTRIBUIDA
7627 kg**





CONDICIONES DE FRONTERA

- Asignación de apoyos a la estructura





CONDICIONES DE FRONTERA

- **Velocidad de la Barrera Deformable Móvil**

**VELOCIDAD:
50 Km/h**

B: Workbench LS-DYNA
Velocity
21/07/2016 15:49
Velocity: 13889 mm/s

Workbench LS-DYNA (B4)
Initial Conditions
Pre-Stress (None)
Velocity

Details of "Velocity"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Input Type	Velocity
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	-13889 mm/s
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm/s
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm/s





CONDICIONES DE FRONTERA

- Duración del impacto y formulación de Hourglass

Duración del impacto

Modo de reloj de arena

B: Workbench LS-DYNA
Analysis Settings
Time: 8.e-002 s
22/07/2016 0:57

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
End Time	0,08
Time Step Safety Factor	0,9
Maximum Number Of Cycles	10000000
Automatic Mass Scaling	No
Hourglass Controls	
Hourglass Type	Flanagan-Belytschko Stiffness Form
LS-DYNA ID	4
Default Hourglass Coefficient	0,1
ALE Controls	





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ANÁLISIS DE RESULTADOS





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

POS- PROCESO ANÁLISIS ESTÁTICO

Evaluación y representación de resultados del análisis estático de la carrocería.





POS- PROCESO ANÁLISIS ESTÁTICO

Valores de las combinaciones de cargas (LRFD)

Combinación 1	1,4CM+CV	190569
Combinación 2	1,2CM+1,6CV+0,5CG	202103
Combinación 3	1,2CM+0,5CV+1,6CG	171083
Combinación 4	1,2CM+1,6CF+0,8Craf	236878
Combinación 5	1,2CM+0,5CV+0,5CF+1,3CRaf	184783
Combinación 6	1,2CM+0,5CV+1,5Cab	203968
Combinación 7	0,9CM-1,3Craf	92374
Combinación 8	0,9CM+1,3CRaf	97962

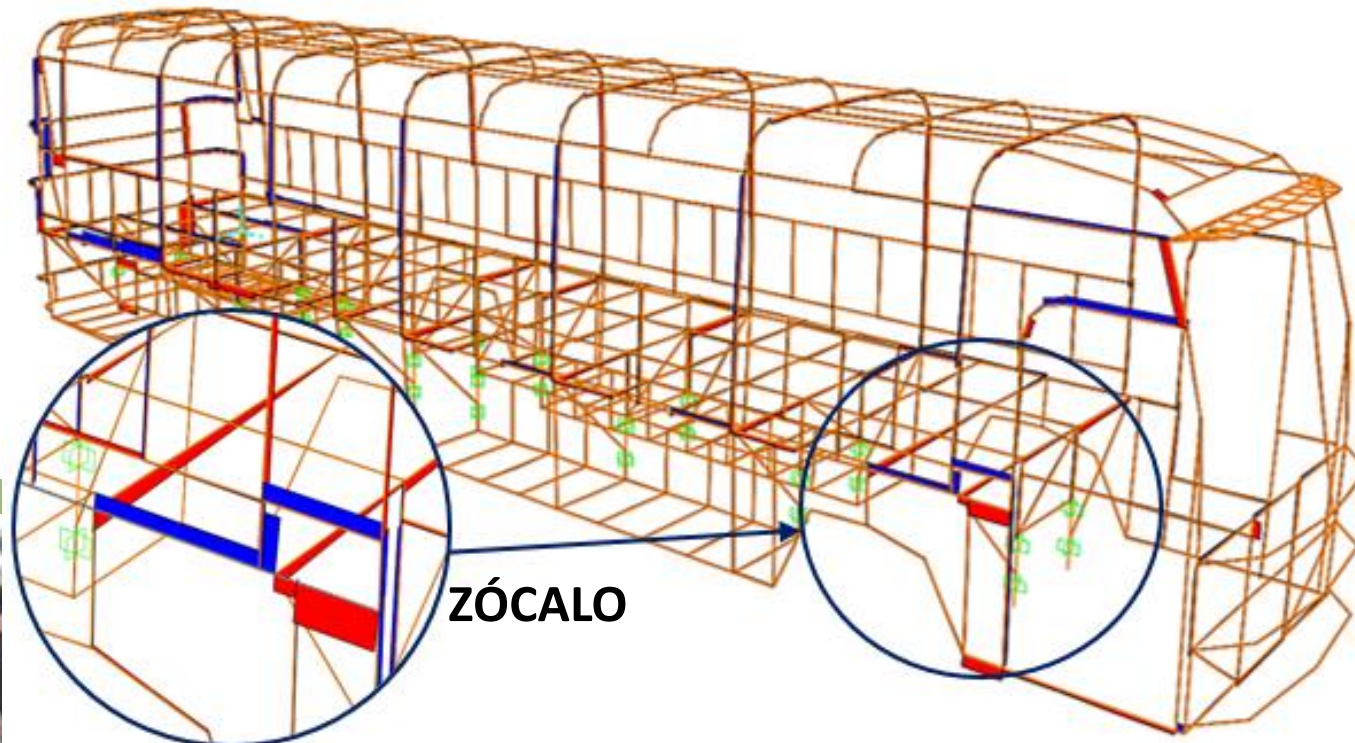




POS- PROCESO ANÁLISIS ESTÁTICO

Deformación de la carrocería, combinación 3 del método LRFD

Alcanzar una deformación de todos los componentes de la estructura de la carrocería iguales o menores a $1/240$ veces su longitud.

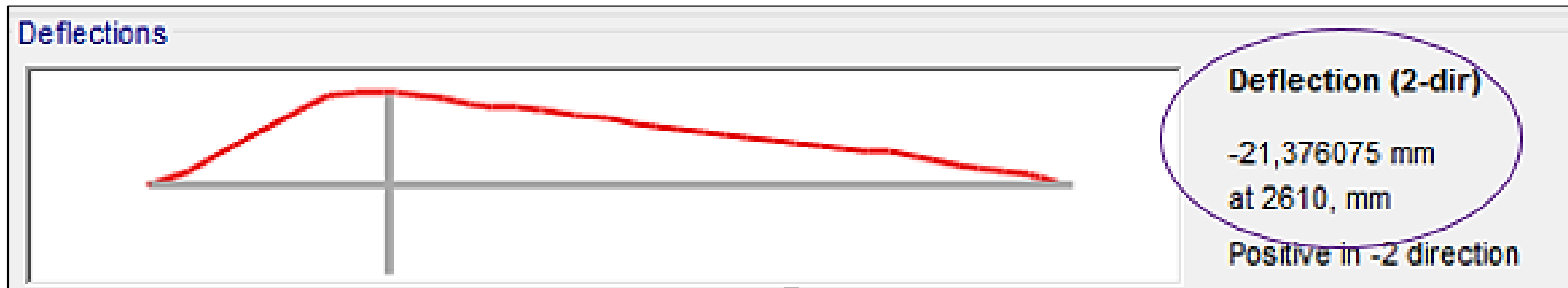




POS- PROCESO ANÁLISIS ESTÁTICO

Deformación de la carrocería, combinación 3 del método LRFD

$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{10115\text{mm}}{240} = 42,14\text{mm}$$



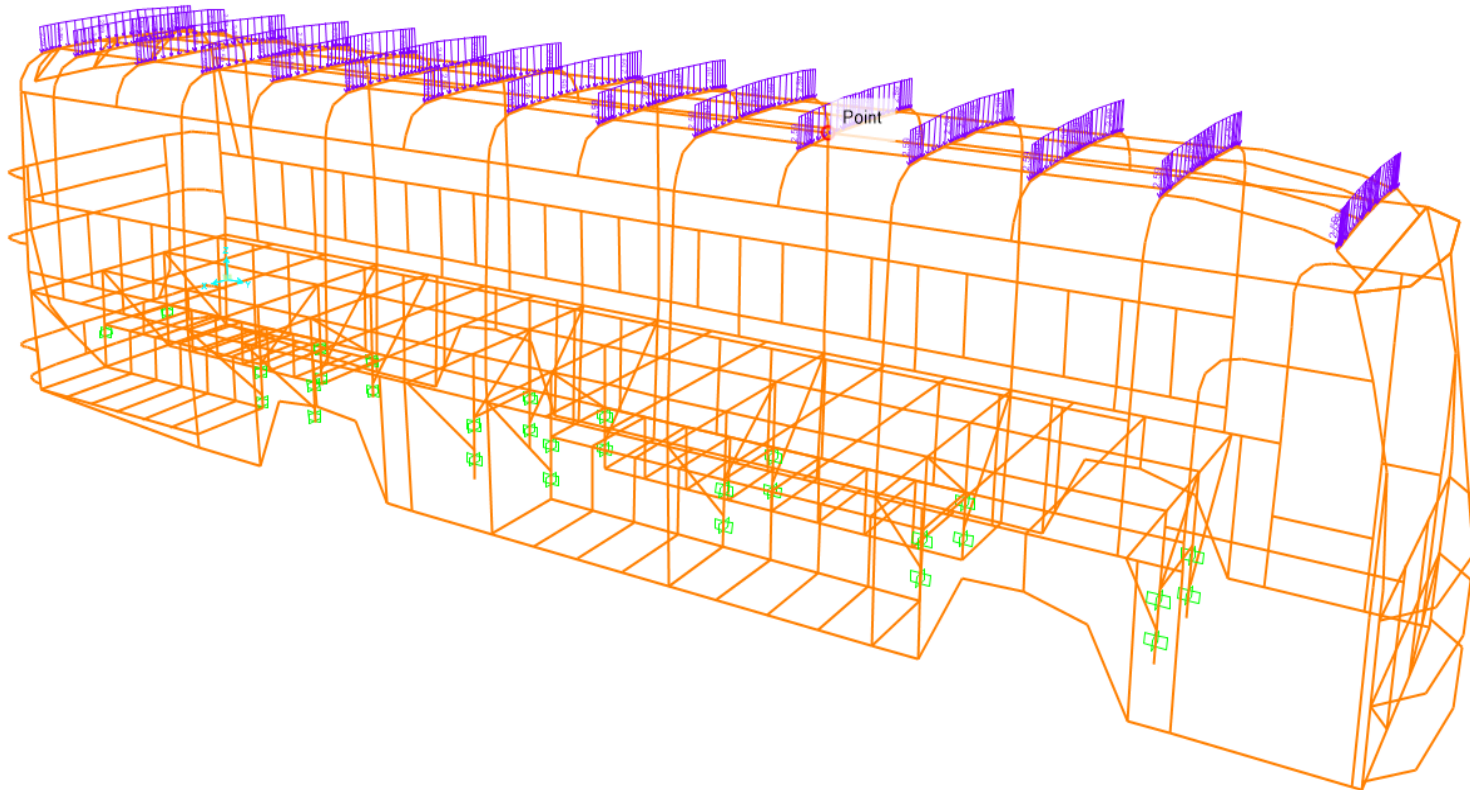
$$\frac{L}{240} = 42,14 > 21,38$$





POS- PROCESO ANÁLISIS ESTÁTICO

Resistencia de la estructura (Norma NTE INEN 1323:2009.)



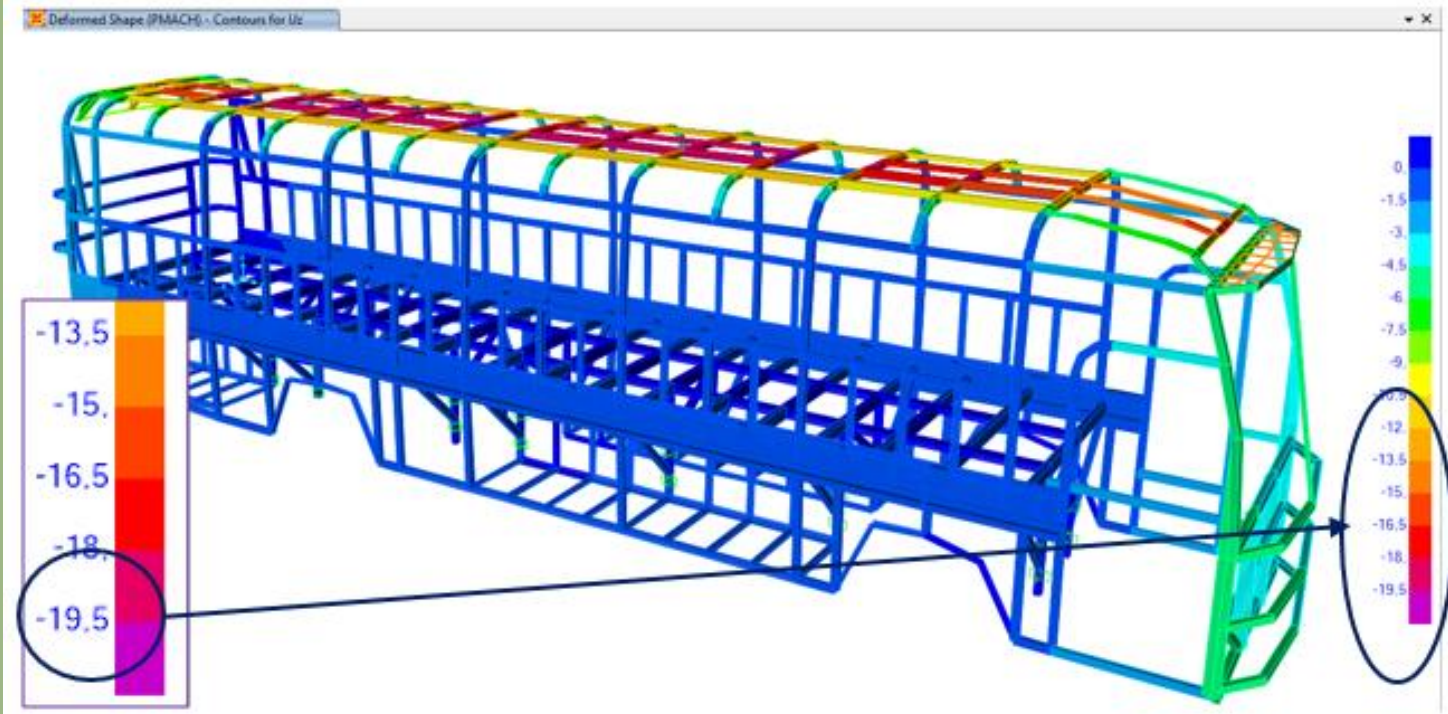
**CARGA DISTRIBUIDA:
2,59 N/mm**





POS- PROCESO ANÁLISIS ESTÁTICO

Resistencia de la estructura (Norma NTE INEN 1323:2009.)



Deformación máxima:
 $19,5 \text{ mm} < 70 \text{ mm}$

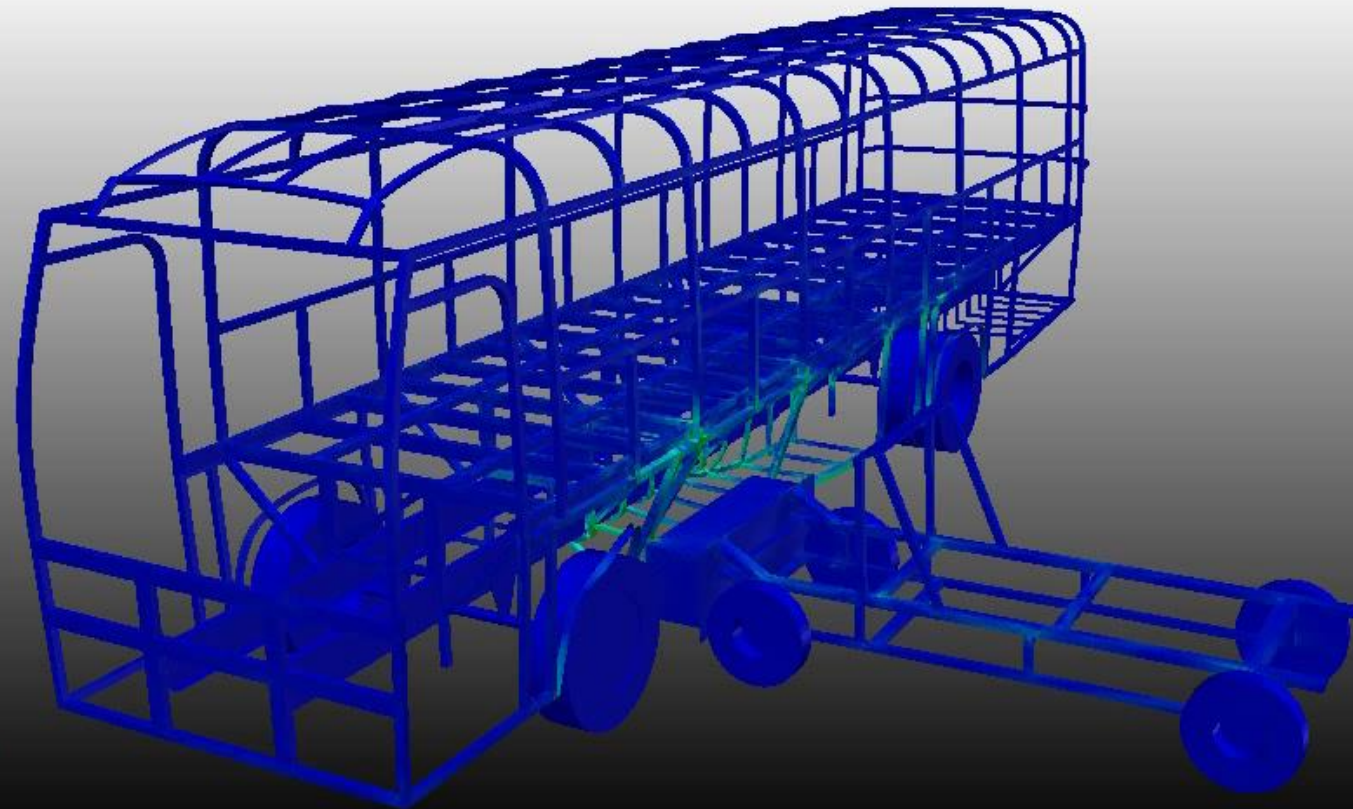
DEFROMACIÓN MÁXIMA SOBRE EL TECHO DE LA CARROCERÍA





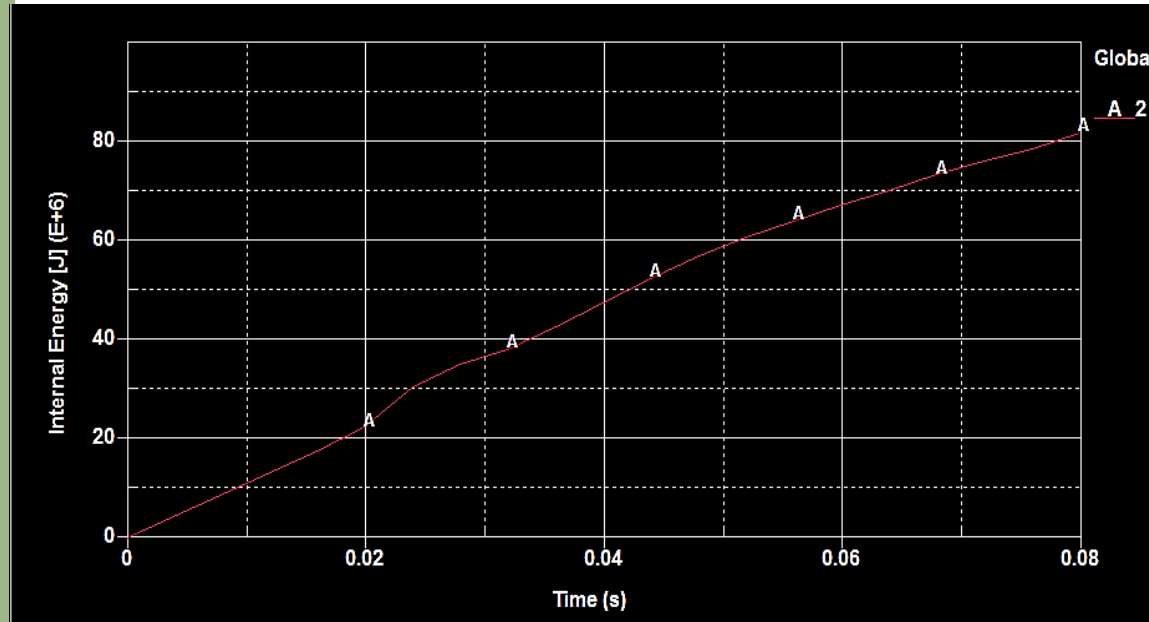
POS- PROCESO ANÁLISIS DINÁMICO

Evaluación y representación de resultados del análisis dinámico de la carrocería.

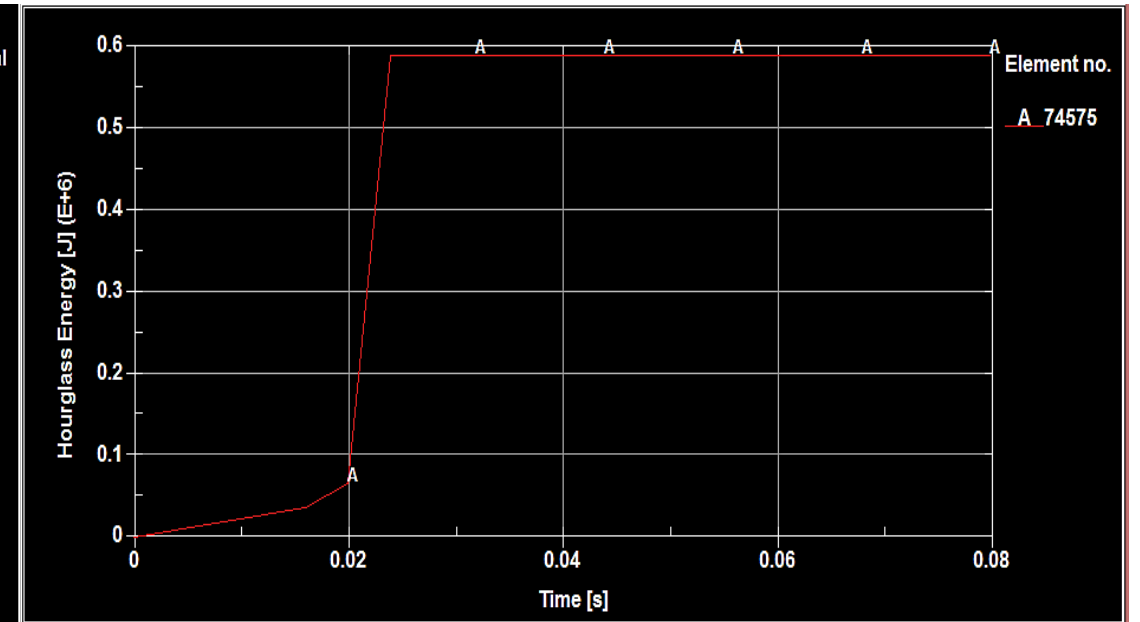




Validación del estudio virtual



Energía Interna= 82×10^6 [J]



Energía Hourglass= 0.59×10^6 [J]





Validación del estudio virtual

Cálculo de la relación entre la Energía de Hourglass y la Energía Interna:

$$H = \frac{E. Hourglass}{E. Interna} * 100\%$$

$$H = \frac{0,59 \times 10^6 J}{82 \times 10^6 J} * 100\%$$

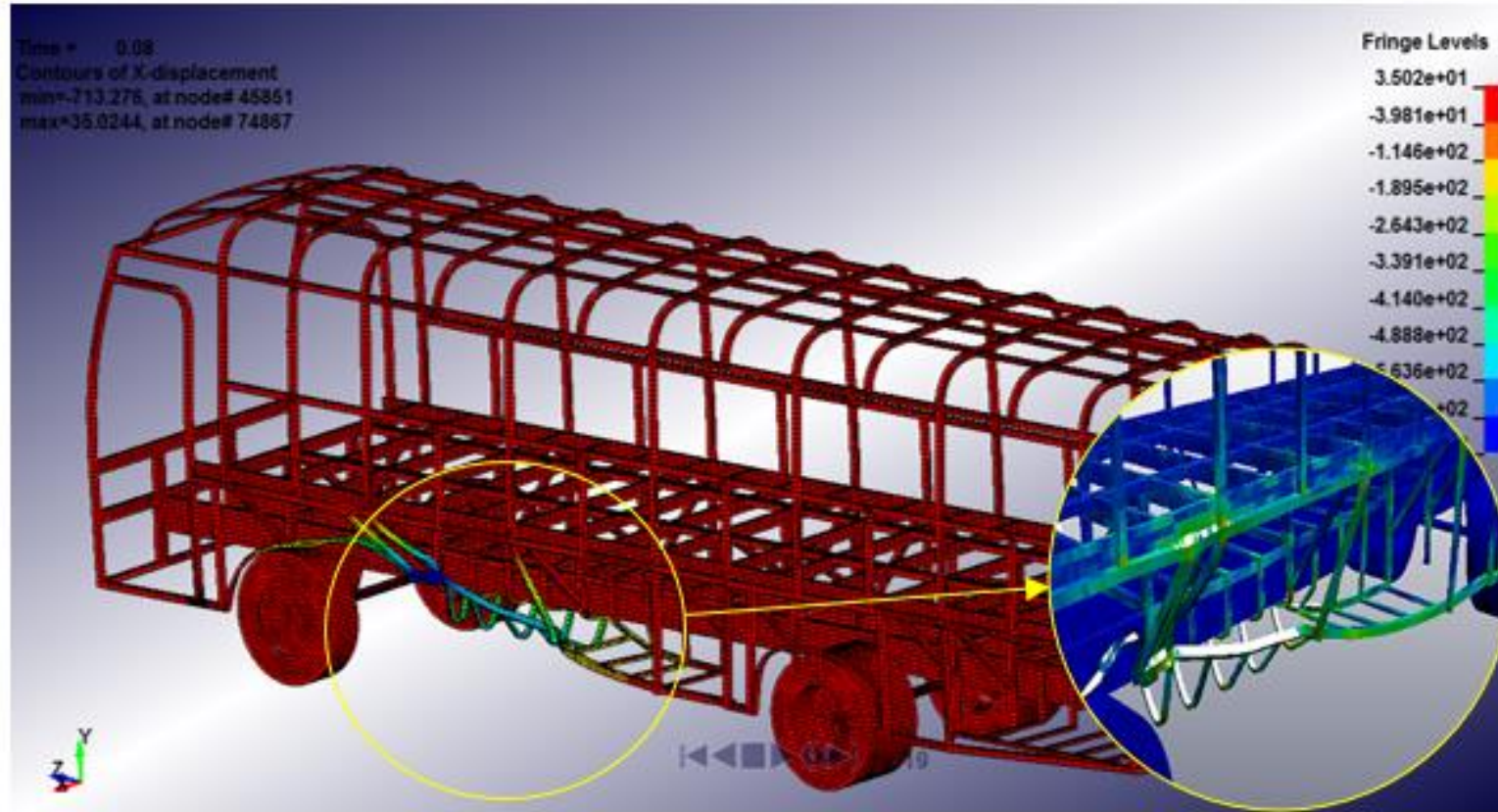
$$H = 0,72 \%$$

$$H < 10 \%$$





Deformación direccional de la carrocería



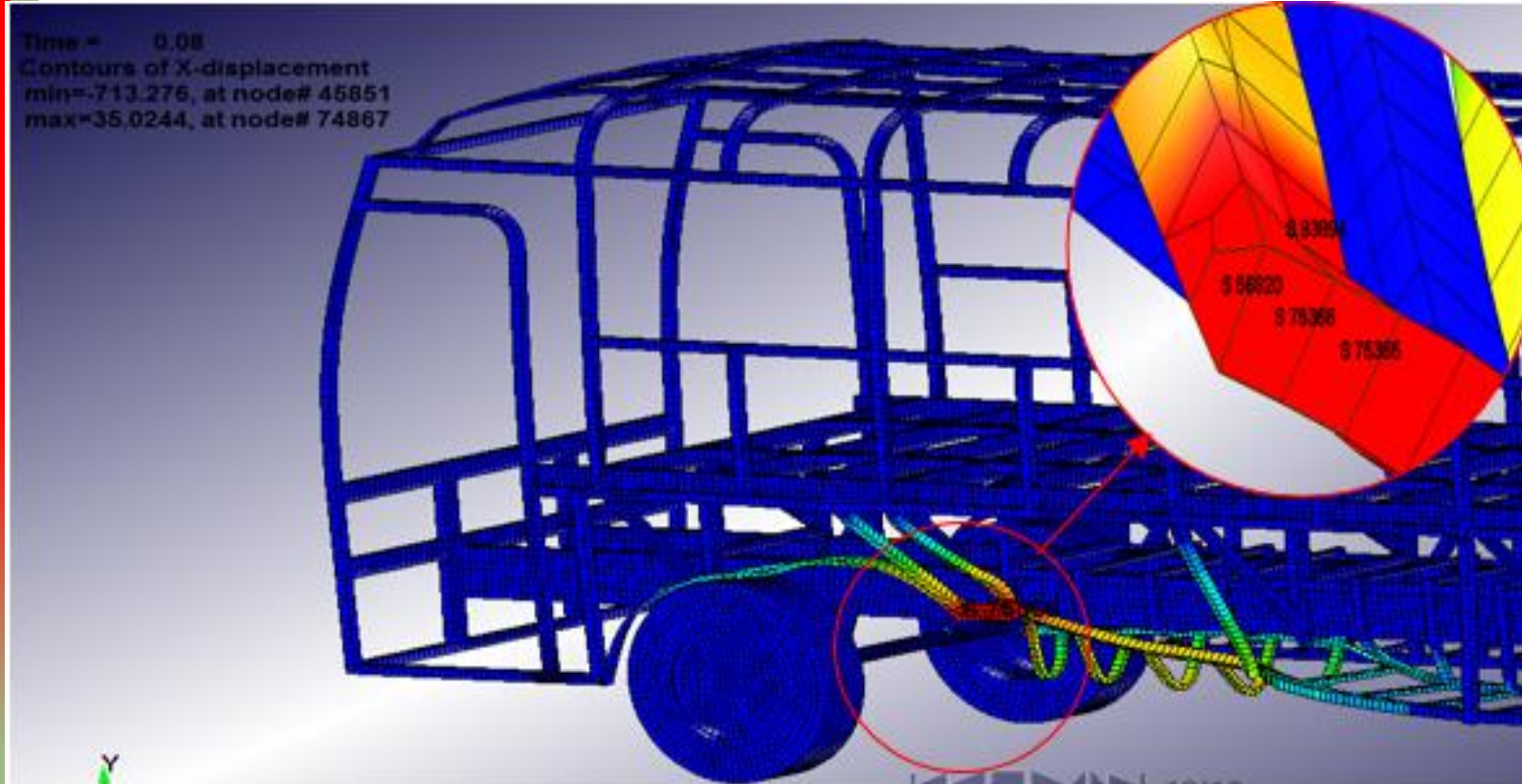
**Desplazamiento
direccional
en el eje X: 713 mm**





POS- PROCESO ANÁLISIS DINÁMICO

Deformación direccional de la carrocería



**ELEMENTOS
SELECCIONADOS**

56820

75365

75366

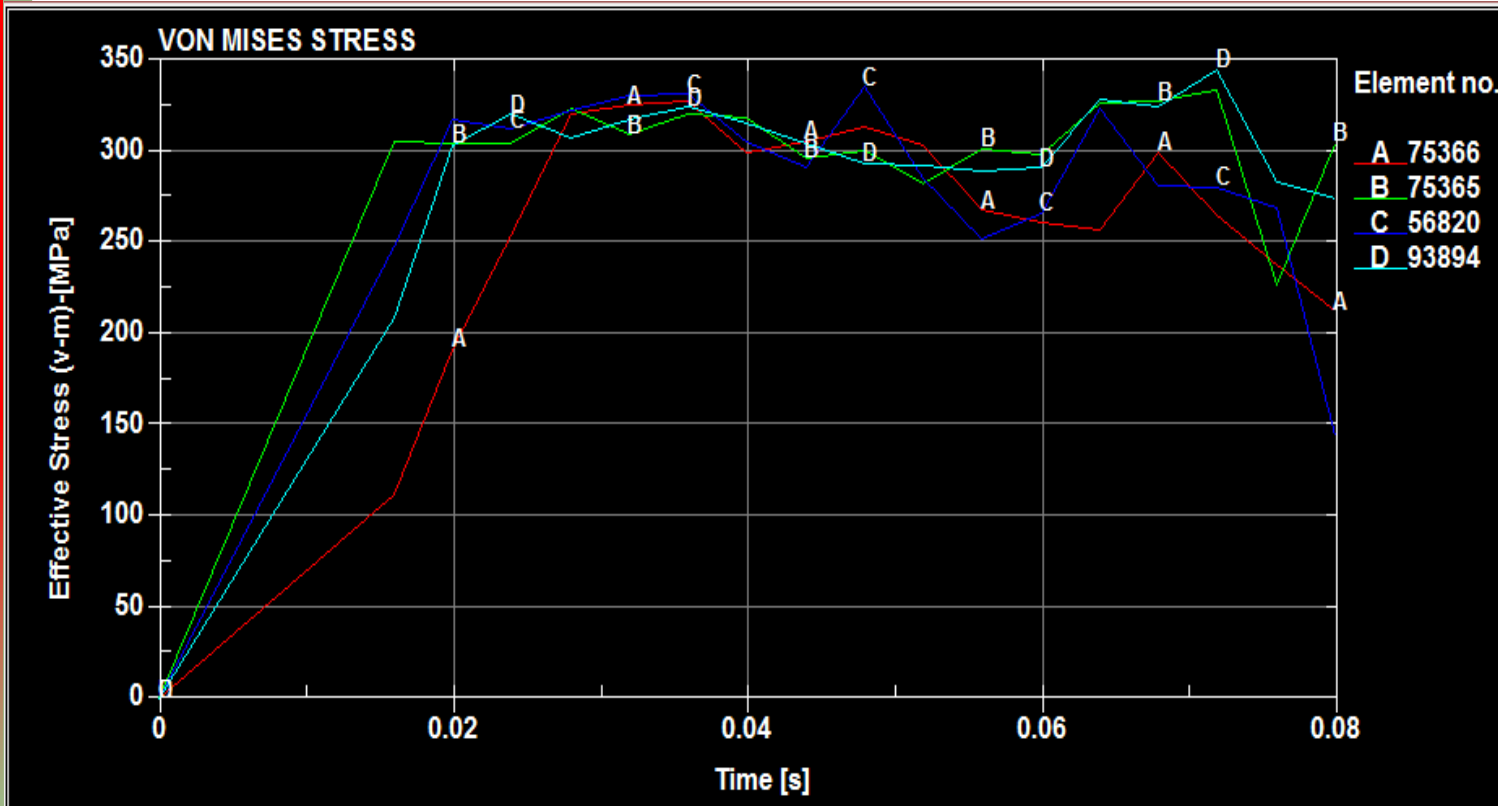
93894 (elemento crítico)





POS- PROCESO ANÁLISIS DINÁMICO

Deformación direccional de la carrocería



ELEMENTOS SELECCIONADOS

56820: 335 MPa

75365: 330 MPa

75366: 325 MPa

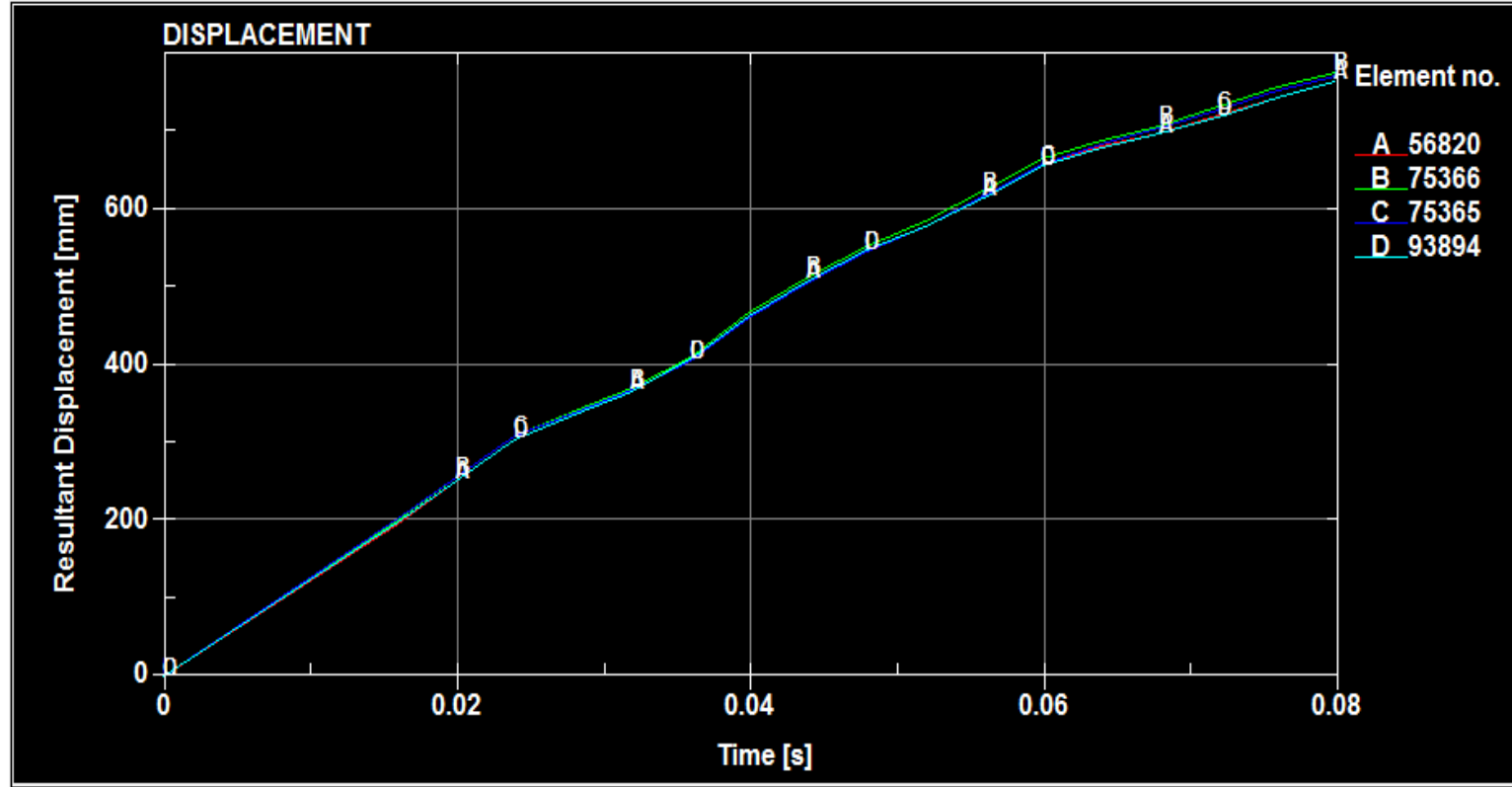
93894: 345 MPa





POS- PROCESO ANÁLISIS DINÁMICO

Deformación direccional de la carrocería



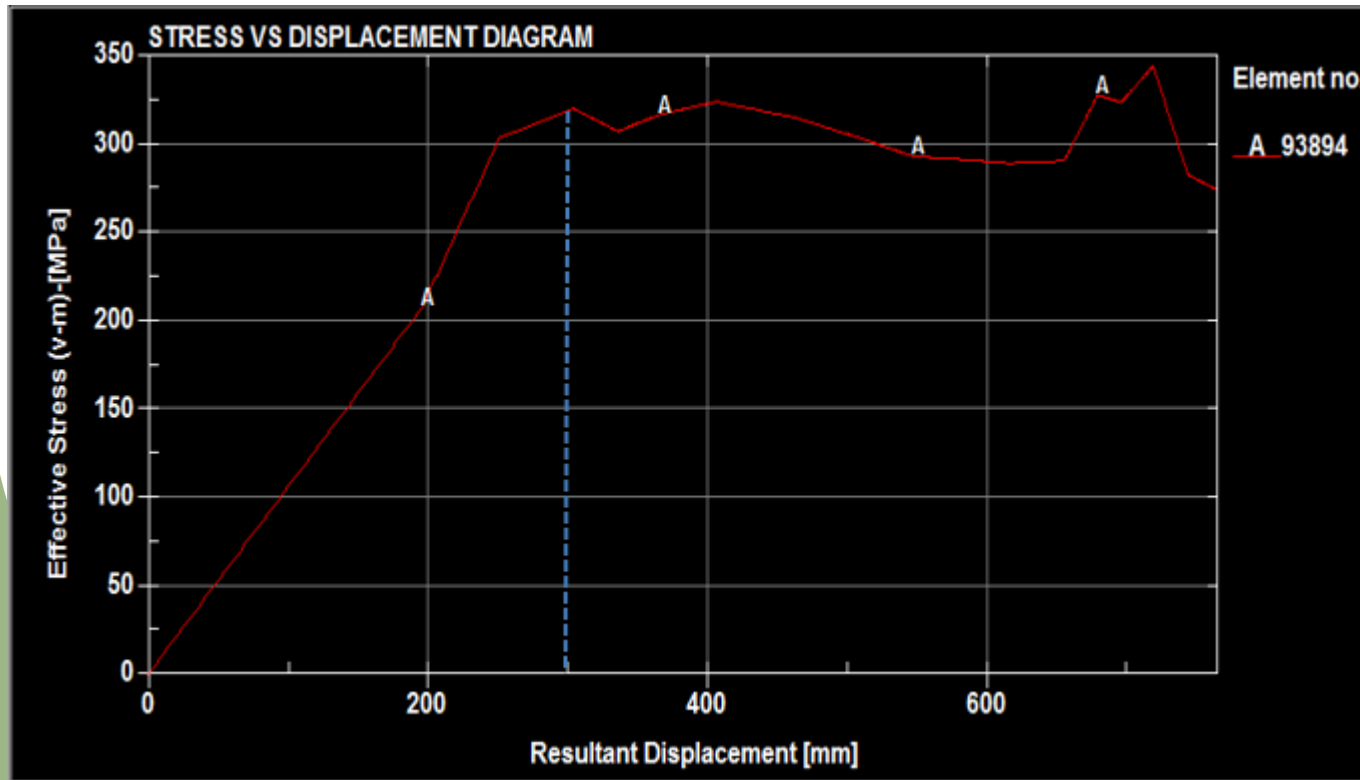
DESPLAZAMIENTO RESULTANTE DE ELEMENTOS SELECCIONADOS





POS- PROCESO ANÁLISIS DINÁMICO

Deformación direccional de la carrocería



S_y : Deformación de 300mm; $t=30$ ms

Colapso zona plástica por deformación

$\sigma' = 345$ MPa

$t=71$ ms

Disminución de esfuerzo.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

La idealización del sistema empírico que se está estudiando, es ubicuo en la práctica de la ciencia. Se utiliza para simplificar el modelo para uso representativo o explicativo o para que sean computacionalmente tratables.

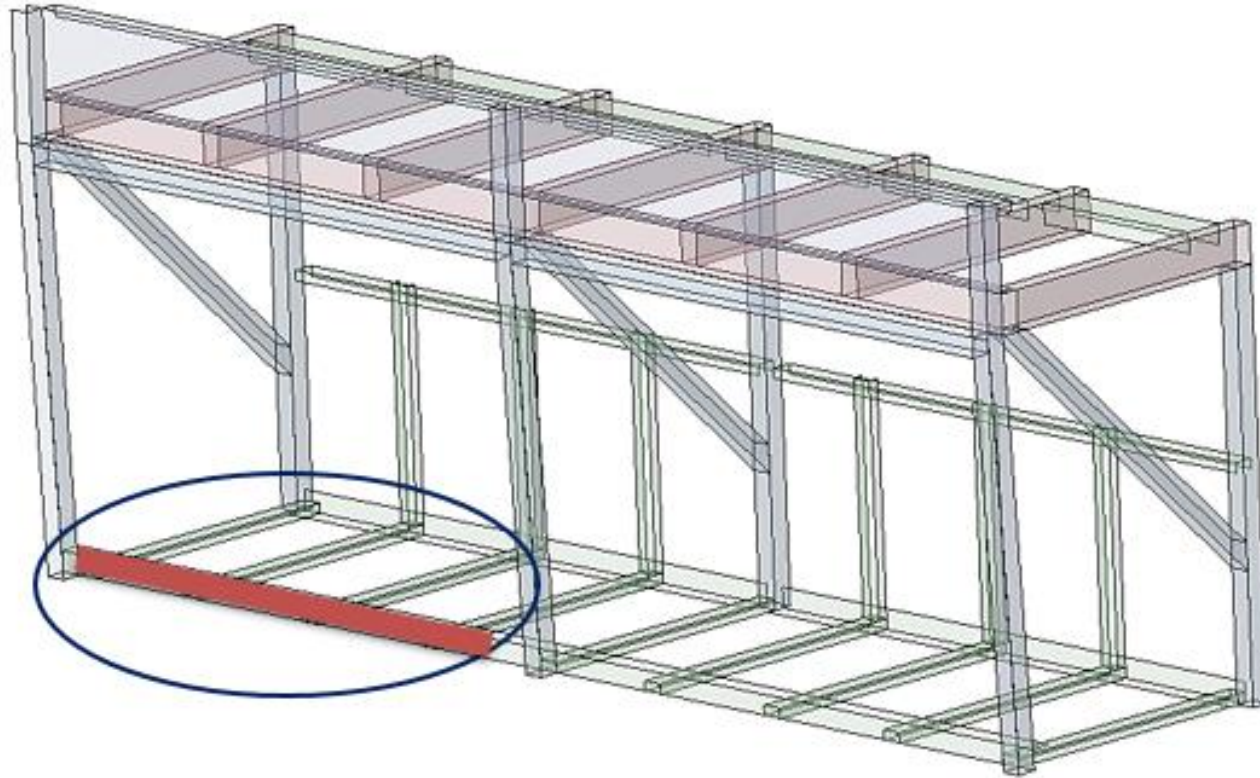




ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA



Se efectúa la misma configuración que en el caso del estudio dinámico realizado anteriormente a toda la estructura.

- Velocidad de impacto: 50 km/h.
- Material: Acero ASTM A500, no lineal.
- Hourglass: Flanagan-Belytschko Stiffnes, con coeficiente 0.1.
- Perfil L 50x50x3.
- Longitud de la barra: 1500mm.

Sección del lateral de la carrocería





IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Fuerza de impacto

Barrera Deformable Móvil (vehículo1):

$$M_1 = 950 \text{ kg}$$

$$v_1 = 13.89 \text{ m/s (Velocidad antes del impacto)}$$

Vehículo de prueba (bus):

$$M_2 = 10782.292 \text{ kg}$$

$$v_2 = 0$$

Duración del impacto:

$$t = 80 \text{ ms} = 0.08 \text{ s}$$





IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Fuerza de impacto

Masa equivalente:

$$\frac{1}{M^*} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}$$

$$M^* = 873.08 \text{ kg}$$

Velocidad común en el pico de contacto:

$$v_0 = \frac{M_1 v_1 + M_2 v_2}{M_1 + M_2}$$

$$v_0 = 1.12 \text{ m/s}$$

$V_2 = v_0$ (Velocidad pos-impacto de cualquier vehículo)





IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Fuerza de impacto

Impulso aplicado al vehículo de prueba

$$S_2 = M_2 v_0$$

$$S_2 = 12076.17 \text{ kg.m/s}$$

$$R_m = \frac{2S_2}{t_0}$$

$$R_m = 301.9 \text{ kN (Fuerza pico de impacto)}$$

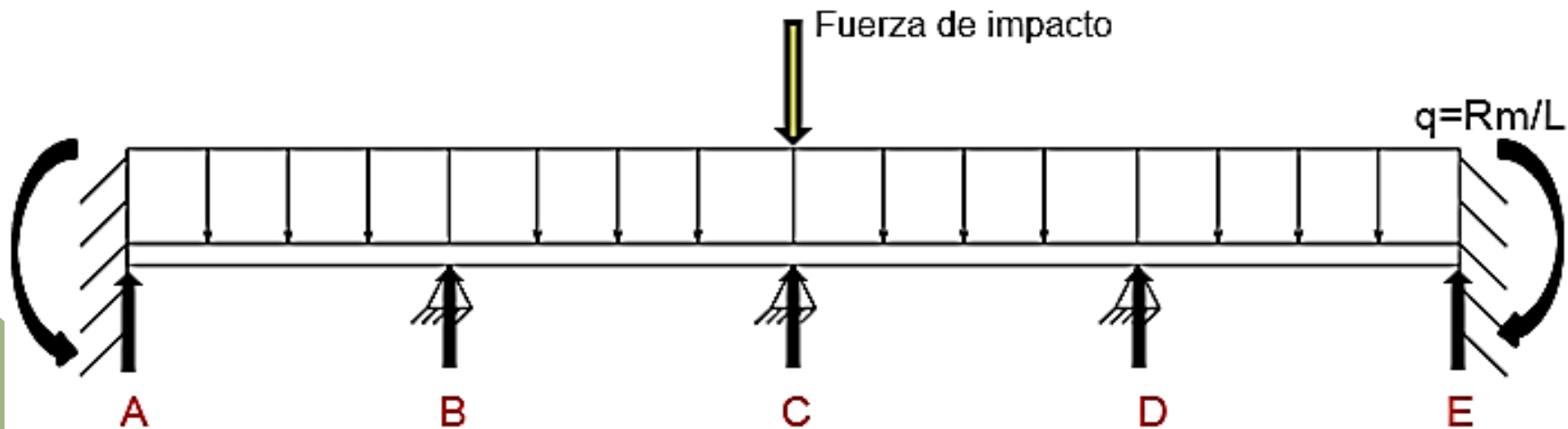




IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Idealización del diagrama de cuerpo libre de la barra

Elemento tratado como viga hiperestática. La fuerza de impacto se asigna como peso distribuido sobre el perfil.





IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Cálculo del esfuerzo máximo producido en zona plástica del miembro estructural

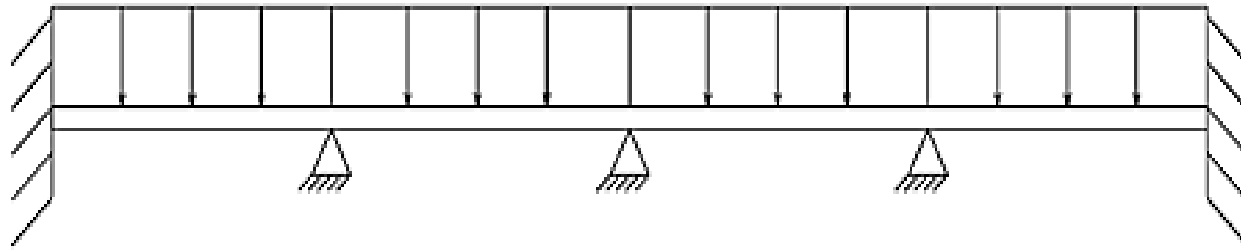
$$R_m = 301.9 \text{ kN}$$

$$l = 1500 \text{ mm (Longitud del perfil)}$$

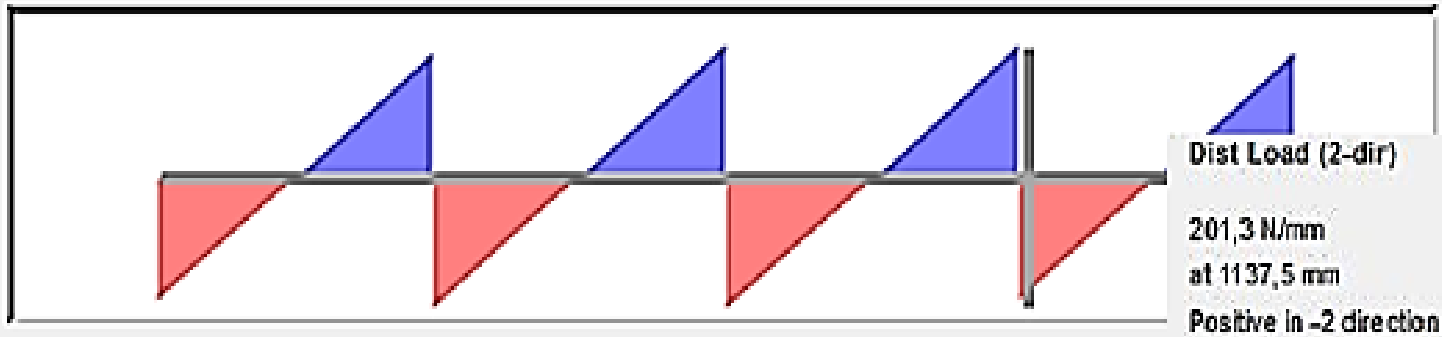
$$q = \frac{R_m}{L}$$

$$q = 201.3 \text{ N/mm (Carga distribuida)}$$

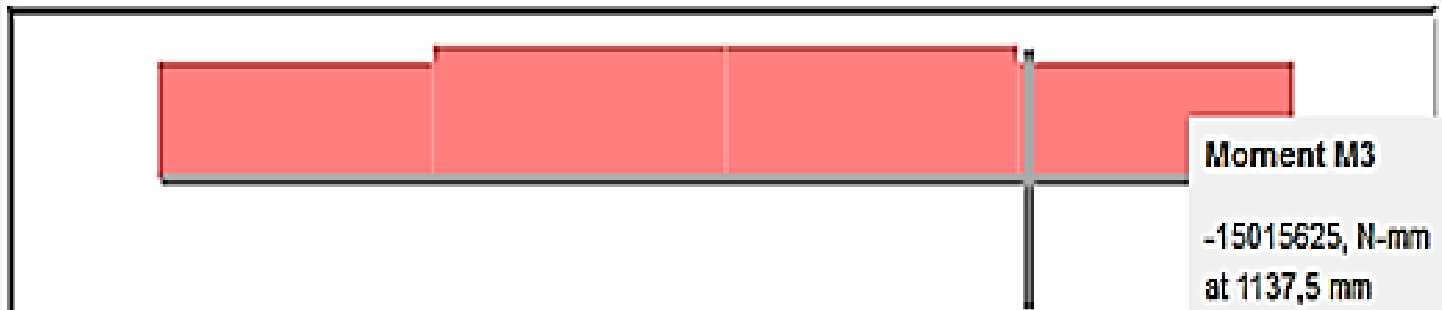




Resultant Shear



Resultant Moment



**Momento Flector:
15015625 N.mm**

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M}{I \cdot c}$$





IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Momento de inercia de la sección transversal del perfil

Region Properties

Selections
Sketch Loop 1
Click to add

Dual Units
Centimeter

Calculate

Area Moments of Inertia with respect to Principal Axes(mm⁴):
Ix = 28793,765
Iy = 114193,25 |

Polar Moment of Inertia = 142987,015 mm⁴

Rotation Angle from projected Sketch Origin to Principal Axes (degrees):
About z axis = 45

Radii of Gyration with respect to Principal Axes(mm):
R1 = 9,947
R2 = 19,81

$$\frac{I}{c} = 142987.015 \text{ mm}^4$$

$$\therefore \sigma_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 105 \text{ MPa}$$





IDEALIZACIÓN DEL MODELO

Simulación de la barra

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Inflation	
<input type="checkbox"/> Patch Conforming Options	
<input type="checkbox"/> Patch Independent Options	
<input type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeaturing	
<input type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	225
<input type="checkbox"/> Elements	176
Mesh Metric	Jacobian Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,0005
<input type="checkbox"/> Max	1,0106
<input type="checkbox"/> Average	1,004
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	1,7458e-003

Detalle del criterio jacobiano en la viga

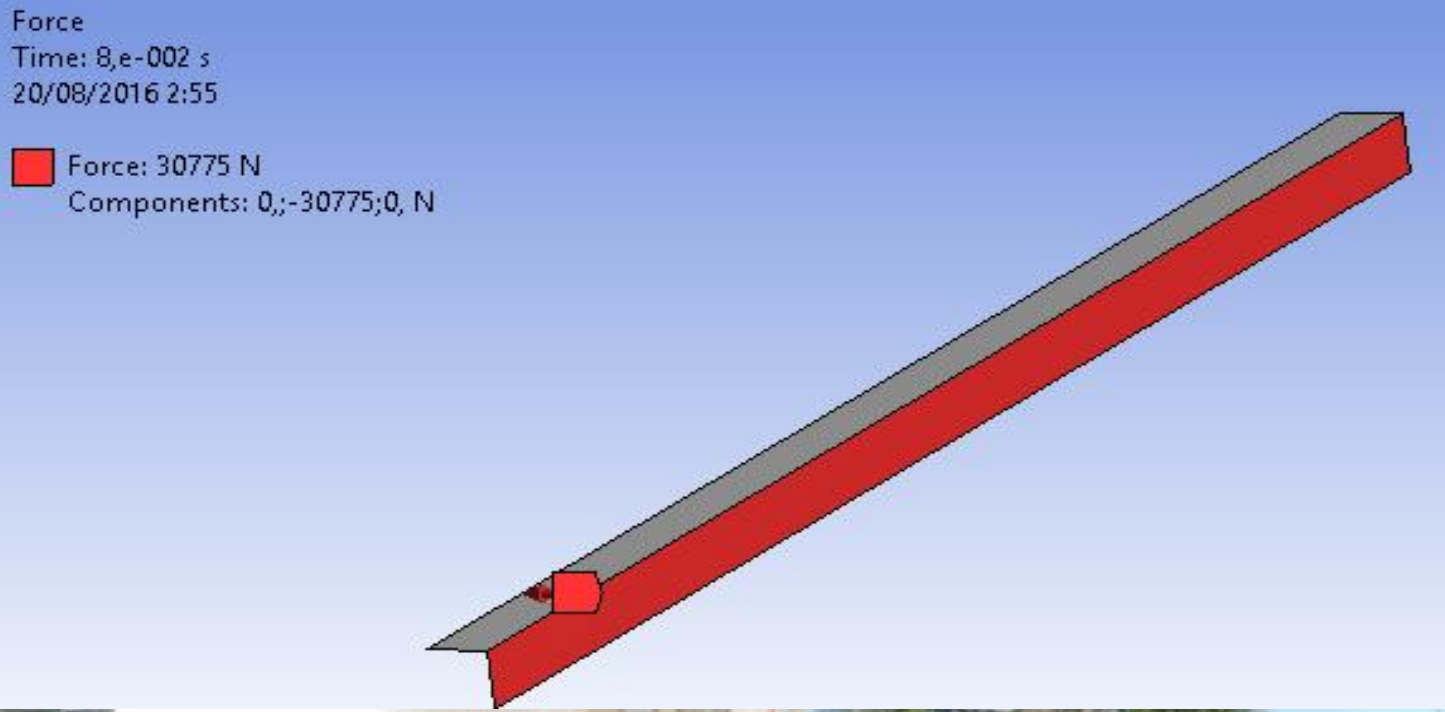




IDEALIZACIÓN DEL MODELO

Simulación de la viga

Fuerza de impacto aplicada sobre el perfil estructural

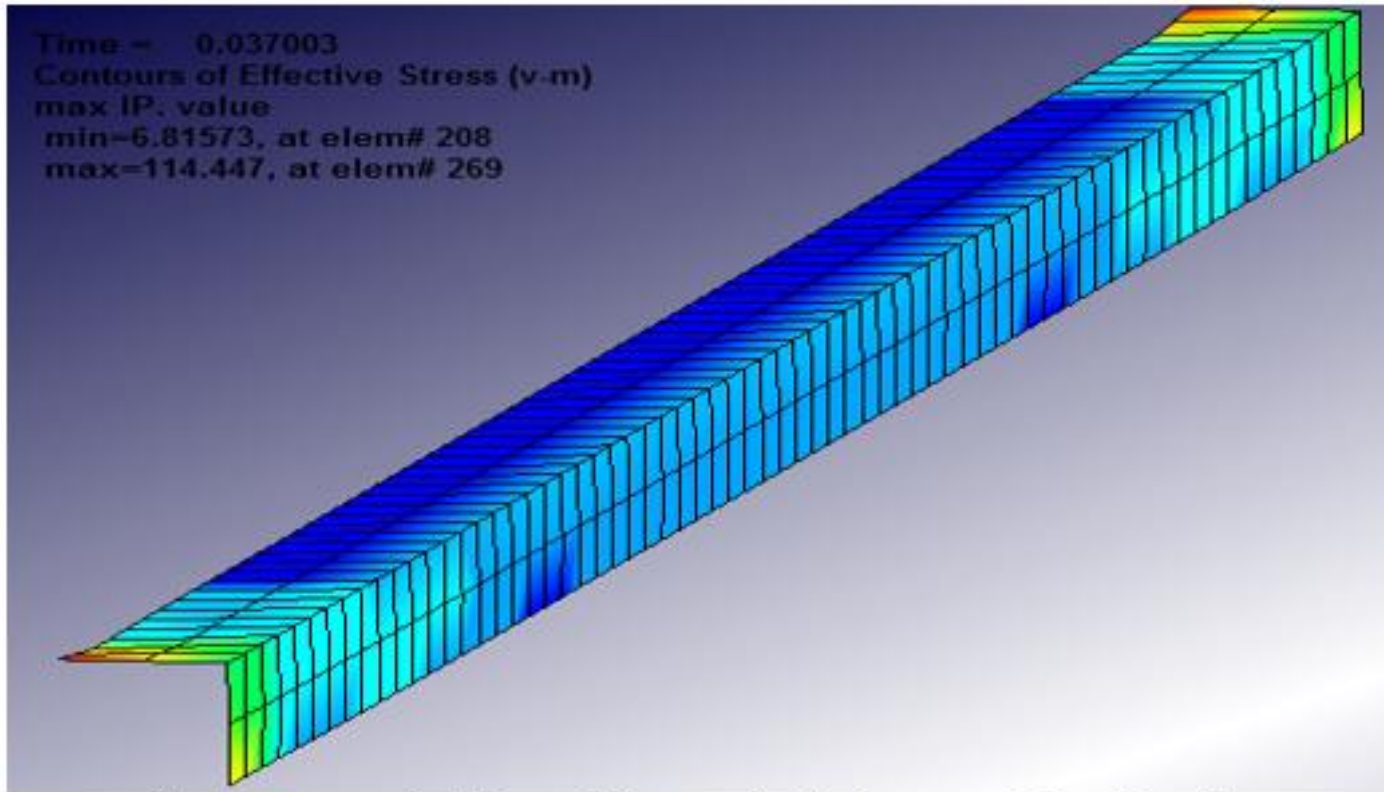




IDEALIZACIÓN DEL MODELO

Simulación de la viga

Esfuerzo de Von Mises de la barra idealizada



Esfuerzo de Von Mises
 $\sigma' = 114 \text{ MPa}$

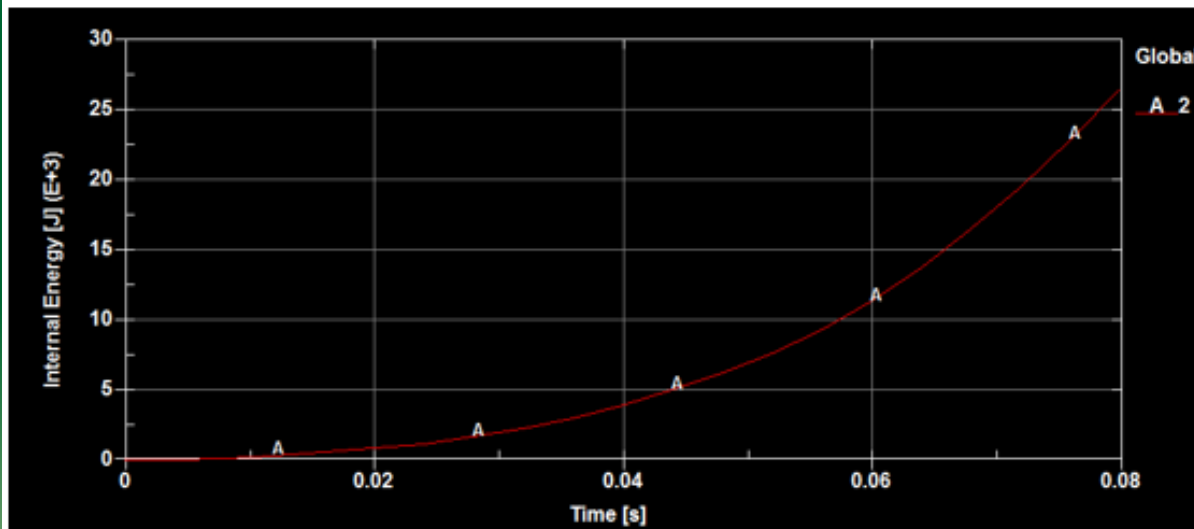
Esfuerzo de Von Mises de la barra idealizada





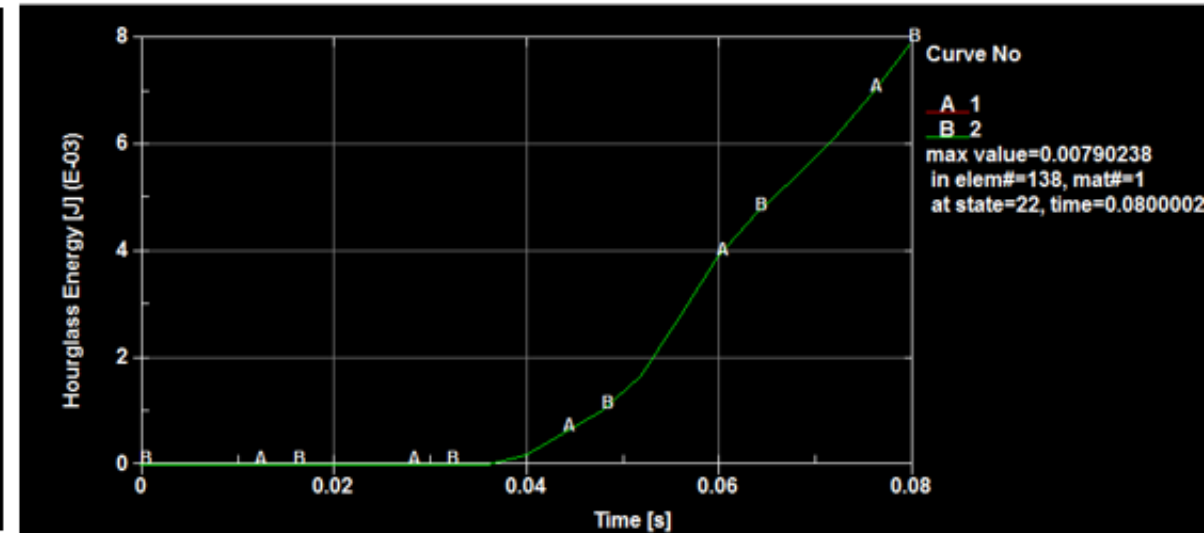
IDEALIZACIÓN DEL MODELO

- Validación del estudio estructural



Energía Interna de la barra idealizada

Energía Interna: 27×10^3 [J]



Energía de Hourglass de la barra idealizada

Energía Hourglass: 0.008 [J]





IDEALIZACIÓN DEL MODELO

- **Validación del estudio estructural**

Relación entre la Energía de Hourglass y la Energía Interna:

$$H = \frac{E.Hourglass}{E.Interna} * 100\%$$

$$H = \frac{0,008J}{27 \times 10^3 J} * 100\%$$

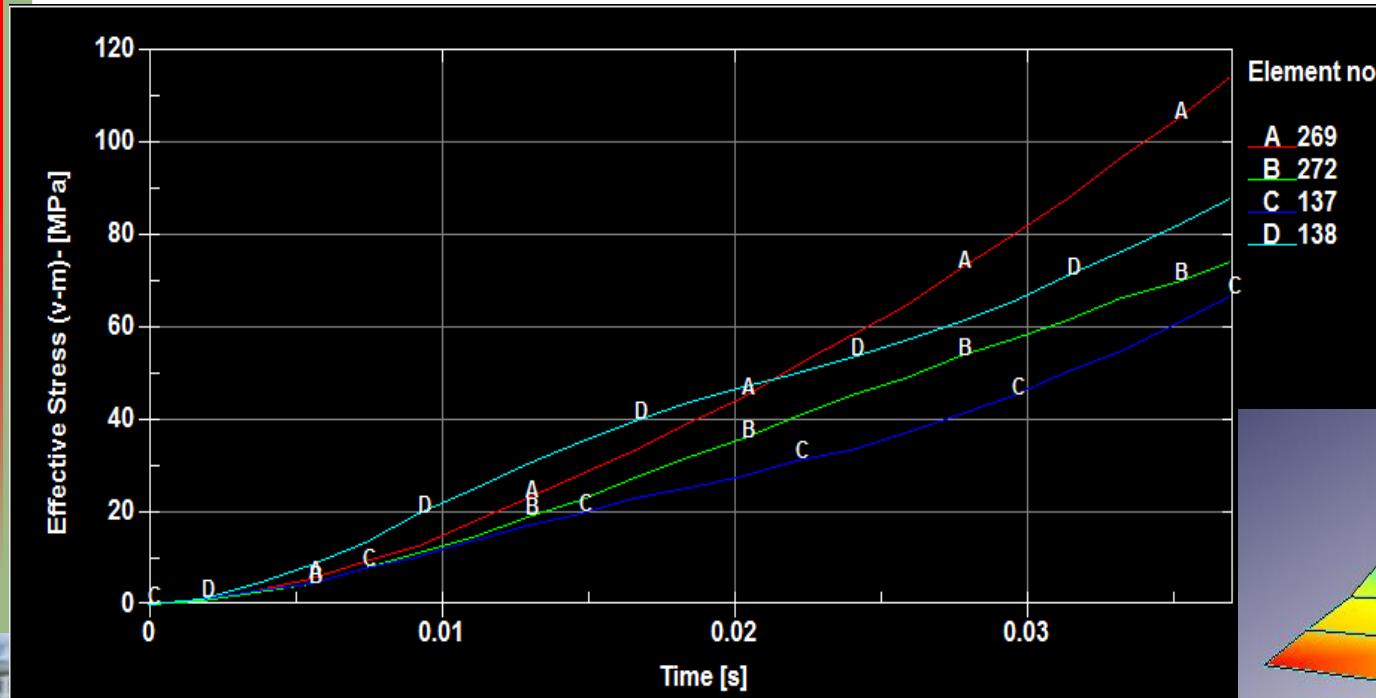
$$H = 0.00003\%; \quad H < 10 \%$$





IDEALIZACIÓN DEL MODELO

- Elementos seleccionados por concentración de esfuerzos de Von Mises

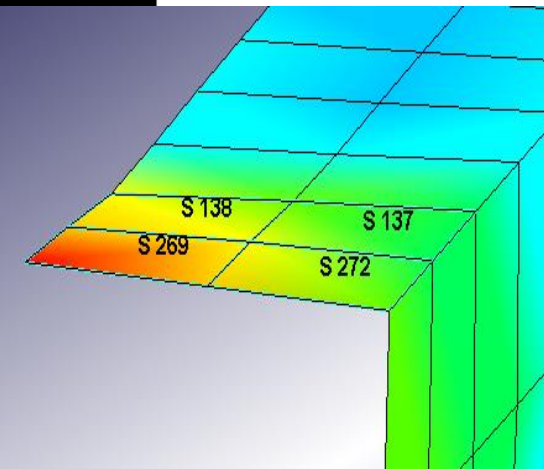


$$\sigma' = 114 \text{ MPa}$$

Elemento: 269

t= 37 ms

Comportamiento elástico.





IDEALIZACIÓN DEL MODELO

- La diferencia porcentual obtenida entre el análisis analítico y computacional

$$\frac{105 \text{ MPa (Analítico)}}{114 \text{ MPa (Computacional)}} * 100\%$$

8% (Aceptable)





CONCLUSIONES

- La geometría de la carrocería es idónea para cumplir con la función de precautelar la seguridad de los pasajeros para el caso de impacto lateral establecido por la regulación R95; ninguna parte del espacio de supervivencia se ve afectado por la proyección del contorno de la estructura deformada.
- Mediante la simulación por MEF, el habitáculo de la carrocería no resulta invadida por ningún miembro estructural; sin embargo la deformación máxima producida en el faldón es de 713 mm, lo cual representa una deformación considerable según las dimensiones de la superestructura.





CONCLUSIONES

- La carrocería cumple con los requisitos establecidos en la Norma NTE INEN 1323:2009 para el análisis cuasi-estático, en lo que respecta a:

Deformación de la estructura en base a combinaciones de cargas.

La máxima deformación de la carrocería se presenta en la combinación 3 del método LRFD con un valor de 21.38mm y se verifica que cumple con lo estipulado en la norma, pues alcanza una deformación del elemento igual o menor a $1/240$ veces su longitud.

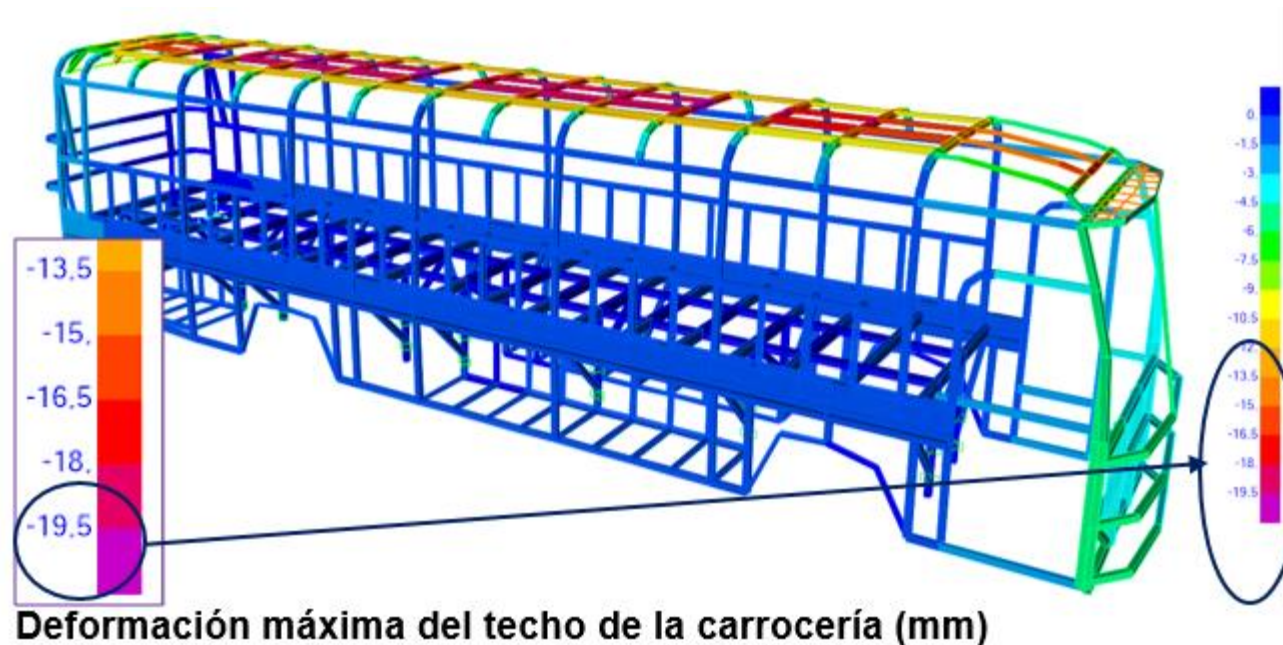




CONCLUSIONES

Resistencia de la estructura

La deformación máxima producida en el techo es de 19.5 mm, en consecuencia el techo soporta la carga estática del 50 % del peso máximo admisible para el chasis, debido a que la estructura presenta una deformación menor de 70 mm.





CONCLUSIONES

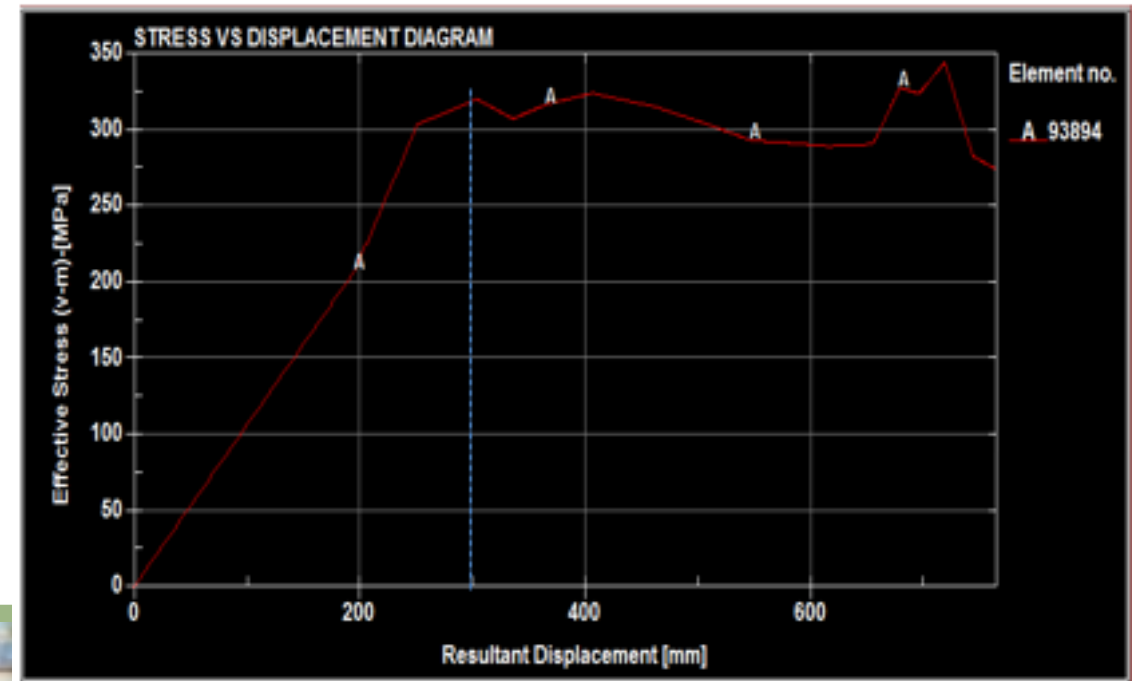
- La relación entre la Energía Interna y la Energía de Hourglass del estudio virtual de impacto lateral es de 0.72%, menor del 10%, lo que demuestra que el estudio estructural se considere válido; los resultados son aceptables bajo las condiciones y características establecidas por la norma R95.





CONCLUSIONES

El elemento crítico seleccionado de la carrocería colapsa en la zona plástica por deformación cuando alcanza un valor en el esfuerzo de 345 MPa; el colapso ocurre a los 71ms, tiempo en el que este experimenta una disminución burda en el esfuerzo.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

- La idealización se realizó con el objetivo de verificar los resultados computacionales del estudio virtual de impacto lateral mediante ecuaciones de análisis estructural. La diferencia porcentual obtenida entre el análisis analítico y computacional es de 8%, lo que se considera aceptable para la idealización del elemento estructural seleccionado de la carrocería.





CONCLUSIONES

- El uso de elementos tipo Shell permite optimizar en lo que respecta al gasto computacional o tiempo de cálculo, ya que este tipo de elementos son satisfactorios para estructuras sometidas a flexión y deformación, como es el caso del impacto lateral; además brinda resultados fiables.





RECOMENDACIONES

- El modelado de la estructura no debe presentar errores de geometría, ya que generan inconvenientes a la hora de realizar el estudio; se puede formar el fenómeno de hourglassing de manera significativa, lo cual invalida el estudio estructural.





ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES

- Utilizar una malla uniforme utilizando elementos cuadriláteros, tetraedros o ladrillos que presentan una excelente distribución de deformación dentro del elemento; los mismos que ofrecen mejores estimaciones de esfuerzo y convergencia de resultados hacia la solución real. Además la relación jacobiana debe estar cercano a 1, lo que demuestra una buena calidad de malla y resultados fiables.





RECOMENDACIONES

- Utilizar la Formulación Flanagan Belytschko Stiffness como modo de control de Hourglass para evitar o disminuir los modos de energía cero de la deformación. El control de reloj de arena se realizó con un coeficiente de 0.1, valor generado por defecto en el análisis dinámico estructural, hay que tener cuidado al aumentar estos coeficientes, ya que el exceso de rigidez pueden causar inestabilidades en el estudio cuando pasa de 0.15.





RECOMENDACIONES

- En Ecuador se debería implementar una normativa que regule la realización de ensayos virtuales de impacto, que permita validar la estructura de una carrocería y prescriba las condiciones y parámetros para la homologación y calificación de empresas carroceras.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos virtuales de impacto lateral en Ecuador a mayores velocidades que las establecidas en la regulación ECE R95, ya que la velocidad máxima de circulación en carretera establecida en normativas nacionales superan esta velocidad.

