



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA AUTOPORTANTE PARA UN BUS INTERPROVINCIAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PRODUCCIÓN EN SERIE**

**AUTOR:**

**LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY**

**DIRECTOR: ING. GUIDO TORRES**

**2017**





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN



# ANTECEDENTES

- Mejorar las características constructivas
- Se han desarrollado diferentes tipos de carrocerías para autobuses
- Bus autoportante es una estructura integral
- Años atrás, la estructura se basaba en un chasis y una carrocería

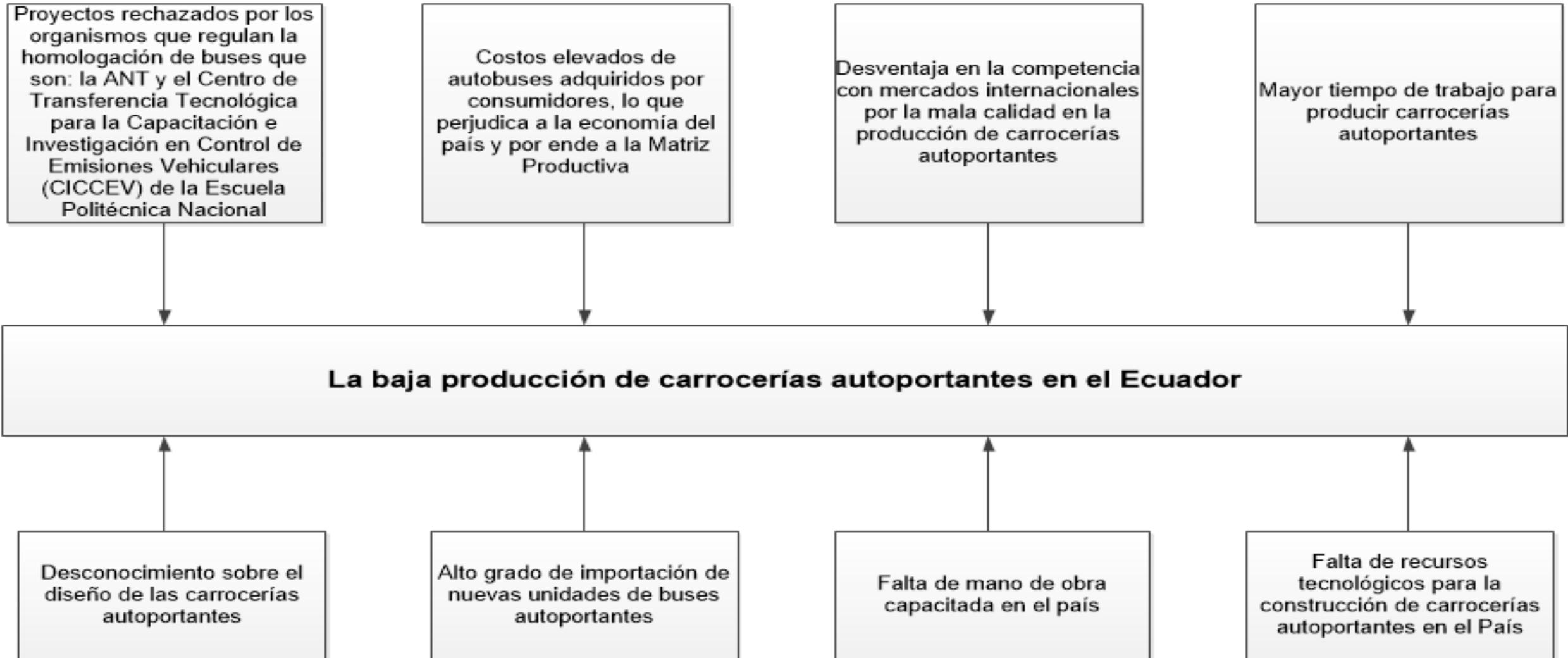


# ANTECEDENTES

- En el Ecuador, Carrocerías Cepeda Cía. Ltda. Fue la primera carrocera autorizada para fabricar buses autoportantes en el país
- En Julio de 2016 en la ciudad de Latacunga, Construcciones Mecánicas Albán (CMA), Secohi y la compañía china Higer Bus presentaron el primer prototipo de modelo de 'bus autoportante' con el objetivo de iniciar la fabricación en serie de estas unidades



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



# ***JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA***

- Los buses de tipo autoportantes se encuentran en proyectos de implementación en las carrocerías del país
- Por esta razón fue importante realizar esta investigación para generar un diseño seguro y confiable para la producción en serie
- Además, es provechosa para las empresas dedicadas a la construcción de estructuras metálicas carroceras

# ***OBJETIVO GENERAL***

- Realizar el análisis estructural de una carrocería autoportante para un bus interprovincial mediante elementos finitos para la producción en serie

# OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener información útil para la desarrollo del proyecto de investigación
- Analizar Normas y Reglamentos Técnicos Ecuatorianos INEN para el buen desempeño y dimensionamiento del diseño de una carrocería de un bus autoportante.
- Determinar cargas y materiales constructivos para el diseño de la carrocería autoportante
- Realizar el modelado en 3D de la carrocería de un bus interprovincial tipo autoportante a través de Software CAD

# OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar simulaciones estáticas, de deformaciones de la carrocería por el método de elementos finitos, que nos permitan obtener resultados ingenieriles sobre la geometría elaborada y los materiales utilizados en la construcción de una carrocería autoportante
- Ejecutar la simulación virtual de túnel de viento en el Software CAD
- Elaborar un análisis de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la simulación y en el diseño elaborado a fin de constatar el cumplimiento de la resistencia y buen funcionamiento de las estructuras de buses para el servicio de transporte de personas.



# HIPÓTESIS

- El diseño y análisis estructural de una carrocería autoportante para un bus interprovincial permitirá obtener un diseño seguro y confiable que cumpla con las normativas vigentes para la producción en serie de este tipo de modelo efectuada en Carrocerías M&L





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# MARCO TEÓRICO



# ***VEHICULOS PARA EL TRANSPORTE DE PASAJEROS***

- Transporte Institucional
- Transporte de turismo
- Transporte Urbano
- Transporte Intraprovincial
- Transporte Interprovincial



# ***UNIDAD DE TRANSPORTE INTERPROVINCIAL***

- Es considerado como bus interprovincial a un vehículo automotor el cual, está diseñado para transportar personas y equipaje para viajes a largas distancias





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# COMPONENTES ESTRUCTURALES PRINCIPALES DE UNA UNIDAD DE TRANSPORTE DE PASAJERO



# ***BASTIDOR DEL CHASIS***

- Al inicio los chasis para buses eran suministrados por empresas fabricantes de camiones con motor frontal. En la figura se visualiza el chasis Mercedes Benz O500R 18/30 para carrocería autoportante.

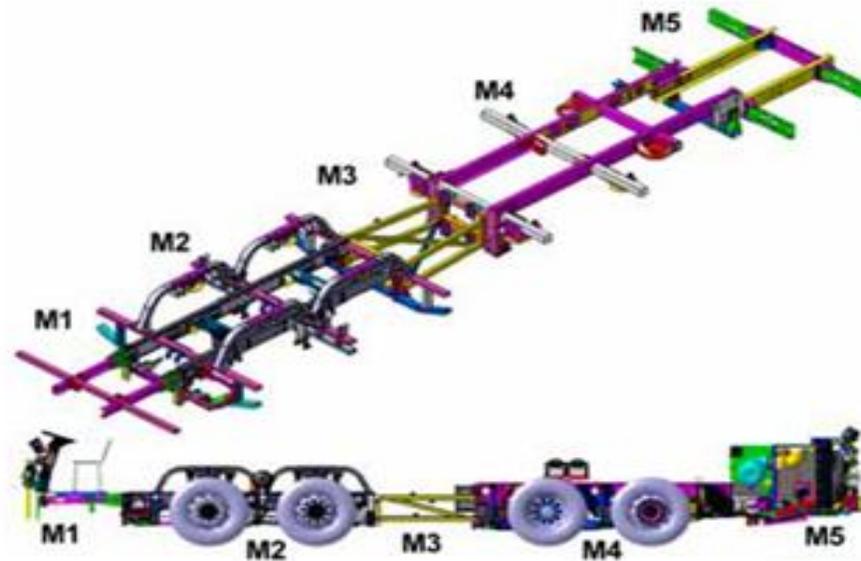


**Figura Chasis Mercedes Benz O500 R18/30**

Fuente **Mercedes Benz**entes que se monten en la unidad

# DISEÑO DEL BASTIDOR

- El diseño del bastidor del chasis se hace tomando en cuenta la carga que va a soportar, el tamaño final del vehículo y las condiciones de uso



Módulo delantero  
M1 Región del voladizo delantero  
M2 Región de la suspensión delantera  
M3 Región de entre ejes

Módulo posterior  
M4 Región de la suspensión posterior  
M5 Región del voladizo posterior

# MATERIALES DEL BASTIDOR

## Acero EN10149

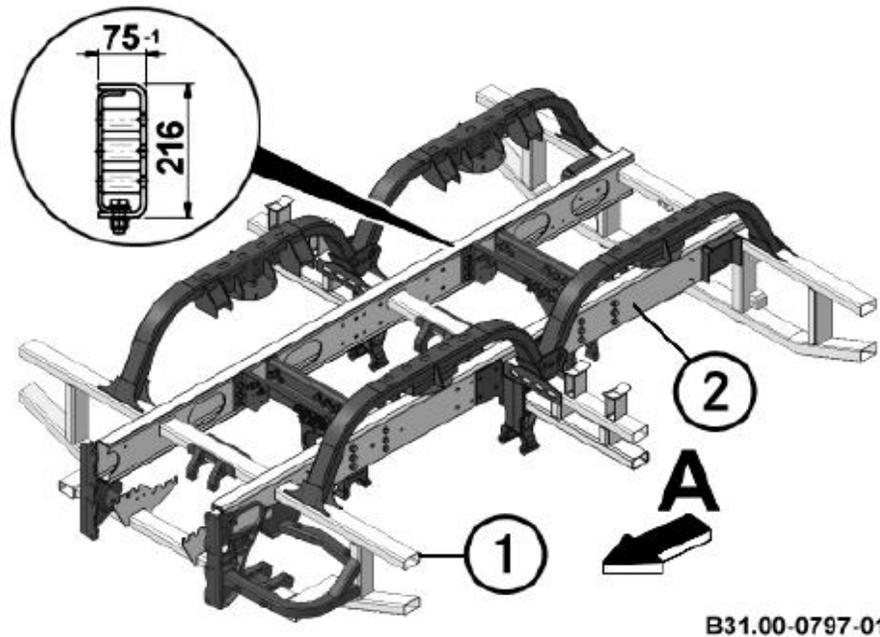
### Propiedades Mecánicas

- $S_y \geq 265 \text{ MPa}$
- $S_u = 410 - 560 \text{ Mpa}$
- Alargamiento  $\geq 20\%$

## Tubo DIN 2395

### Propiedades Mecánicas

- $S_y \geq 235 \text{ MPa}$
- $S_u = 360 - 470 \text{ Mpa}$
- Alargamiento  $\geq 23\%$



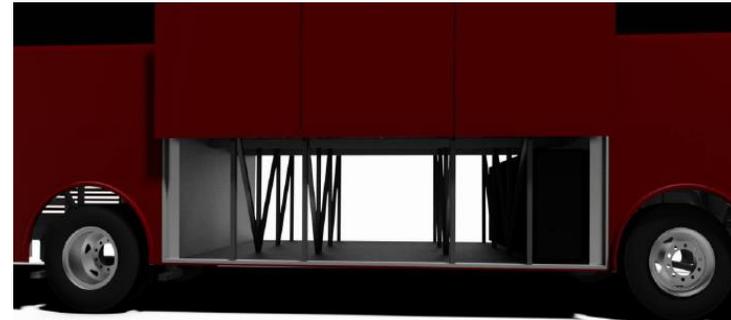
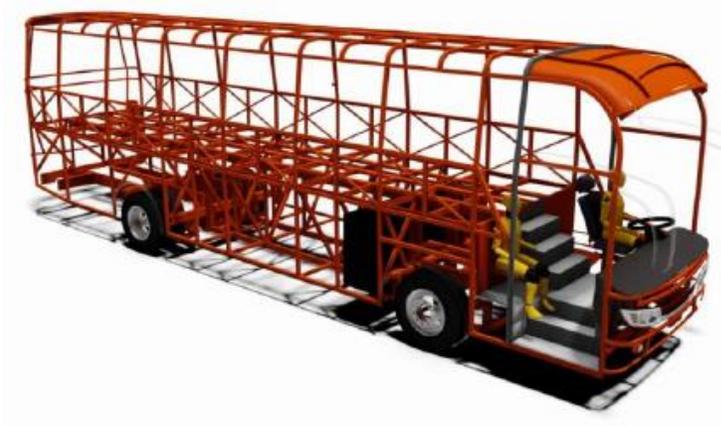
# CARROCERÍA

- La carrocería es aquella parte del vehículo cuyo cuerpo estructural es destinado al alojamiento de los pasajeros, la cual debe soportar las fuerzas estáticas y dinámicas al estar en movimiento



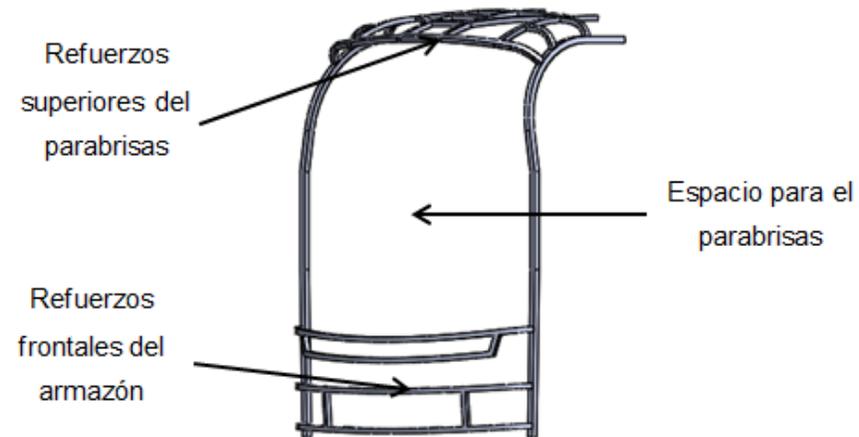
# CARROCERÍA AUTOPORTANTE

- Un bus autoportante es una estructura integral, la cual sirve de apoyo o soporte a otros componentes, formando una unidad.



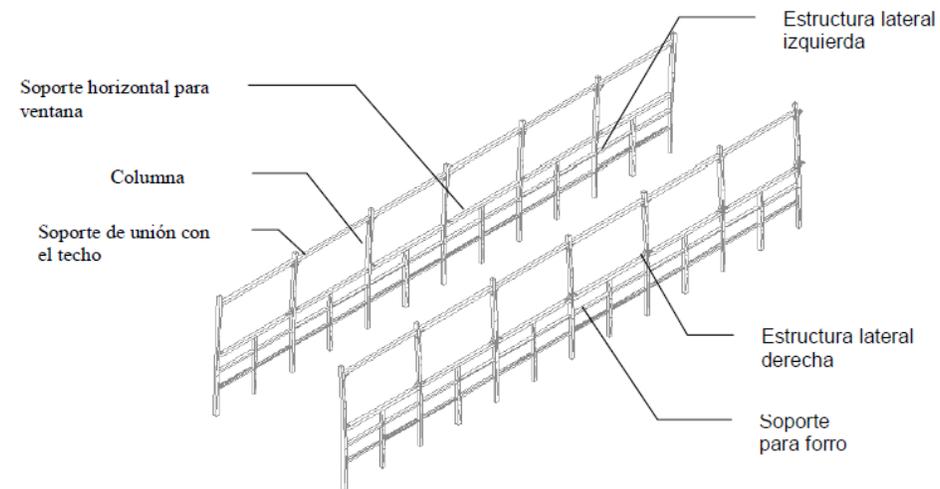
# ARMAZÓN DELANTERO

- El armazón delantero es una estructura de soporte, fijación y unión de elementos de la carrocería



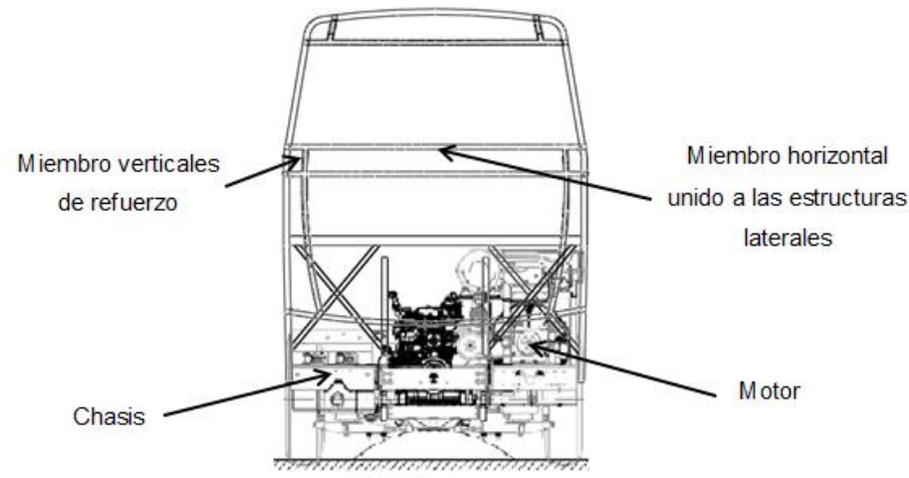
# ARMAZÓN CENTRAL

- El conjunto estructural central está conformado por columnas metálicas que van de izquierda a derecha formando arcos uniformes también llamados pórticos



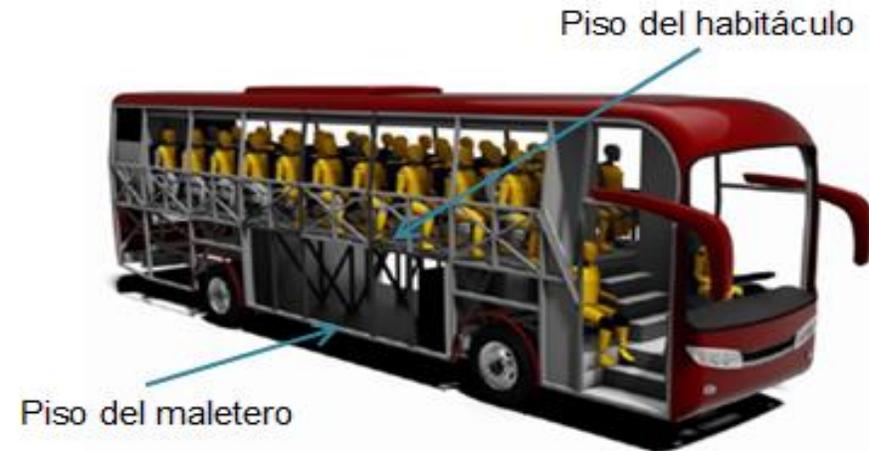
# ARMAZÓN POSTERIOR

- El conjunto estructural del armazón posterior se construye de manera reforzada ya que debe soportar el motor, sobre ella descansa el panel posterior, además ofrece resistencia ante colisiones



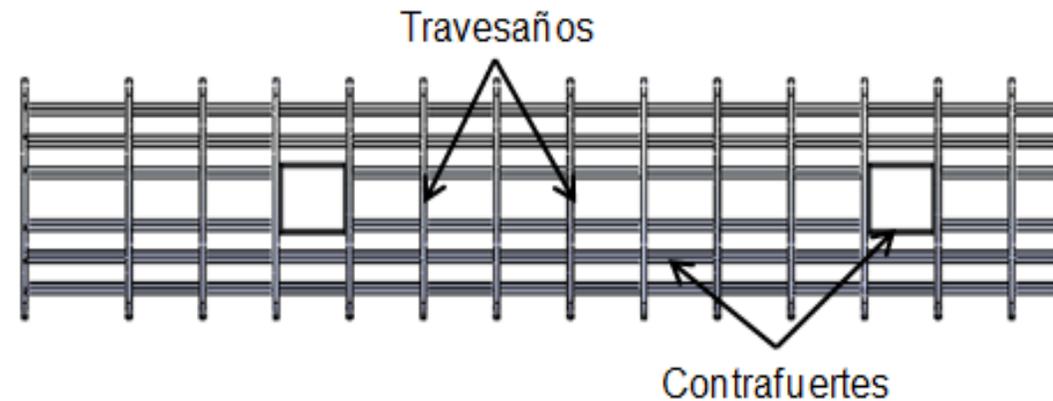
# ARMAZÓN DEL PISO

- El piso del vehículo se divide en dos partes:
  - Piso para el habitáculo
  - Piso para el maletero



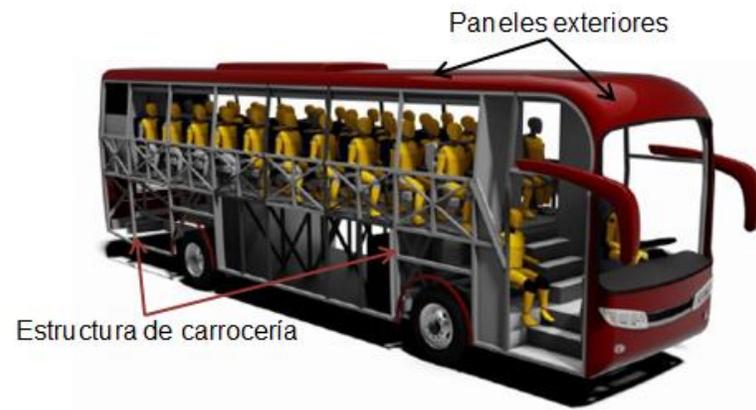
# ARMAZÓN DEL TECHO

- El conjunto estructural superior debe resistir una carga estática distribuido uniformemente sin experimentar deformaciones en ningún punto



# PANELES EXTERIORES

- Los paneles exteriores se encargan de brindar el aspecto estético al bus, están continuamente expuestos al agua de la lluvia, polvo y demás circunstancias climáticas adversas



# ***NORMAS PARA EL DISEÑO DE CARROCERÍA DE BUS***

- La presente investigación estuvo fundamentada bajo las siguientes normativas y reglamentos:
- Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 1323
- Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 043



# ***NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1323:2009***

## **Cargas estáticas aplicadas a la carrocería del bus**

### **Carga Muerta (M)**

- Peso total de la carrocería en condiciones de funcionamiento.

$$M = m \times g$$

### **Carga Viva (V)**

- Peso de las personas con su equipaje

$$V = (mp + eq) \times g$$



# ***NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1323:2009***

## **Cargas estáticas aplicadas a la carrocería del bus**

### **Carga de Frenado (F)**

- Producida por la disminución de velocidad

$$F = (M + mp + eq) \times a$$

### **Carga de Aceleración Brusca (Ab)**

- Producida por la aceleración brusca

$$Ab = -F$$



# ***NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1323:2009***

## **Cargas estáticas aplicadas a la carrocería del bus**

### **Carga de Giro (G)**

- Fuerza centrífuga al ingresar a una curva.

$$G = (M + mp + eq) \times \frac{v^2}{rc}$$

### **Carga por Resistencia al Aire Frontal (Raf)**

- Cargas de resistencia al avance producida por el aire

$$R_{af} = \frac{1}{2} (Cx) * \rho * Af * V^2$$



# NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1323:2009

## Método ASD (Allowable Strength Design)

1	M
2	M + V
3	M + V + G
4	M + V + F
5	M + V + F + <u>Raf</u>
6	M + V + <u>Raf</u>
7	M + V + Ab
8	M + V + Ab + <u>Raf</u>

Fuente: (NTE INEN 1323, 2009)

## Método LRFD (Load Resistance Factor Design)

1	1,4M + V
2	1,2M + 1,6V + 0,5G
3	1,2M + 0,5V + 1,6G
4	1,2M + 1,6F + 0,8Raf
5	1,2M + 0,5V + 0,5F + 1,3Raf
6	1,2M + 1,5Ab + 0,5V
7	0,9M – 1,3Raf
8	0,9M + 1,3Raf

Fuente: (NTE INEN 1323, 2009)



# ***DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR***

El proceso de CAD consiste en cuatro etapas.

- Modelado geométrico
- Análisis y optimización del diseño
- Revisión y evaluación del diseño
- Documentación y dibujo (drafting):



# ***INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR***

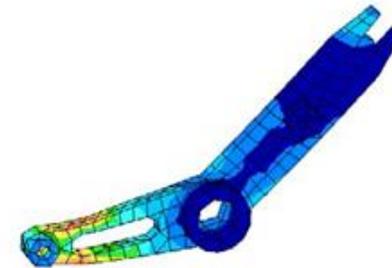
El proceso de CAE consiste en tres etapas.

- Pre procesado
- Solución
- Post proceso



# MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

- El método de elementos finitos, es un método numérico empleado para la solución de problemas de ingeniería que involucran un alto grado de complejidad



# ***MALLADO***

- El proceso de subdividir el modelo en pequeñas partes se llama mallado.
- El tamaño de mallado es muy importante para predecir la falla de un material.



# CALIDAD DE MALLA

## Calidad de malla según el Criterio Jacobiano



Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
-1,00 / -0,6	-0,5 / -0,2	-0,1 / 0,00	0,00 / 0,1	0,2 / 0,5	0,6 / 1,00

## Calidad de malla ortogonal



Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
0 - 0,001	0,001 – 0,14	0,15 – 0,20	0,20 – 0,69	0,70 – 0,95	0,95 – 1,00

## Calidad de malla asimétrica



Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable
0 - 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,80	0,80 – 0,94	0,95 – 0,97	0,98 – 1,00





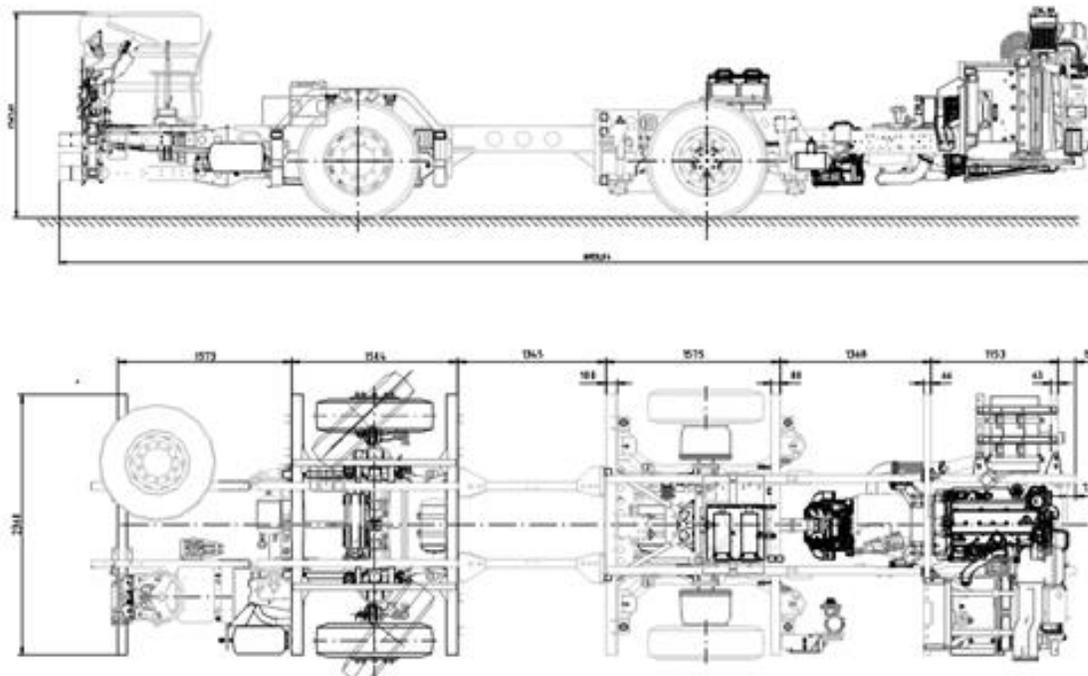
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# INGENIERÍA ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA DE BUS AUTOPORTANTE



# CHASIS UTILIZADO EN CARROCERÍA AUTOPORTANTE

Para la construcción de buses interprovinciales autoportantes, Carrocerías M&L utilizará el chasis para bus Mercedes Benz O500 R/1830/30



Largo total carrozado	13200 mm
-----------------------	----------

## CARACTERÍSTICAS

Peso bruto vehicular	18500 kg
----------------------	----------

Peso del chasis	5866 kg
-----------------	---------

## MOTOR

Modelo	MB OM 926 LA
--------	--------------

Potencia máxima	225 KW (306 cv) a 2200 rpm
-----------------	----------------------------



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# MATERIAL EMPLEADO EN EL ARMAZÓN DE LA CARROCERÍA AUTOPORTANTE

De acuerdo a la Normativa (INEN 2415, 2016) que “trata sobre los requisitos mecánicos de la tubería, la cual debe cumplir con las especificaciones de esfuerzos a la tracción, fluencia y porcentajes de elongación

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



# ACERO ASTM A36

## Acero ASTM A36 - Ventajas

<b>“Alta resistencia</b>	La alta resistencia del acero por unidad de peso desarrolla el poco peso de la estructura
<b>Uniformidad</b>	Las propiedades del acero no cambian apreciablemente con el tiempo
<b>Durabilidad</b>	Con mantenimiento adecuado la estructura de acero durará indefinidamente
<b>Ductilidad</b>	Propiedad que tiene un material para soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión
<b>Tenacidad</b>	Propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades
<b>Facilidad para unir varios miembros</b>	Soldadura, tornillos, remaches
<b>Posibilidad de prefabricar los miembros de una estructura</b>	Variedad de formas y tamaños”



# ACERO ASTM A36

## Acero ASTM A36 - Desventajas

<b>“Costo de mantenimiento</b>	La mayor parte de los aceros son susceptibles a la corrosión al estar expuestos al agua y aire; deben pintarse periódicamente
<b>Susceptibilidad al pandeo</b>	Entre más largos y esbeltos son los miembros a compresión, mayor es el riesgo de pandeo
<b>Corrosión</b>	A la intemperie se forma óxido de hierro en su superficie, al no combatirse el acero queda completamente corroído”



# ACERO ASTM A36

Propiedades mecánicas del Acero ASTM A36 utilizado en la construcción de la carrocería autoportante

PROPIEDADES MECÁNICAS	
ASTM A-36	Módulo de elasticidad $E = 200\,000 \text{ Mpa}$
	Resistencia a la fluencia $S_y = 250 \text{ MPa}$ $S_y = 36 \text{ Ksi}$ $S_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$
	Resistencia a la tracción máxima $S_u = 460 \text{ Mpa}$ $S_u = 66,7 \text{ Ksi}$ $S_u = 4690,69 \text{ Kg/cm}^2$
	Radio de Poisson $\nu = 0,27$
	Densidad $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$



# ACERO ASTM A 500

## Ventajas del acero ASTM A 500 como material estructural

- Facilidad para unir varios miembros mediante soldadura, tornillos, remaches
- Variedad en tipos de perfilería: Cuadrada, rectangular, circular, entre otros
- Bajo costo de adquisición
- Material reutilizable



## Desventajas del acero ASTM A 500 como material estructural

- Acero inadecuado para someterlo a cargas dinámicas
- Susceptible a la fatiga y pandeo.
- Costo de mantenimiento elevado.
- Protección contra fuego.

# ACERO ASTM A 500

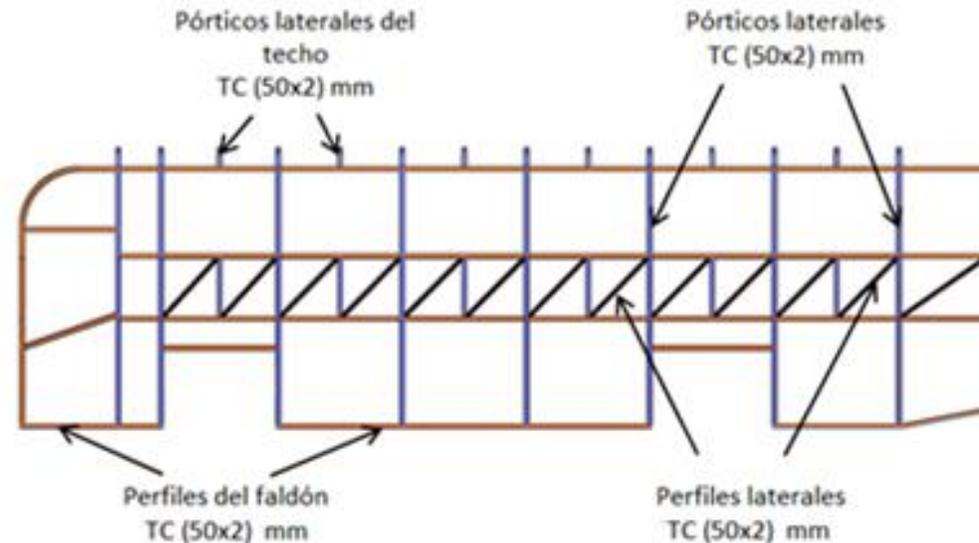
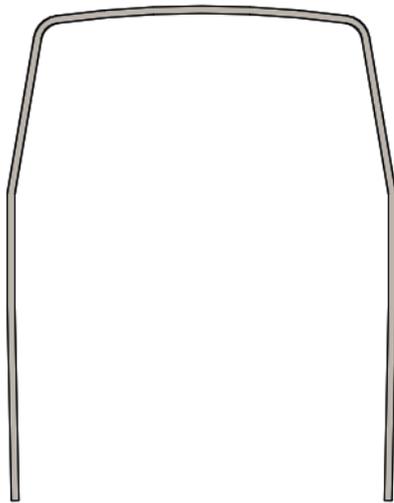
Propiedades mecánicas de perfil ASTM A 500 utilizados en la construcción de la carrocería autoportante.

<b>ASTM A-500</b>	Módulo de elasticidad $E = 200\,000 \text{ Mpa}$
	Resistencia a la fluencia $S_y = 320 \text{ MPa}$ $S_y = 46 \text{ Ksi}$ $S_y = 3235 \text{ Kg/cm}^2$
	Resistencia a la tracción máxima $S_u = 430 \text{ Mpa}$ $S_u = 58 \text{ Ksi}$ $S_u = 4360 \text{ Kg/cm}^2$
	Radio de Poisson $\nu = 0,27$
	Densidad $d = 7850 \text{ Kg/m}^3$



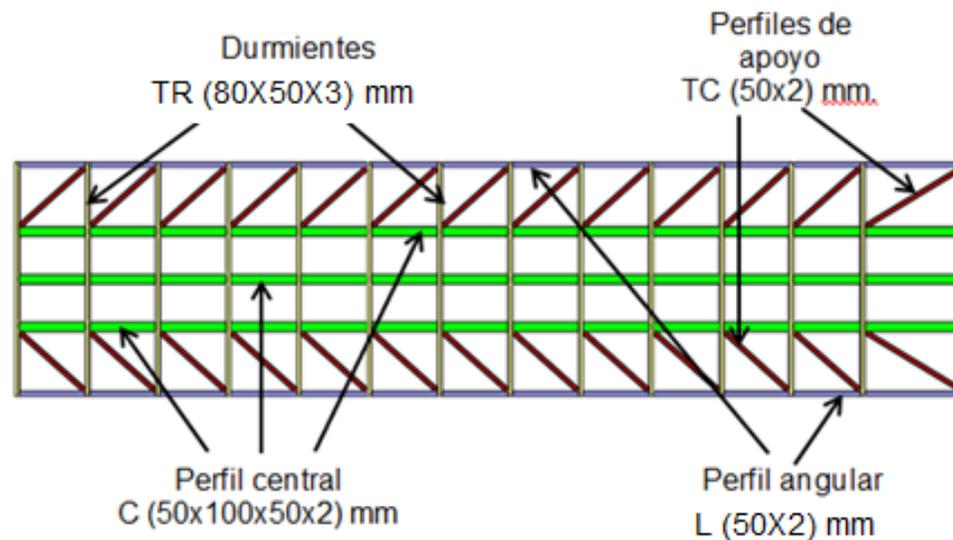
# GEOMETRÍA ESTRUCTURAL DE LOS ARMAZONES LATERALES

La estructura del armazón lateral es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500 unidos mediante soldadura, estableciéndose un sistema estructural de nodos rígidos



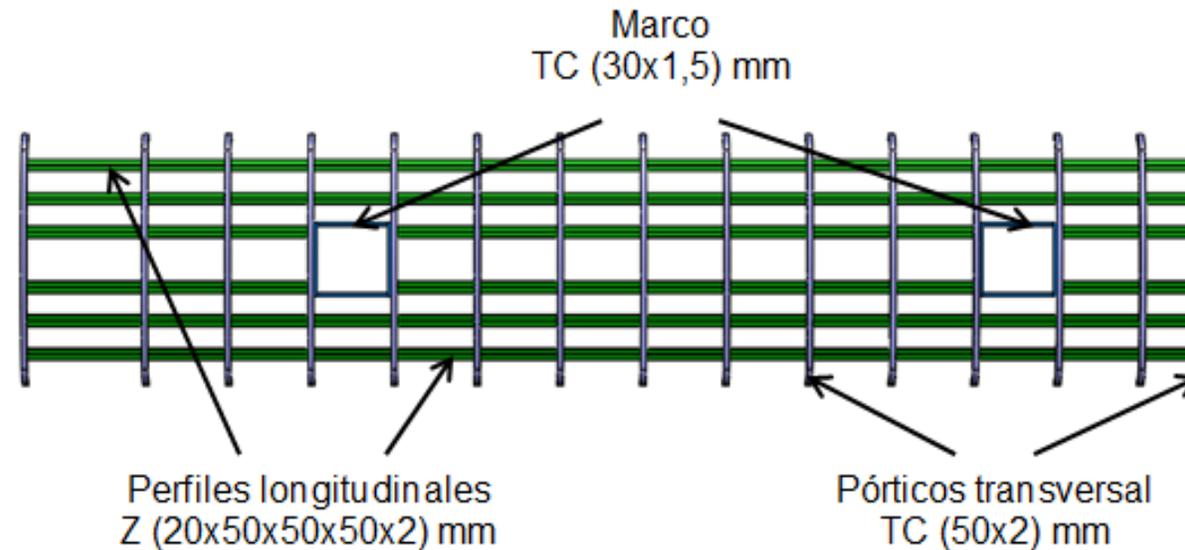
# GEOMETRÍA ESTRUCTURAL DE LA PLATAFORMA – PISO

Los perfiles principales (durmientes) es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500



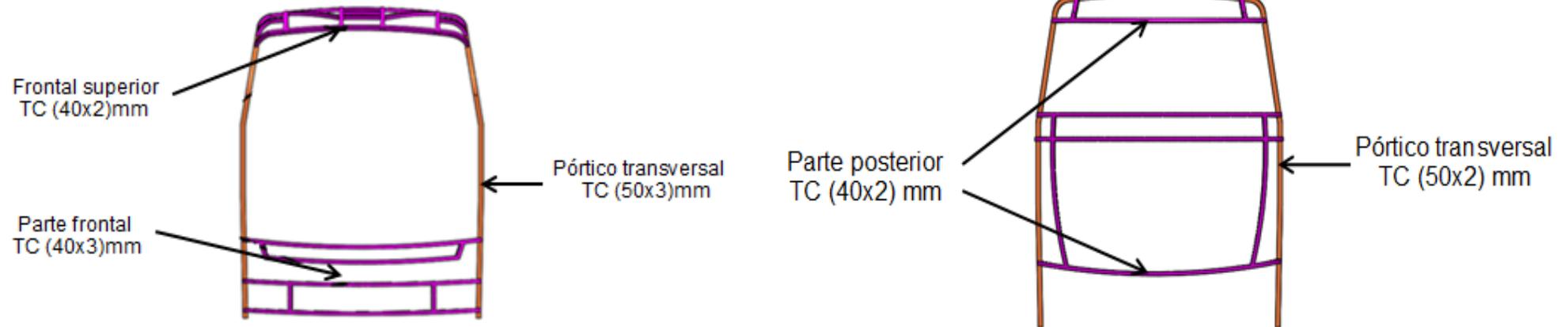
# GEOMETRÍA ESTRUCTURAL DEL TECHO.

- Es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500



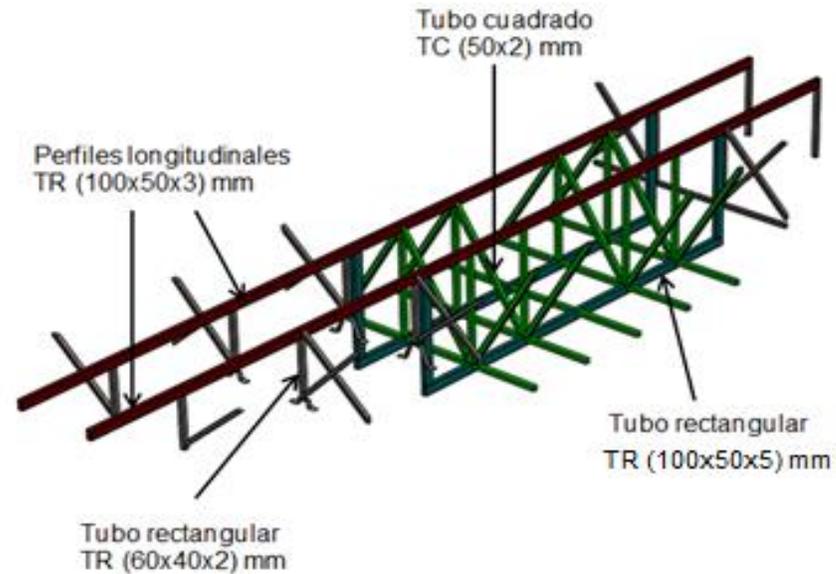
# GEOMETRÍA ESTRUCTURAL DEL FRENTE Y POSTERIOR.

Su configuración estructural es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500.



# GEOMETRÍA ESTRUCTURAL DE PLATAFORMA Y ANCLAJES

Los perfiles principales es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

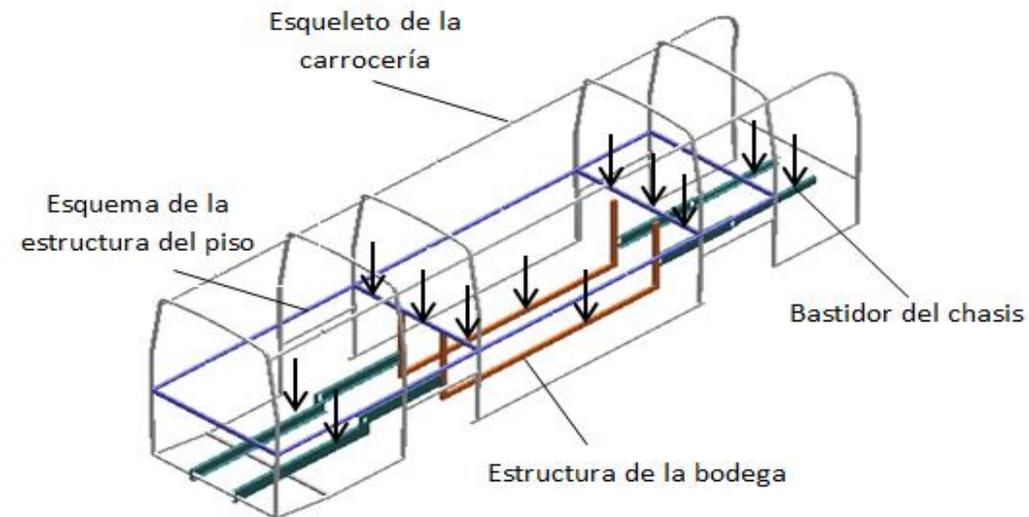
# Estudio de las fuerzas que actúan sobre la carrocería

- Criterio de efectos producidos



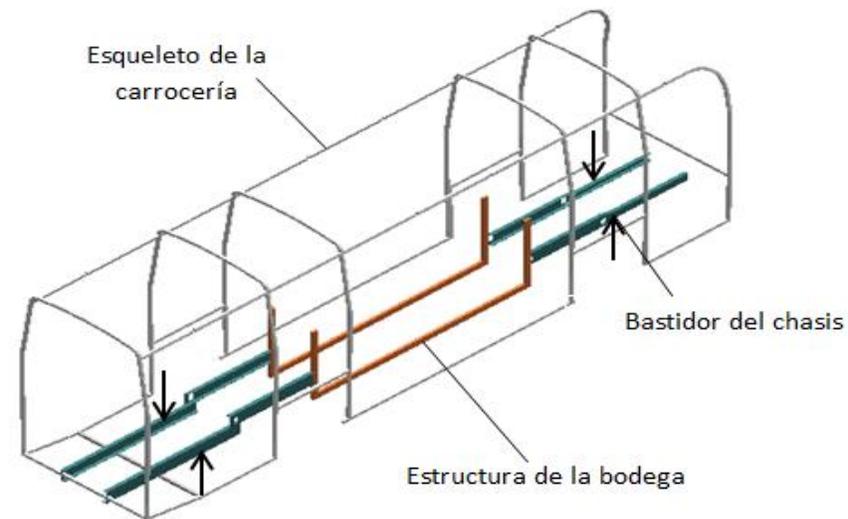
# CARGAS DE FLEXIÓN

Las cargas de flexión son aquellas que provocan deflexión en las vigas que conforman la carrocería



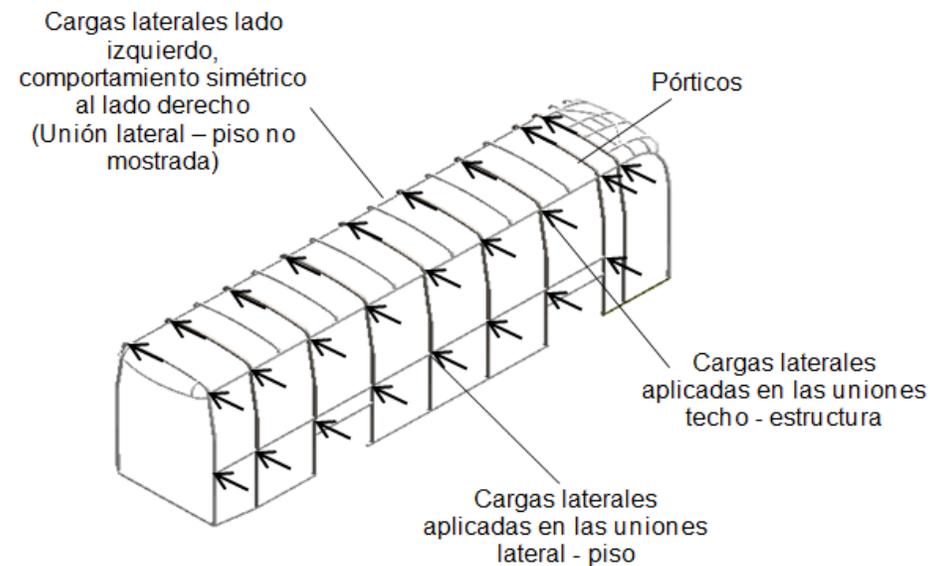
# CARGAS TORSIONALES

- Son las fuerzas que tratan de torcer la carrocería, y que se presentan a los costados de la misma en direcciones contrarias



# CARGAS LATERALES

Las cargas laterales se producen durante giros rápidos donde la unidad está sometida a una aceleración centrífuga





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

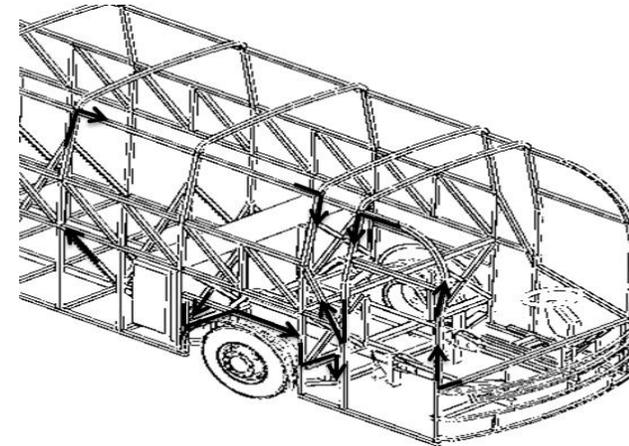
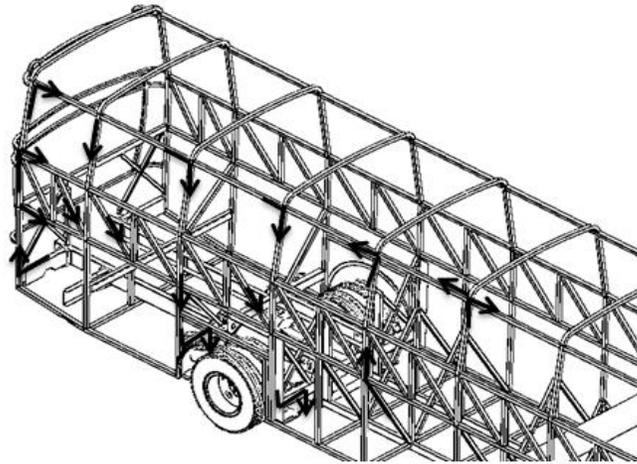
# Estudio de las fuerzas que actúan sobre la carrocería

- Criterio de magnitud y dirección (Fuerzas dinámicas)



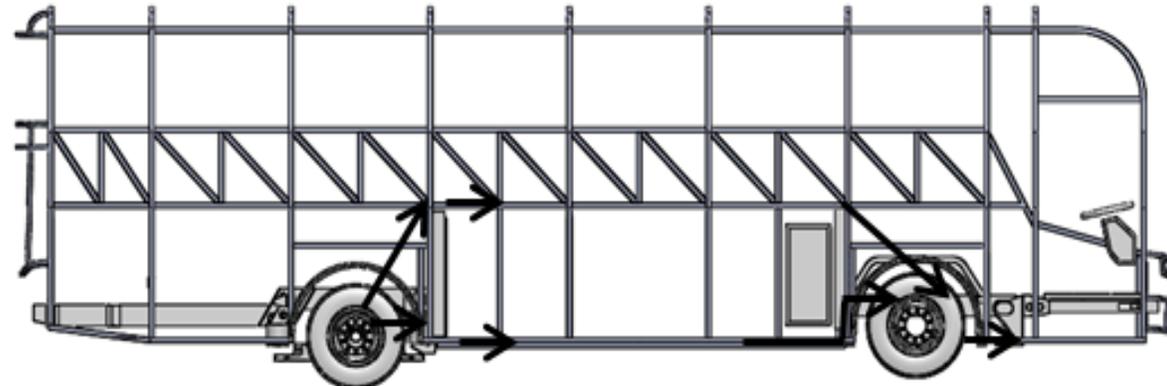
# FUERZAS VERTICALES

- Las fuerzas dinámicas verticales se forman a causa de las aceleraciones debidas a los movimientos de la suspensión



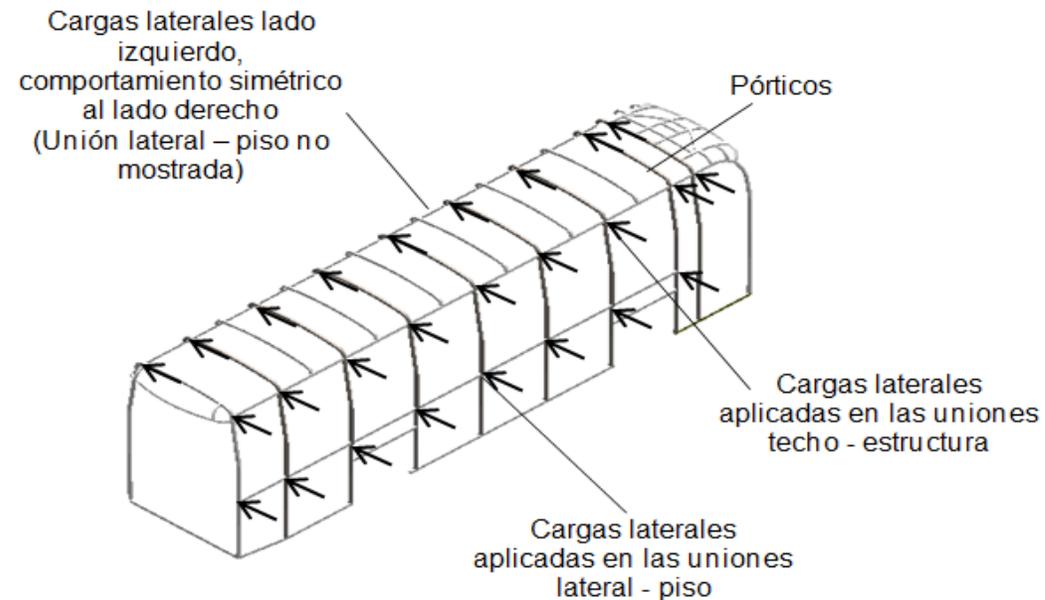
# FUERZAS LONGITUDINALES

- Las fuerzas longitudinales son las que aparecen normalmente al frenar el vehículo



# FUERZAS TRANSVERSALES

- Las fuerzas transversales aparecen al tomar curvas y al cambiar de carril





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CARGAS APLICADAS A LA CARROCERÍA DE UN BUS AUTOPORTANTE

- CARGAS ESTÁTICAS



# ***CARGA MUERTA***

- Incluye el peso de la estructura misma y el de los elementos no estructurales



- La carga viva corresponde a la carga por ocupación.





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CARGAS APLICADAS A LA CARROCERÍA DE UN BUS AUTOPORTANTE

- CARGAS DINÁMICAS

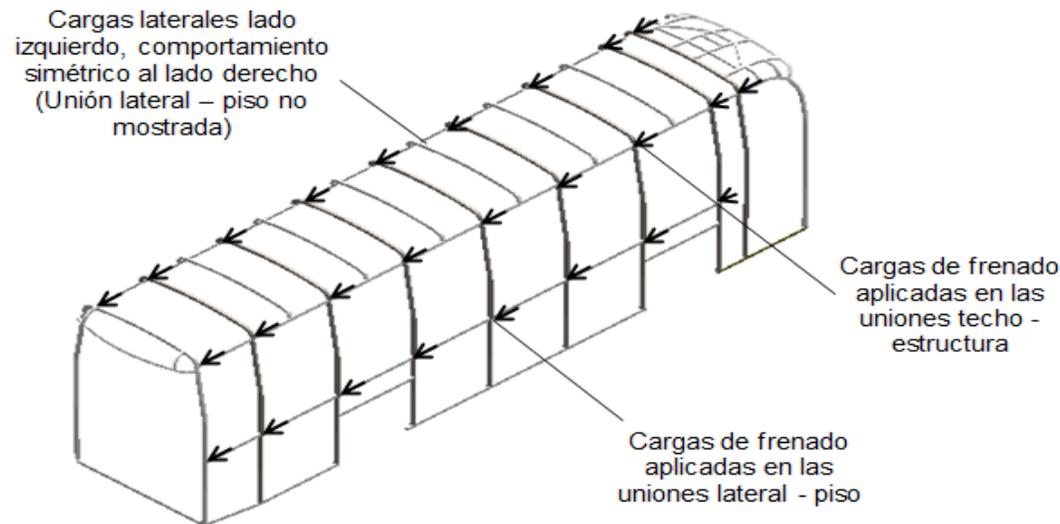


# CARGA DE FRENADO (CF)

# CARGA DE ACELERACIÓN BRUSCA (CAB)

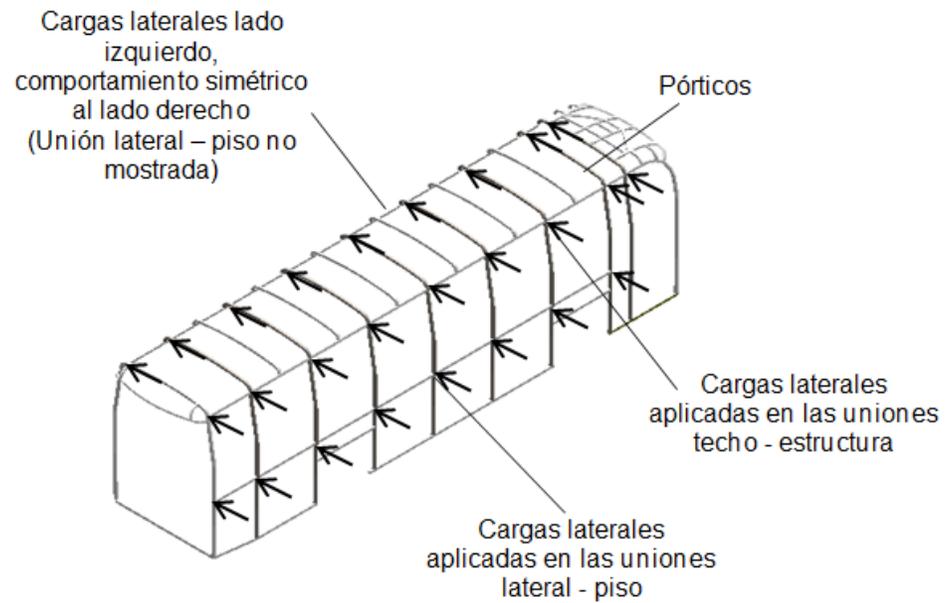
Se presentan cuando el vehículo es sometido a una aceleración negativa (sentido contrario al movimiento)

Corresponde a la fuerza producida por la aceleración brusca del vehículo



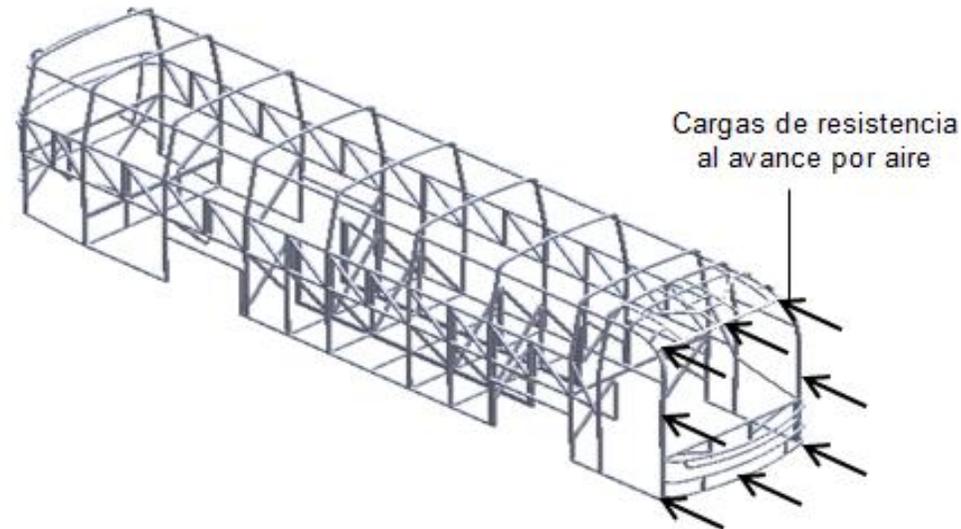
# CARGA DE GIRO (CG)

Corresponde a la fuerza producida por el giro de un vehículo



# ***CARGA POR RESISTENCIA DEL AIRE FRONTAL (CRaf)***

Corresponde a la fuerza producida por el aire sobre el área correspondiente a la proyección del bus en el plano frontal



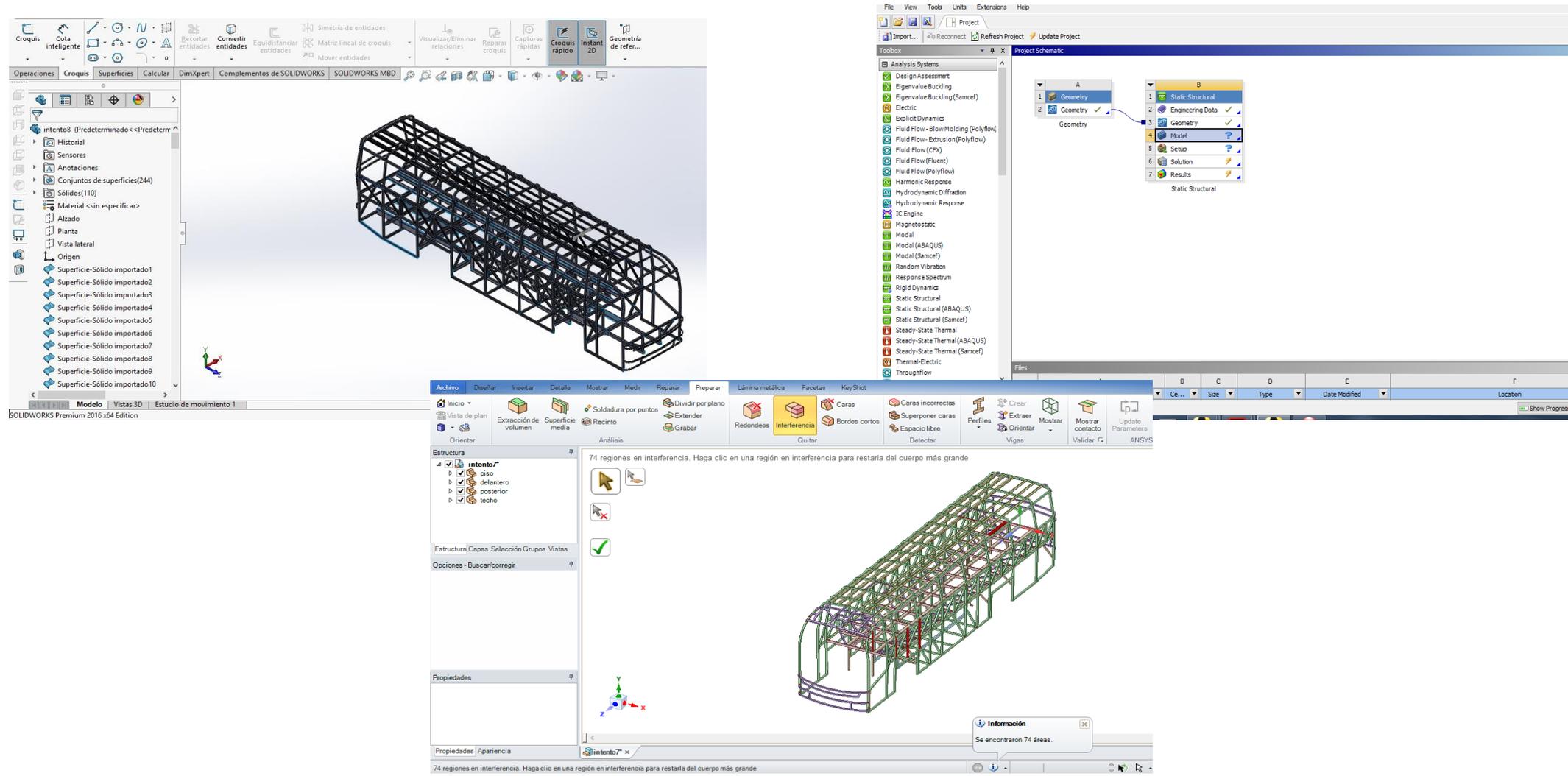


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE



# ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE



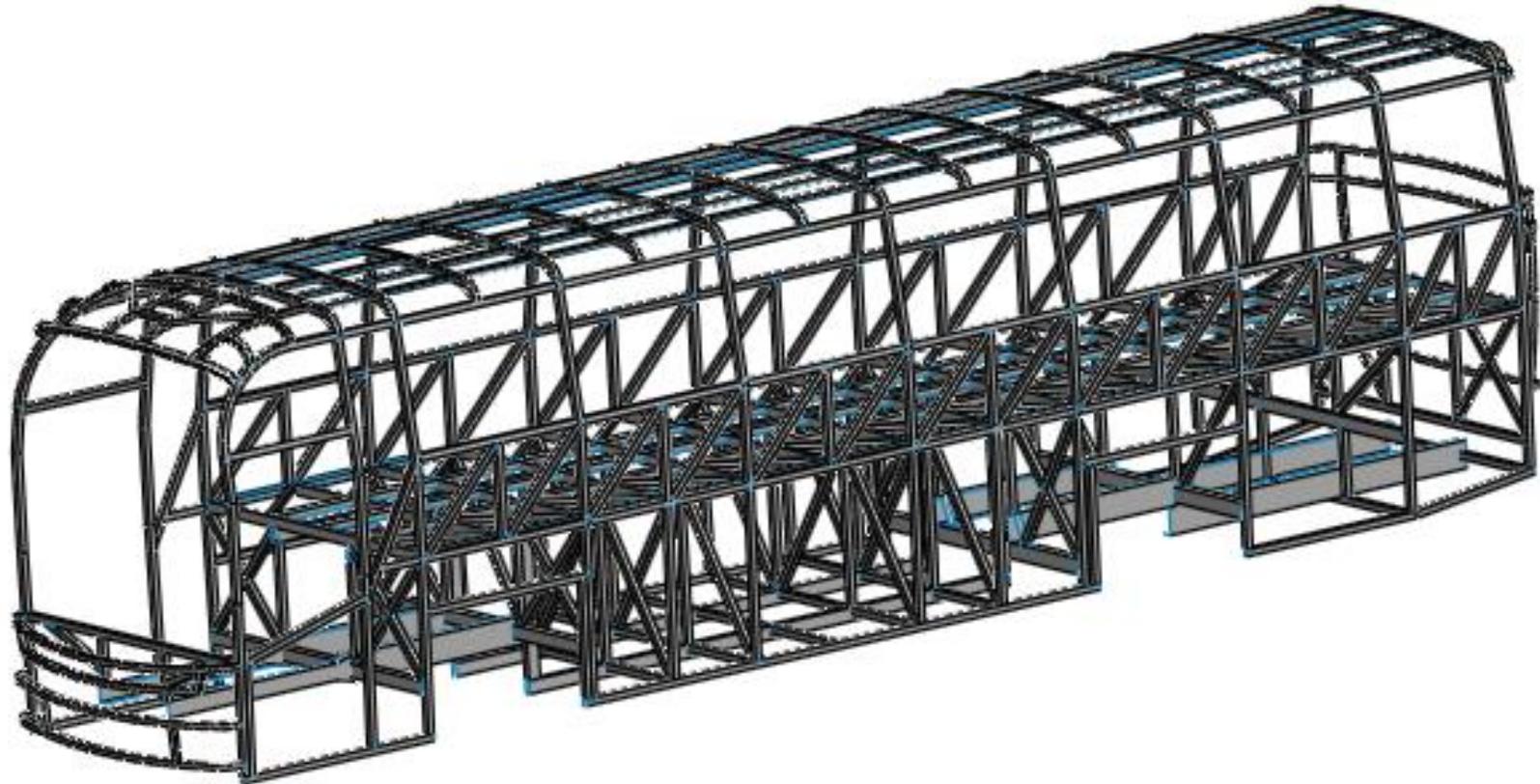


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

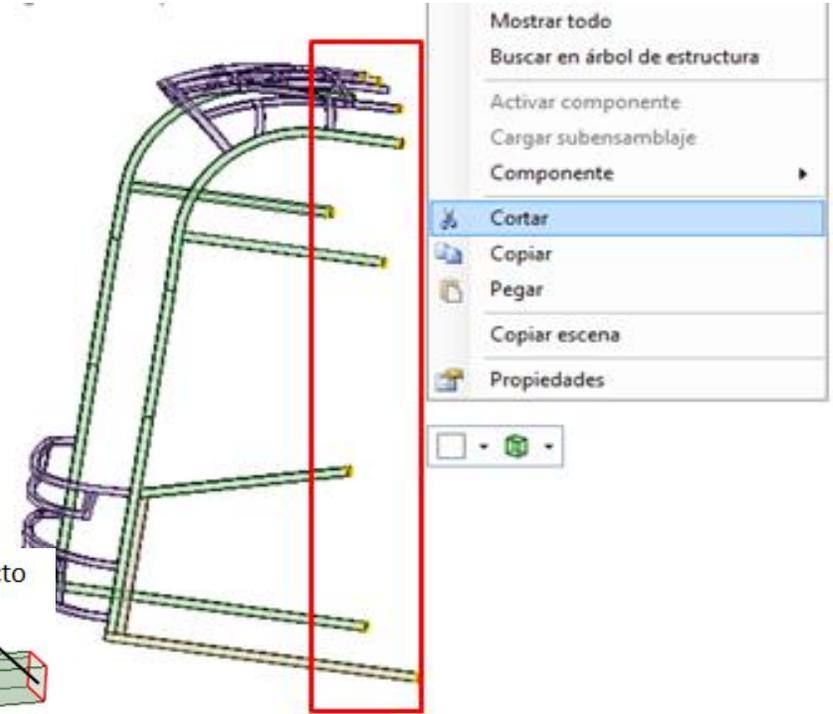
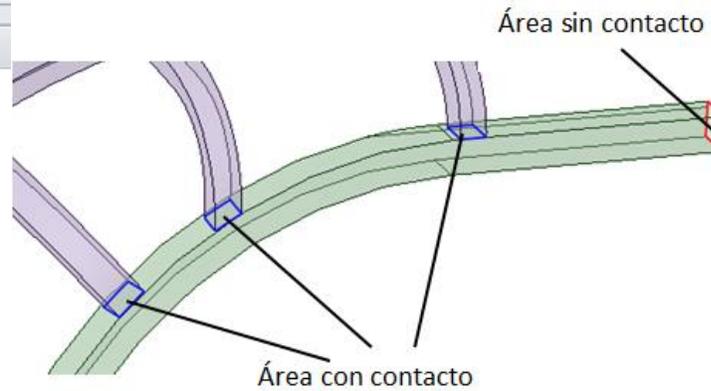
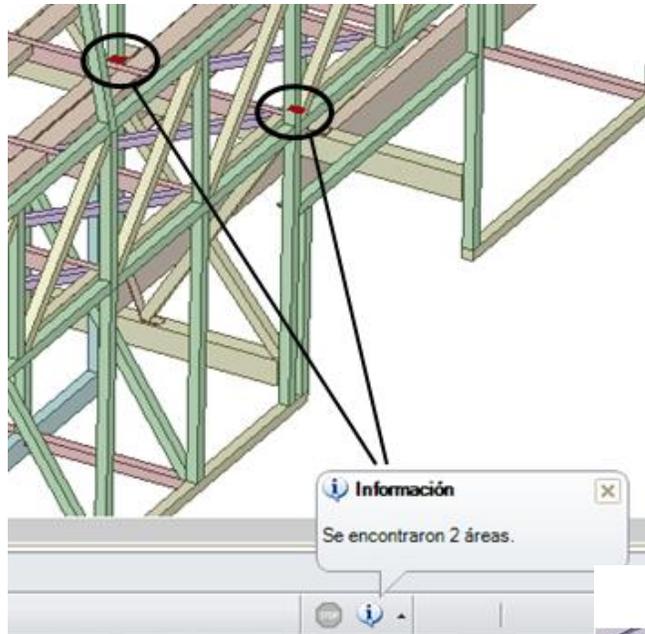
# METODOLOGÍA DEL MODELADO Y VALIDACIÓN ESTRUCTURAL



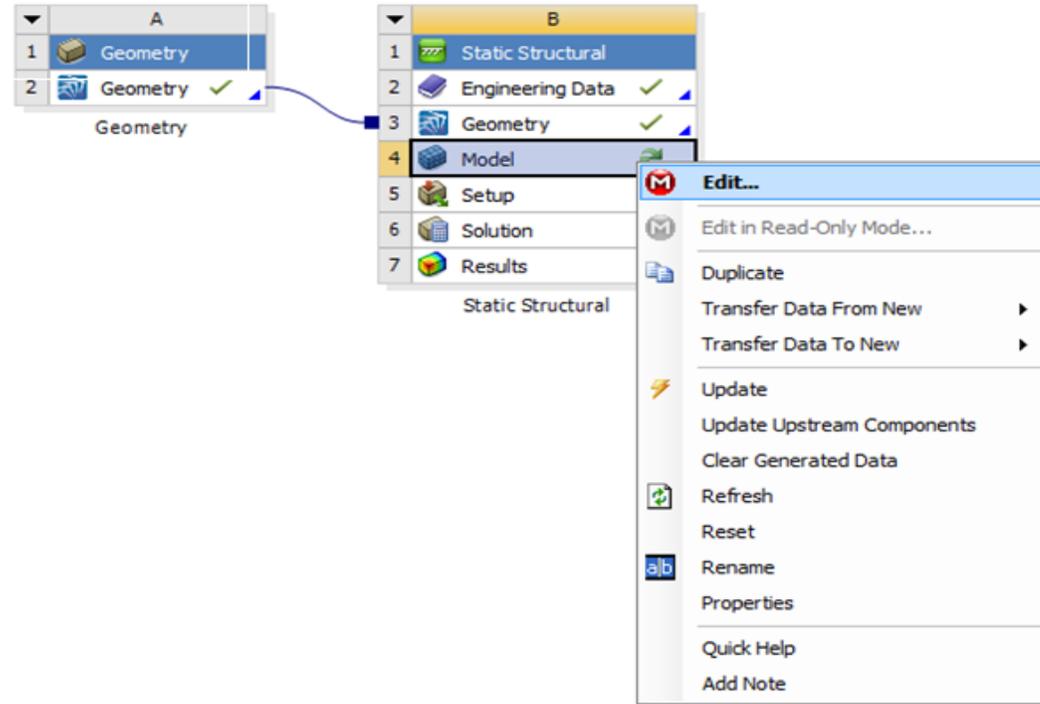
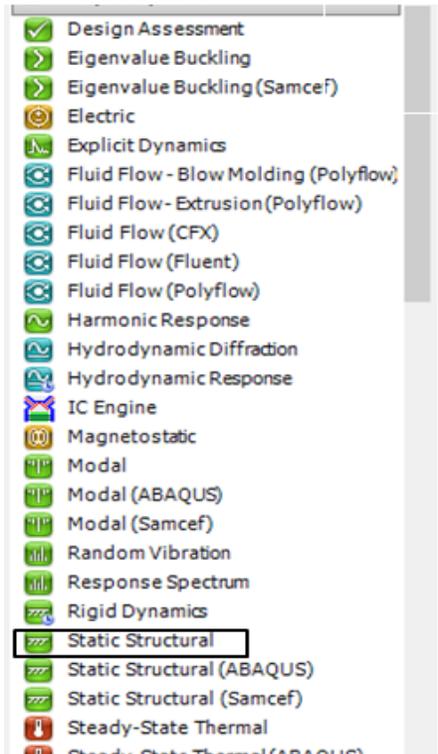
# ***IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA AL SOFTWARE***



# VERIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA



# PRE PROCESAMIENTO DEL ANÁLISIS



# ASIGNACIÓN DE MATERIALES

1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	Structural Steel ASTM A36		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Structural Steel ASTM A36					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2E+05	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,27			
10	Bulk Modulus	1,4493E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,874E+10	Pa		
12	Field Variables				
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
20	Strain-Life Parameters				
28	Tensile Yield Strength	250	MPa		
29	Compressive Yield Strength	250	MPa		
30	Tensile Ultimate Strength	460	MPa		

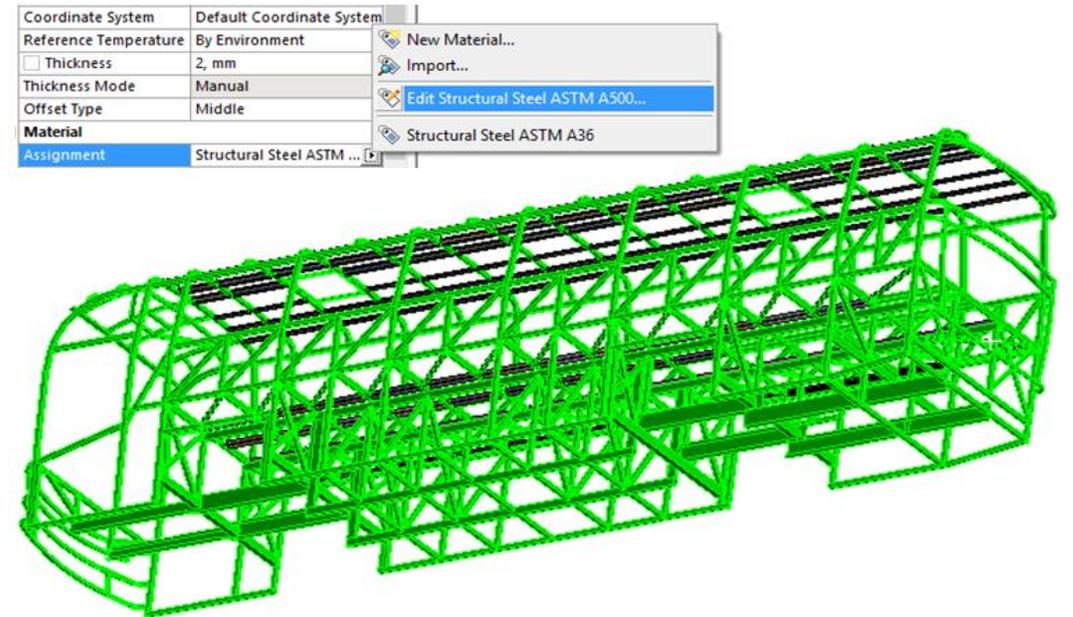
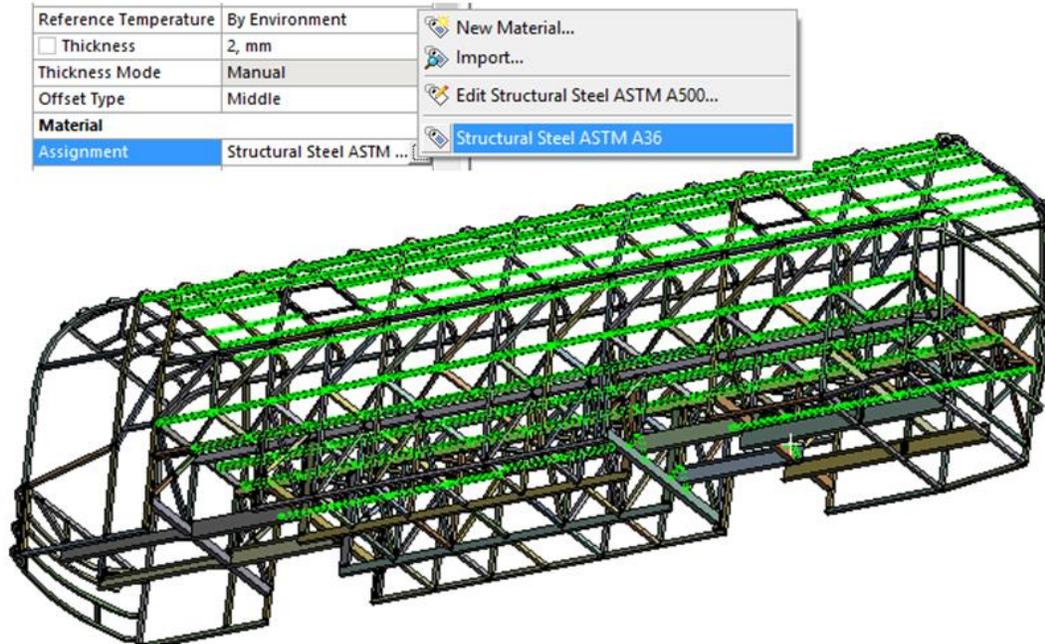
4	Structural Steel ASTM A500	Description
		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material	

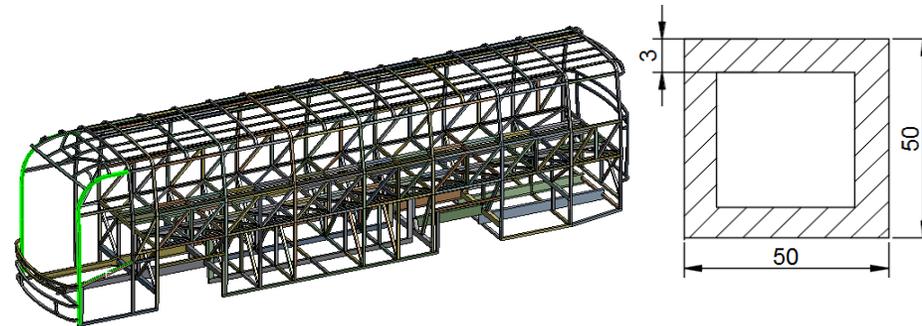
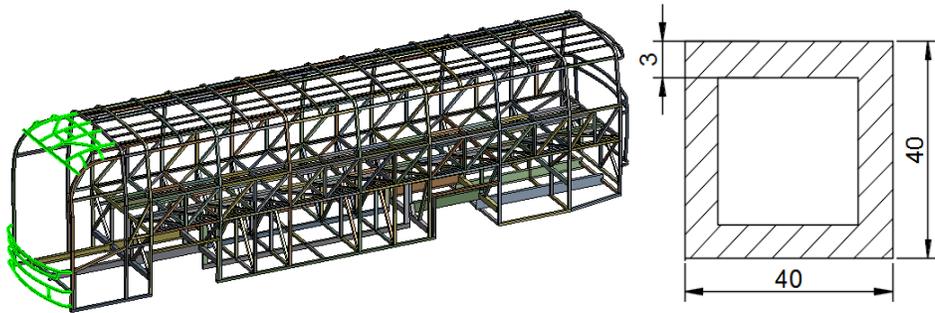
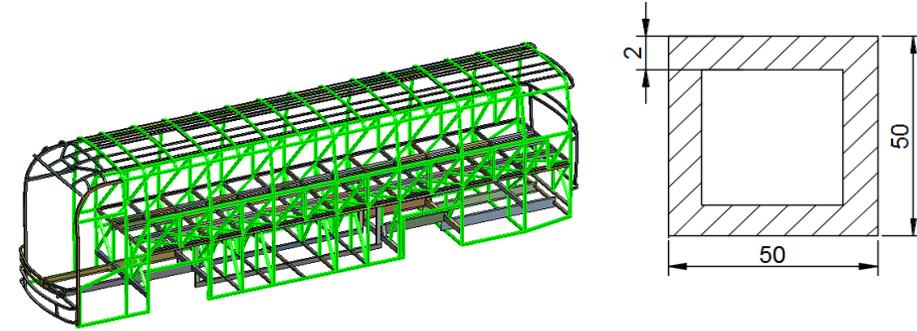
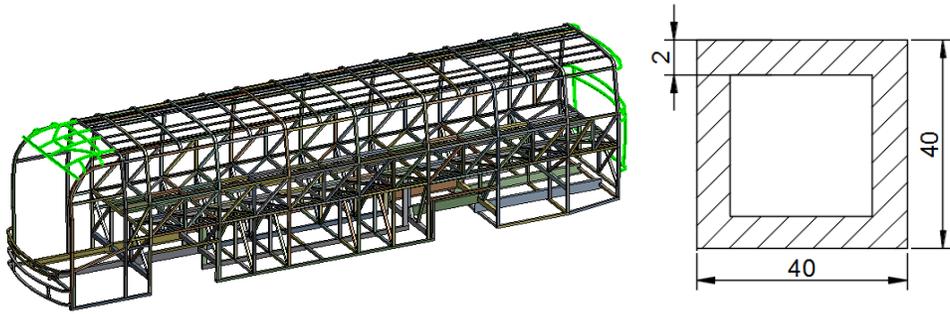
Properties of Outline Row 4: Structural Steel ASTM A500					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2E+05	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,27			
10	Bulk Modulus	1,4493E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,874E+10	Pa		
12	Field Variables				
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
20	Strain-Life Parameters				
28	Tensile Yield Strength	320	MPa		
29	Compressive Yield Strength	250	MPa		
30	Tensile Ultimate Strength	430	MPa		



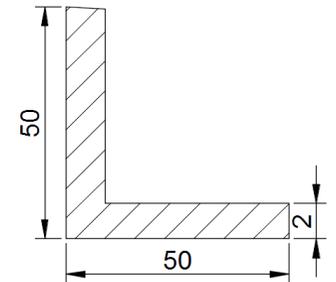
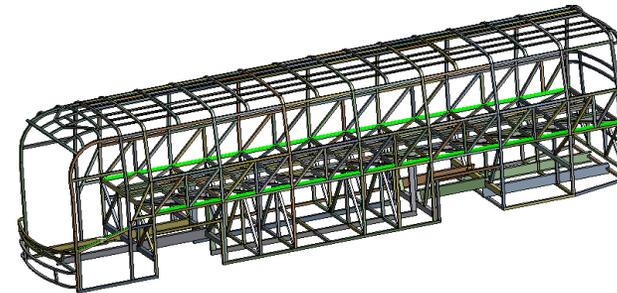
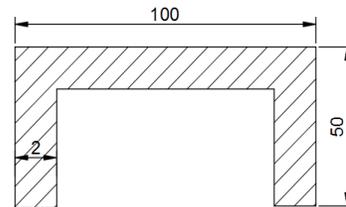
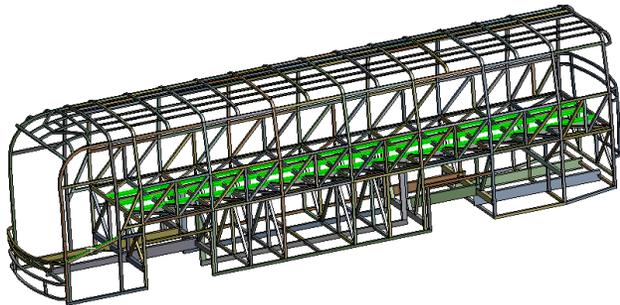
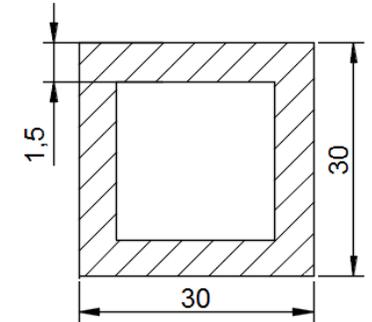
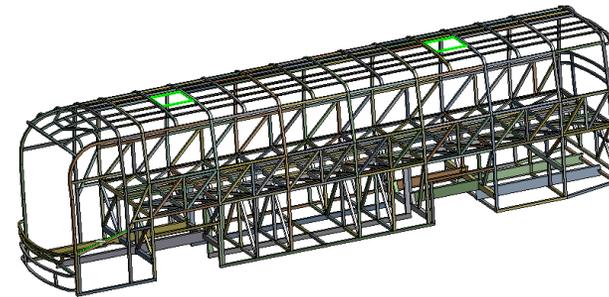
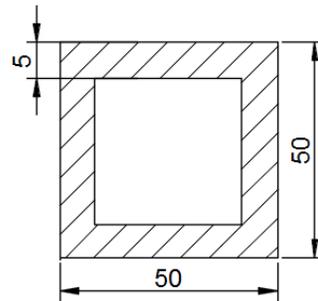
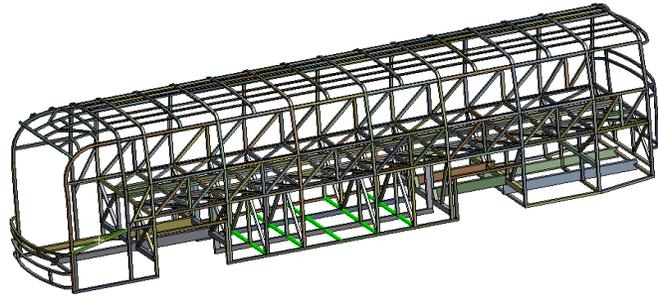
# ASIGNACIÓN DE MATERIALES



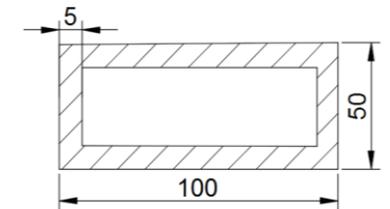
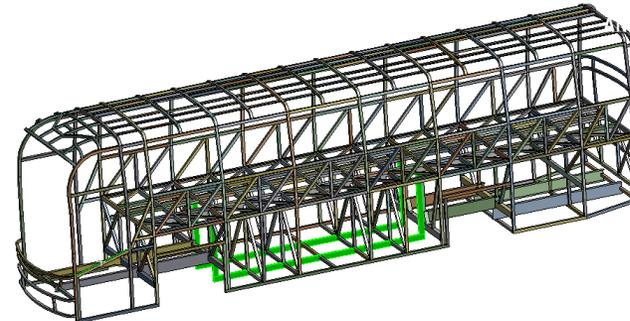
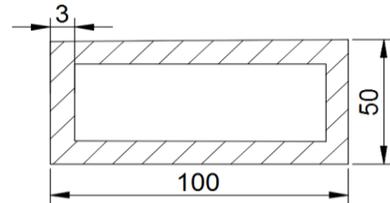
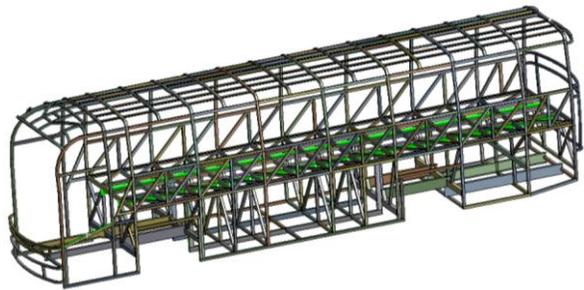
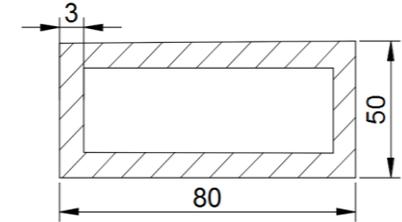
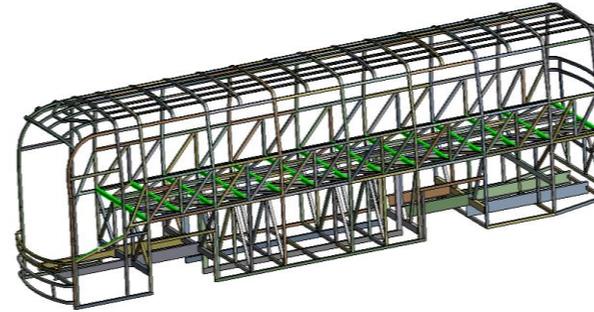
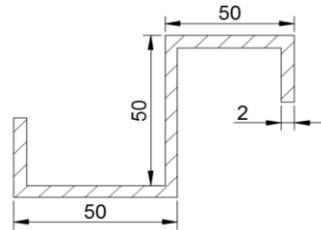
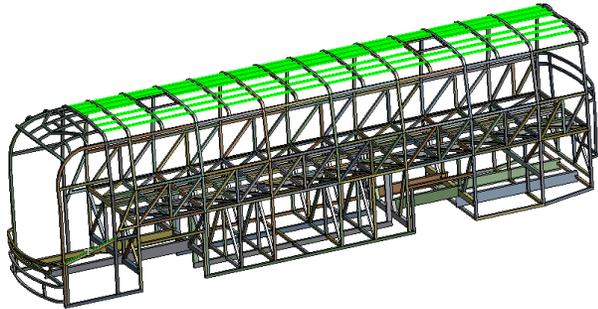
# ASIGNACION DE LOS PERFILES ESTRUCTURALES



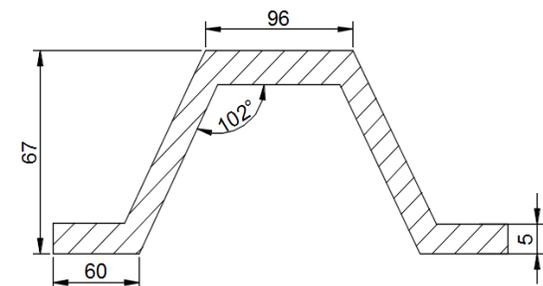
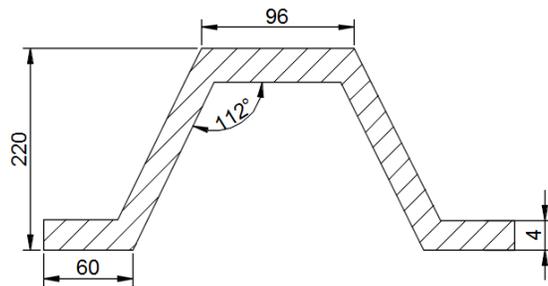
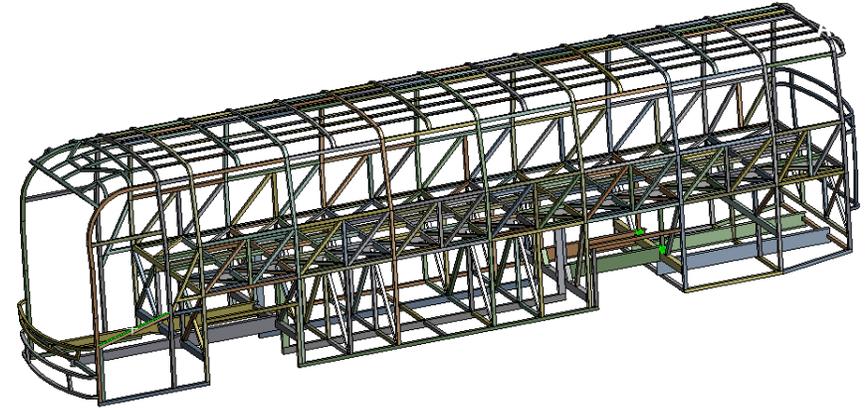
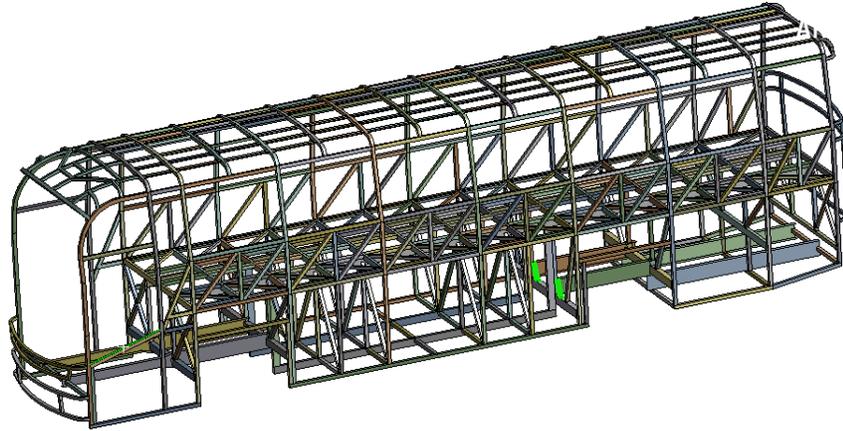
# ASIGNACION DE LOS PERFILES ESTRUCTURALES



# ASIGNACION DE LOS PERFILES ESTRUCTURALES

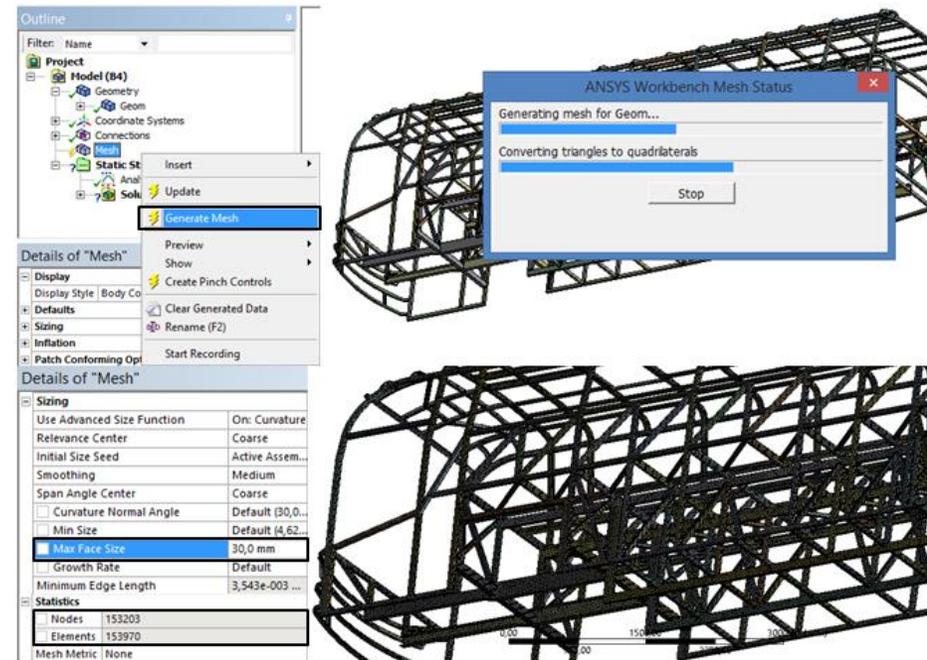


# ASIGNACION DE LOS PERFILES ESTRUCTURALES



# MALLADO

La malla esta generada por el conjunto de nodos que será más o menos fina según sea la separación entre los nodos o según el tamaño de los elementos



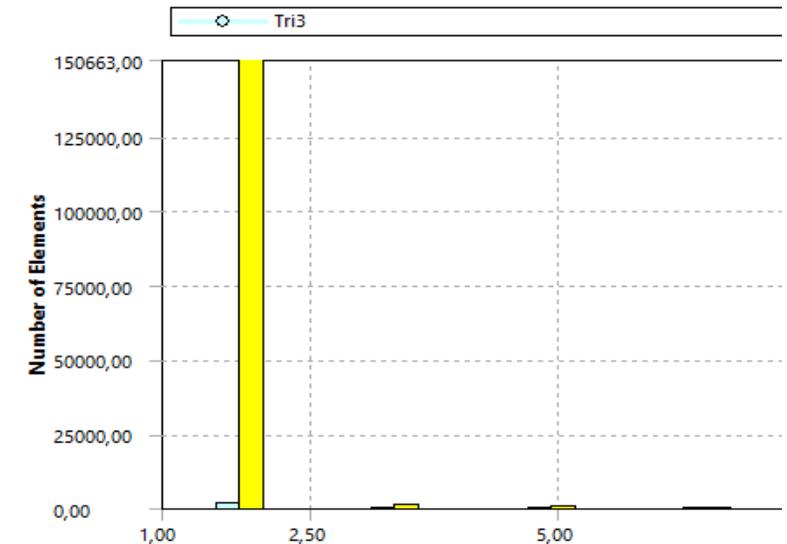
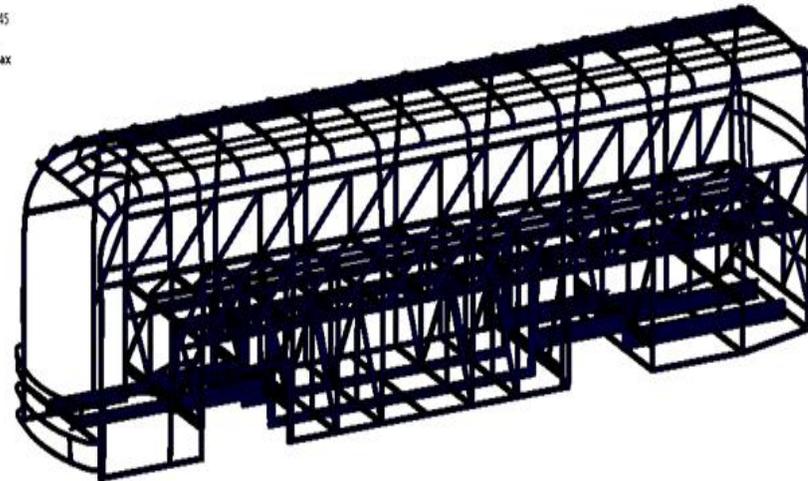
# ***CALIDAD DE MALLADO***

- La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados.
- Una vez concluido el proceso de mallado se obtuvieron 152742 nodos, 153577 elementos

# CRITERIO JACOBIANO

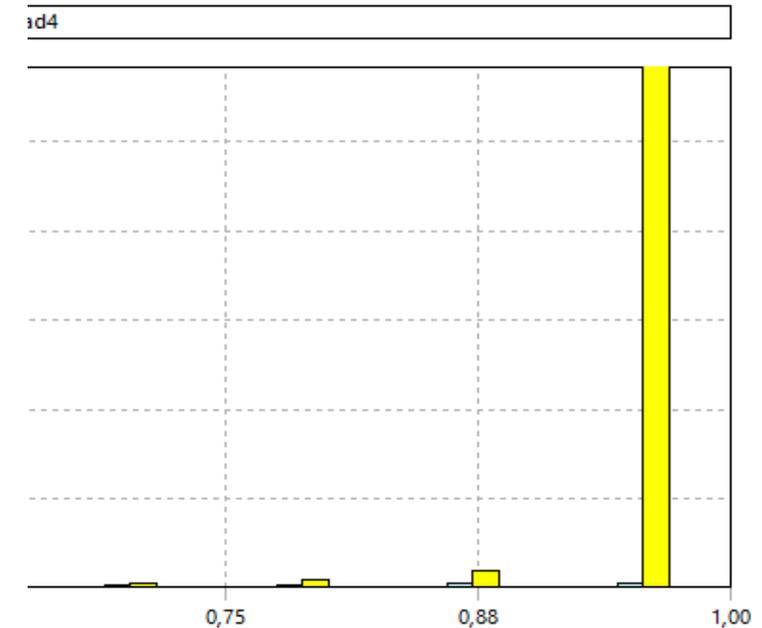
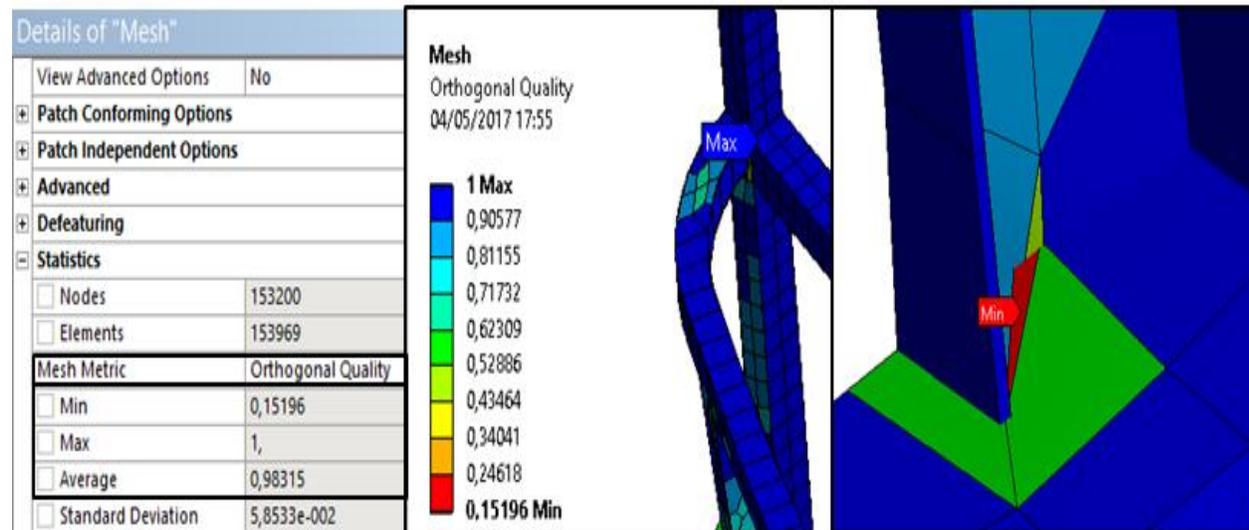
- El criterio Jacobiano permite determinar la calidad de malla; este criterio calcula y prueba todos los elementos, excepto los triángulos y tetraedros.

Details of "Mesh"		
Mesh		
Aspect Ratio		
03/07/2017 17:45		
13,249 Max		
11,888		
10,527		
9,166		
7,805		
6,444		
5,083		
3,722		
2,361		
1 Min		
Display		
Display Style	Jacobian Ratio	
Defaults		
Sizing		
Inflation		
Patch Conforming Options		
Patch Independent Options		
Advanced		
Defeaturing		
<input type="checkbox"/> Nodes	152742	
<input type="checkbox"/> Elements	153577	
Mesh Metric		Jacobian Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,	
<input type="checkbox"/> Max	16,708	
<input type="checkbox"/> Average	1,0805	
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,40289	



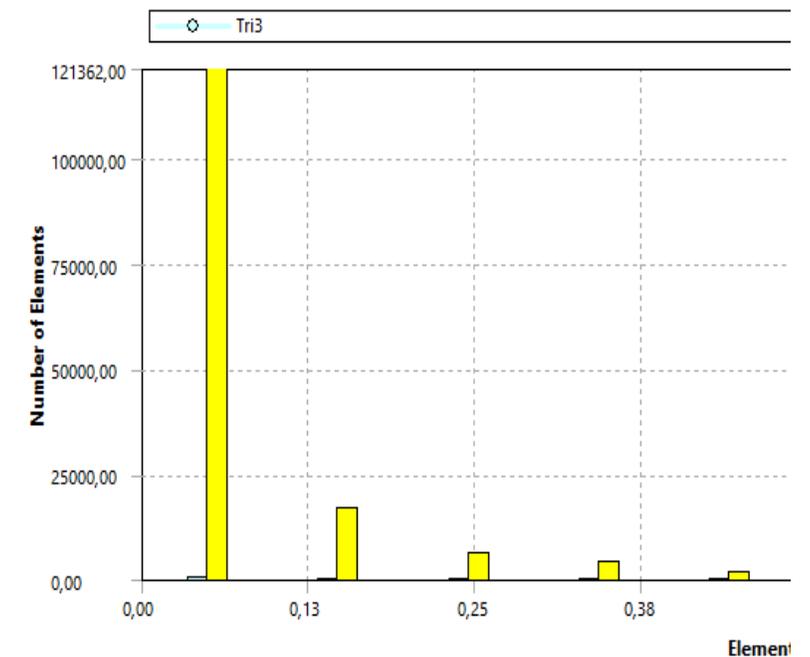
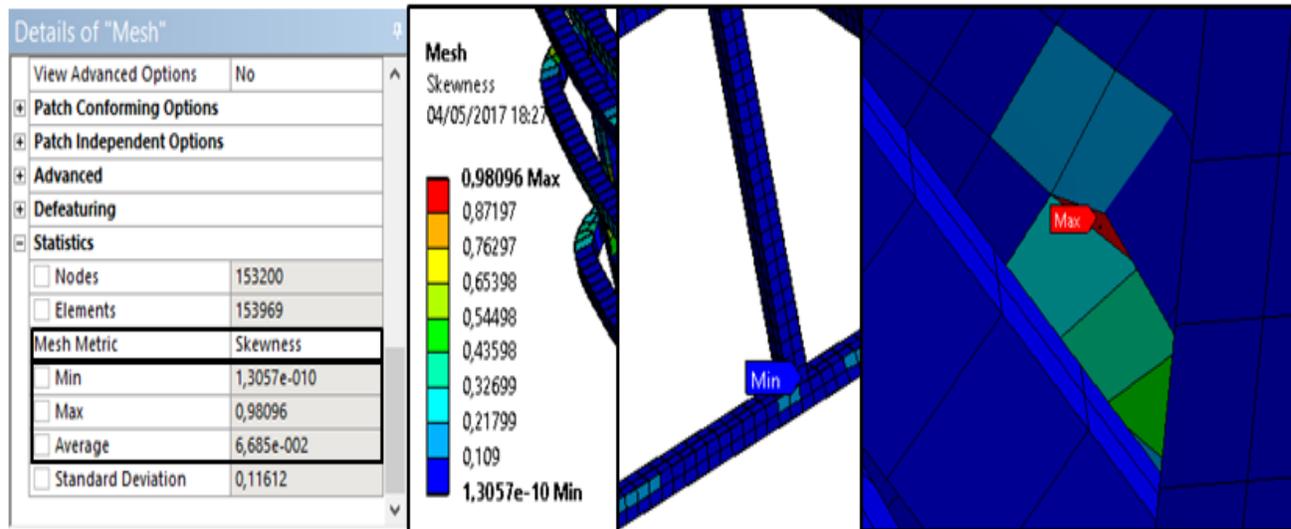
# ORTHOGONAL QUALITY

- Orthogonal Quality producido con un valor de 0.98315, el cual está dentro del rango moderado considerando una excelente calidad de malla



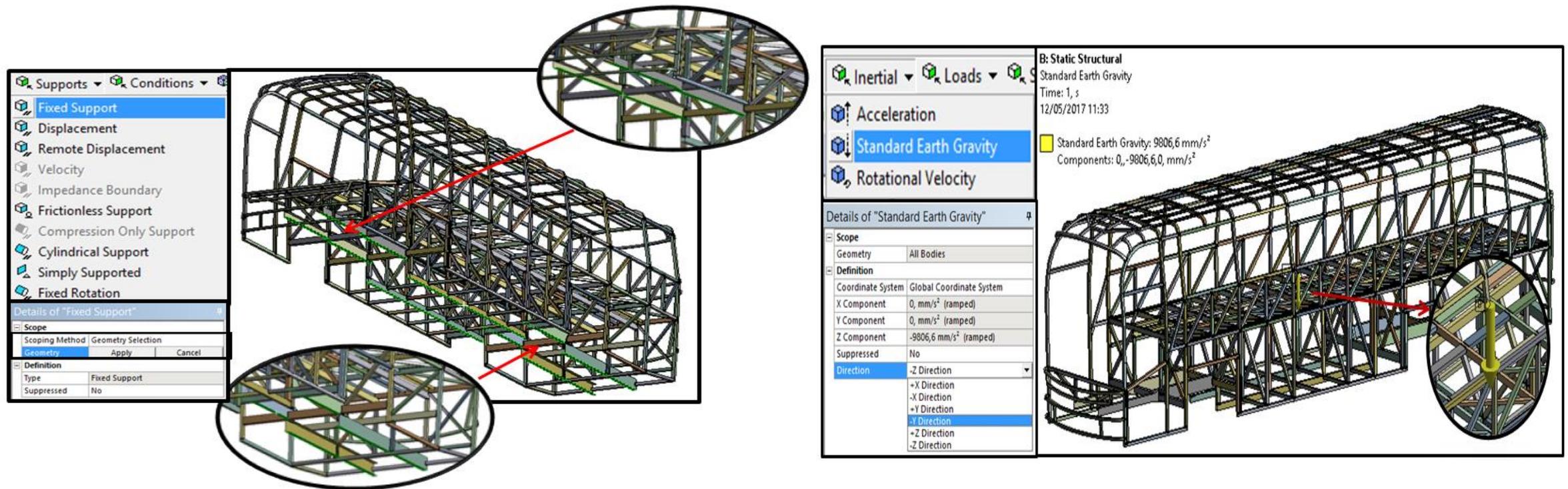
# SKEWNESS

- La calidad Skewness producido con un valor de 0.06685, el cual está dentro del rango moderado considerando una excelente calidad de malla



# CONDICIONES DE FRONTERA

- Representan las restricciones que se van a colocar sobre la estructura





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# ESTABLECIMIENTO Y SIMULACIÓN DE CARGAS ACTUANTES



# CARGAS CONSTANTES

Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.

ITEM	VALOR (Kg)	VALOR (N)
Chasis	$m = 5866,000 \text{ Kg}$	$q = 57486,800 \text{ N}$
Estructura	$m = 2415,900 \text{ Kg}$	$q = 23675,820 \text{ N}$
Planchas de recubrimiento	$m = 1128,285 \text{ Kg}$	$q = 11057,148 \text{ N}$
Parabrisas y Vidrios de Seguridad	$m = 417,430 \text{ Kg}$	$q = 4090,816 \text{ N}$
Fibra de Vidrio	$m = 80,670 \text{ Kg}$	$q = 790,566 \text{ N}$
Asientos	$m = 1393,930 \text{ Kg}$	$q = 13660,514 \text{ N}$
Cajuelas	$m = 1138,000 \text{ Kg}$	$q = 11152,400 \text{ N}$

*Masa de la estructura + 10% adicionales*

$$m = 2415,9 \text{ kg} + 24,159 \text{ Kg}$$

$$m = 2440,059 \text{ Kg}$$

$$q = 23912,5782 \text{ N}$$

Posteriormente la carga muerta total es de:

$$m = 12464,374 \text{ Kg}$$

$$q = 122150,8252 \text{ N}$$





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MODELADO





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CARGAS DINÁMICAS



# CARGAS VIVAS

- Las cargas vivas constituyen el peso de pasajeros y tripulación. Se considera que, la unidad transporta 45 pasajeros sentados y 2 tripulantes

## Cargas vivas analizadas

ÍTEM	VALOR (Kg)	VALOR (N)
Peso por pasajero	$m = 75 \text{ Kg}$	$q = 735 \text{ N}$
Peso conductor	$m = 75 \text{ Kg}$	$q = 735 \text{ N}$
Peso tripulante	$m = 75 \text{ Kg}$	$q = 735 \text{ N}$
<b>TOTAL CARGAS VIVAS</b>	<b><math>m = 3450 \text{ Kg}</math></b>	<b><math>q = 33810 \text{ N}</math></b>



# CARGA DE GIRO

- La carga de giro se calcula referente a La velocidad crítica que debe ser considerada de al menos 90 km/h y el radio de giro se establece en función de la tabla 4 “Velocidad del vehículo, Radio mínimo y Peralte en carreteras” obtenido de (INEN 1323, 2009)

masa total de la carrocería autoportante:

$$M_T = 15914,374 \text{ Kg}$$

Reemplazando en la ecuación de carga de Giro:

$$G = M_T \cdot \frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{R_c}$$

**Ecuación 16** Carga de giro

$$G = 15914,374 \text{ (Kg)} \cdot \frac{\left(\frac{100 \text{ Km}}{3,6 \text{ h}}\right)^2}{450 \text{ m}}$$

$$G = 27288,021 \text{ N}$$

Velocidad del vehículo (Km/h)	Radio de la carretera (m)	Peralte (%)
80	250	8
85	300	
90	350	
95	400	
<b>100</b>	<b>450</b>	
105	500	
110	550	
115	600	
120	700	



## CARGA DE FRENADO

- Para el cálculo de la carga de frenado establece una desaceleración mayor o igual a  $a_f = -4 \text{ m/s}^2$

$$F = M_T \cdot a_f$$

**Ecuación 17** Carga de frenado

$$F = 15914,374 \text{ (Kg)} \cdot (4 \text{ m/s}^2)$$

$$F = 63657,496 \text{ N}$$

## CARGA DE ACCELERACIÓN BRUSCA

- Carga de frenado pero en sentido contrario

$$A_b = -63657,496 \text{ N}$$



# CARGA POR RESISTENCIA AL AIRE FRONTAL

- La fuerza aerodinámica de resistencia al avance en función de la forma, tamaño y velocidad del vehículo

## Coeficiente de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses

Vehículo	Tipo	$C_D$
Automóvil	De carrera	0,17
	Aerodinámica	0,23
	Convencional	0,52
Camión	Convencional	0,60
<b>Autobús</b>	<b>Convencional</b>	<b>0,70</b>



# **CARGA POR RESISTENCIA AL AIRE FRONTAL**

## **Densidad ( $\rho$ )**

La densidad a nivel del mar resulta tener mayor oposición al movimiento, se tomará como densidad del aire el valor al nivel del mar ( $\rho = 1,225 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ ), en comparación a la densidad de la altura de Quito ( $\rho = 0,9242 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ ) que es menor

## **Velocidad y área proyectada frontal de la carrocería autoportante**

Velocidad tomada de acuerdo a la NTE INEN 1323:2009 es de 100 Km/h

El área frontal proyectada de la carrocería fue tomada del diseño modelado es  $A = 7,976 m^2$ .



# CARGA POR RESISTENCIA AL AIRE FRONTAL

$$R_{af} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot A_f V^2$$

$$R_{af} = \frac{1}{2} \cdot (0.7) \cdot \left( 1,225 \left( \frac{Kg}{m^3} \right) \right) \cdot 7,976 (m^2) \cdot \left( 27,77 \frac{m}{s} \right)^2$$

$$R_{af} = 2638,665 N$$



# APLICACIÓN DE CARGAS

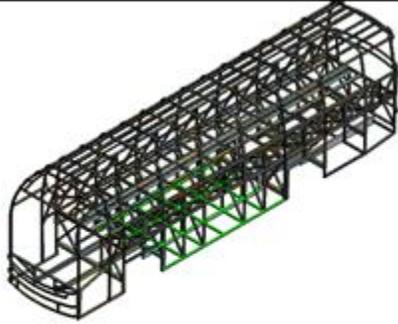


Figura 118 Asignación de cargas muertas sobre las cajuelas de la carrocería

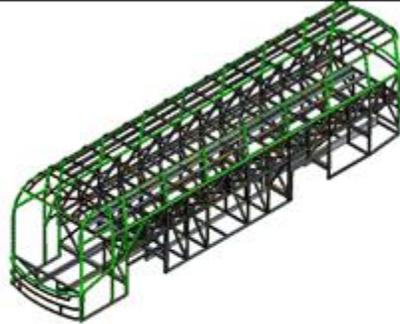


Figura 119 Asignación de cargas muertas sobre los perfiles de contorno de vidrios en la carrocería

c) carga asientos

d) Carga chasis

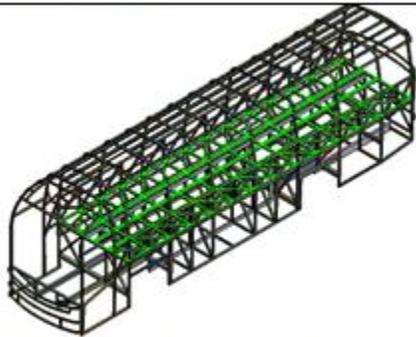


Figura 120 Asignación de cargas muertas sobre el piso de la carrocería

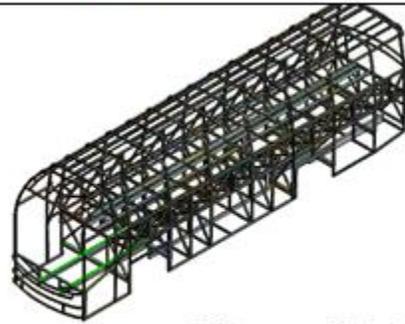


Figura 121 Asignación de cargas muertas sobre el chasis

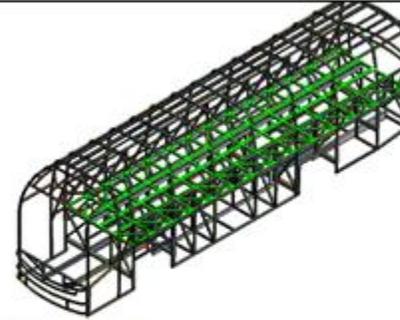


Figura 122 Asignación de cargas vivas sobre el piso de la carrocería

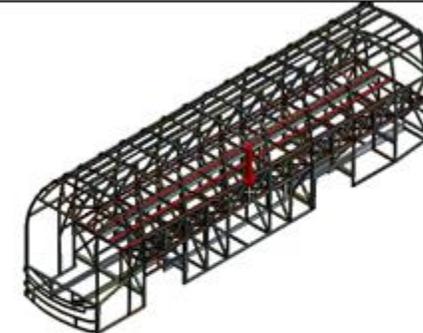


Figura 123 Selección de dirección de carga sobre la carrocería

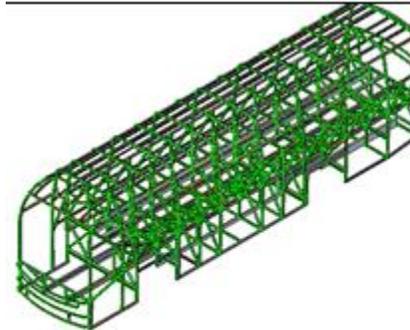


Figura 124 Asignación de cargas de aceleración brusca sobre los perfiles de la carrocería

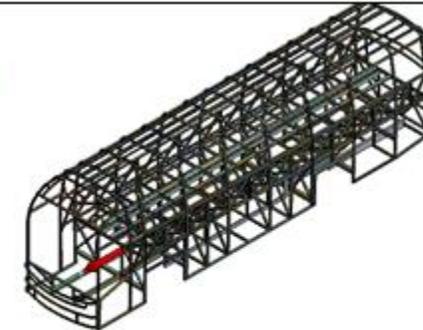


Figura 125 Selección de dirección de aceleración brusca sobre la carrocería

# APLICACIÓN DE CARGAS

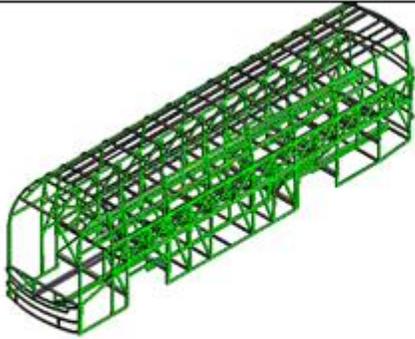


Figura 126 Asignación de cargas de giro sobre los perfiles de la carrocería

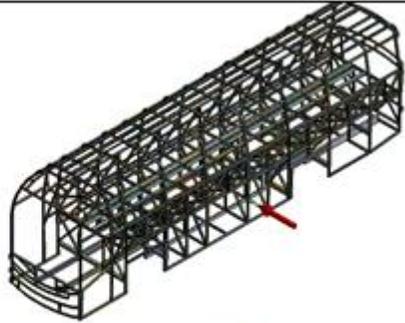


Figura 127 Selección de dirección de cargas de giro sobre la carrocería

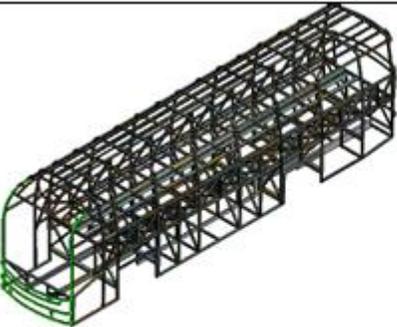


Figura 128 Asignación de cargas por resistencia al aire frontal sobre los perfiles de la carrocería

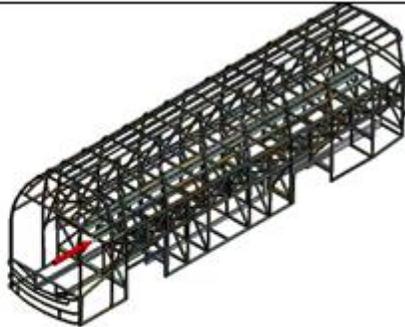


Figura 129 Selección de dirección de carga por resistencia al aire frontal sobre la carrocería

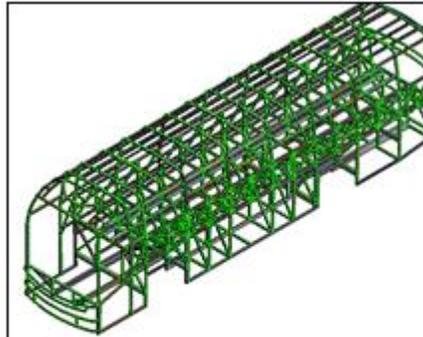


Figura 130 Asignación de cargas de frenado sobre los perfiles de la carrocería

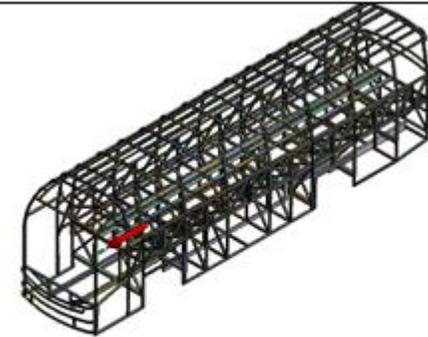


Figura 131 Selección de dirección de carga de frenado sobre la carrocería

# COMBINACIONES DE CARGAS RECOMENDADAS POR AISC-LRFD

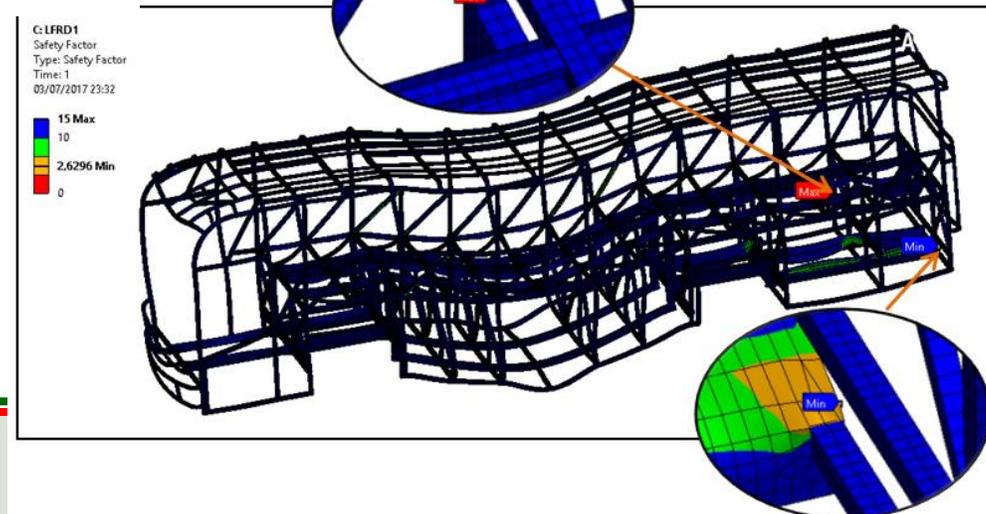
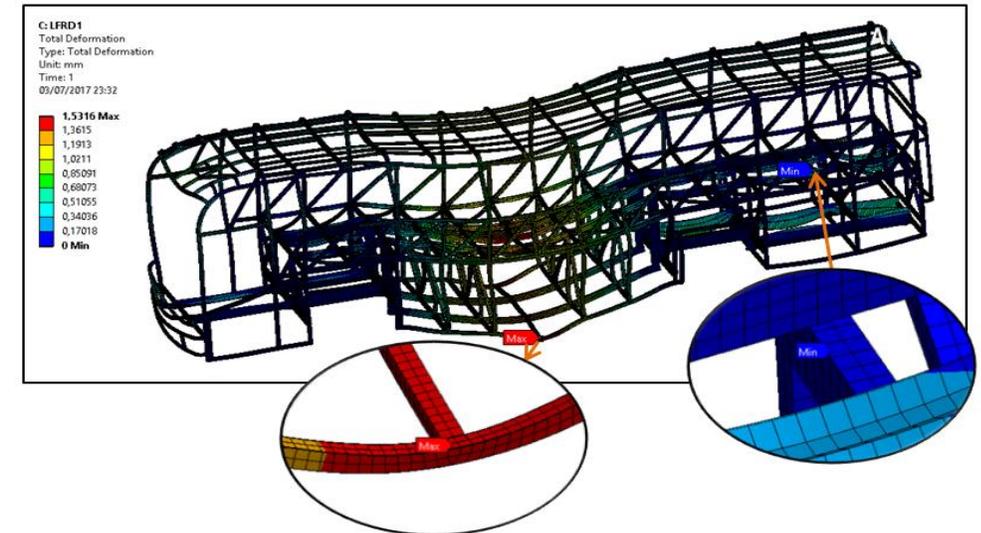
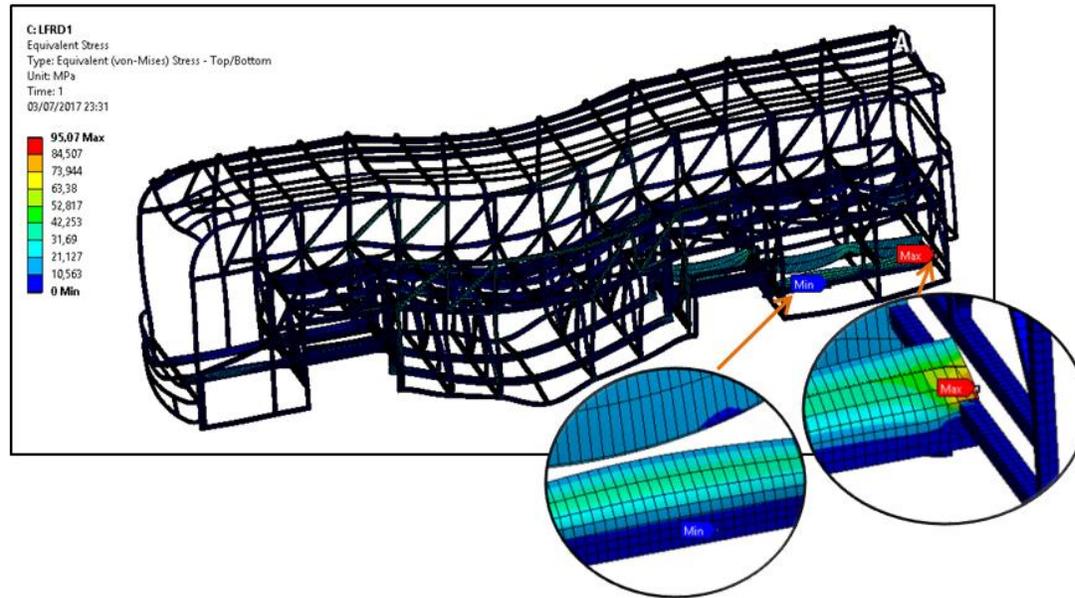
Combinaciones de cargas recomendadas por AISC-LRFD

COMBINACIÓN	VALOR
1. $1,4M + V$	1. 204821,155 N
2. $1,2M + 1,6V + 0,5G$	2. 214321,005 N
3. $1,2M + 0,5V + 1,6G$	3. 207146,823 N
4. $1,2M + 1,6F + 0,8R_{2f}$	4. 250543,915 N
5. $1,2M + 0,5V + 0,5F + 1,3R_{2f}$	5. 198745,002 N
6. $1,2M + 1,5A_b + 0,5V$	6. 258972,234 N
7. $0,9M - 1,3R_{2f}$	7. 106505,478 N
8. $0,9M + 1,3R_{2f}$	8. 113366,007 N



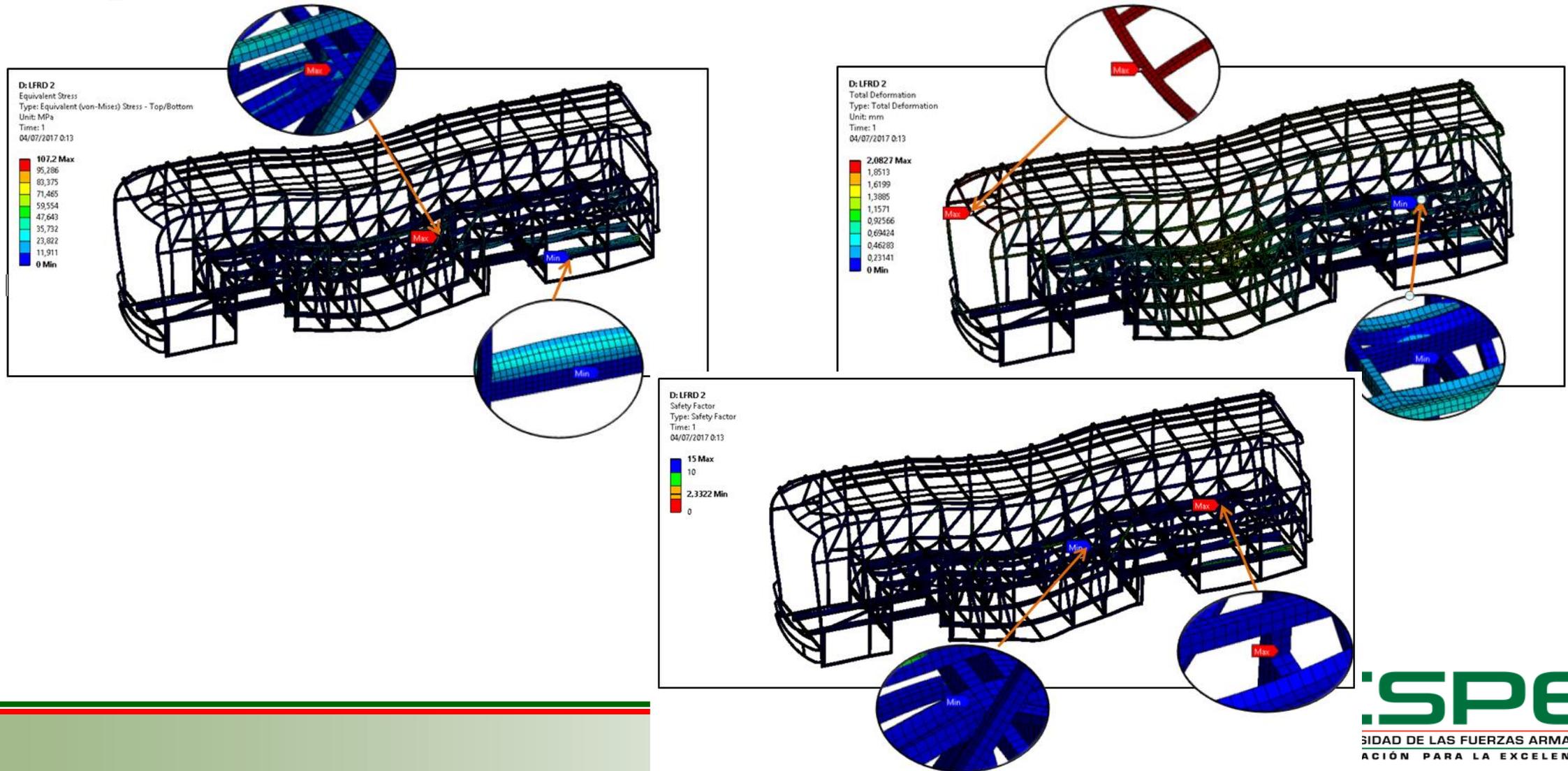
# COMBINACIÓN 1

- Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 1 tiene la configuración 1,4M+V con un valor de 204821,155



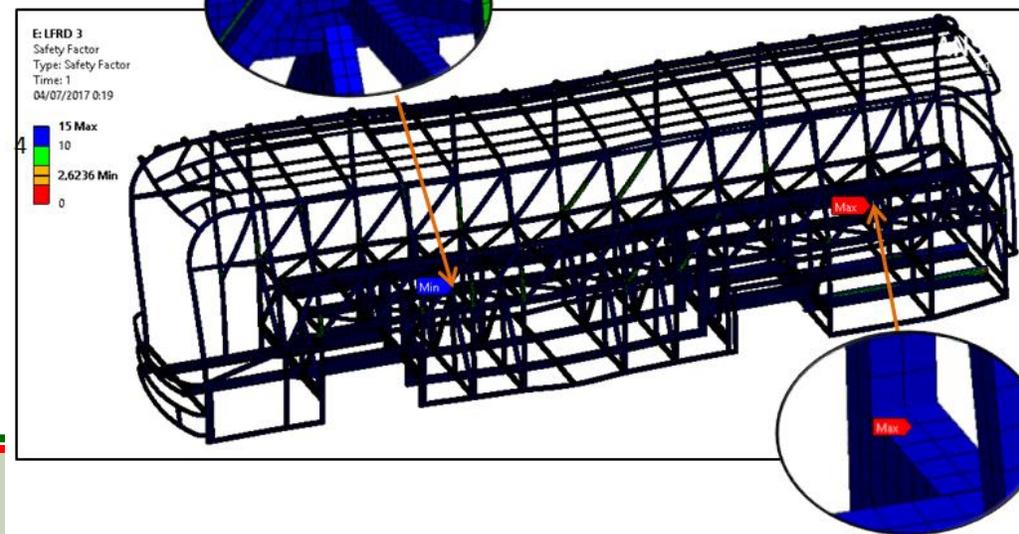
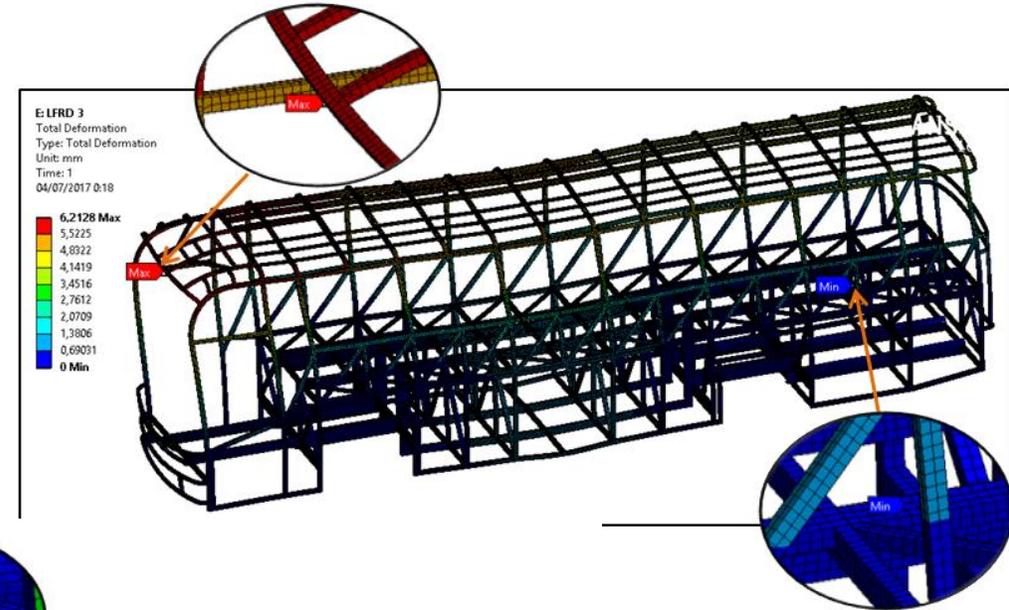
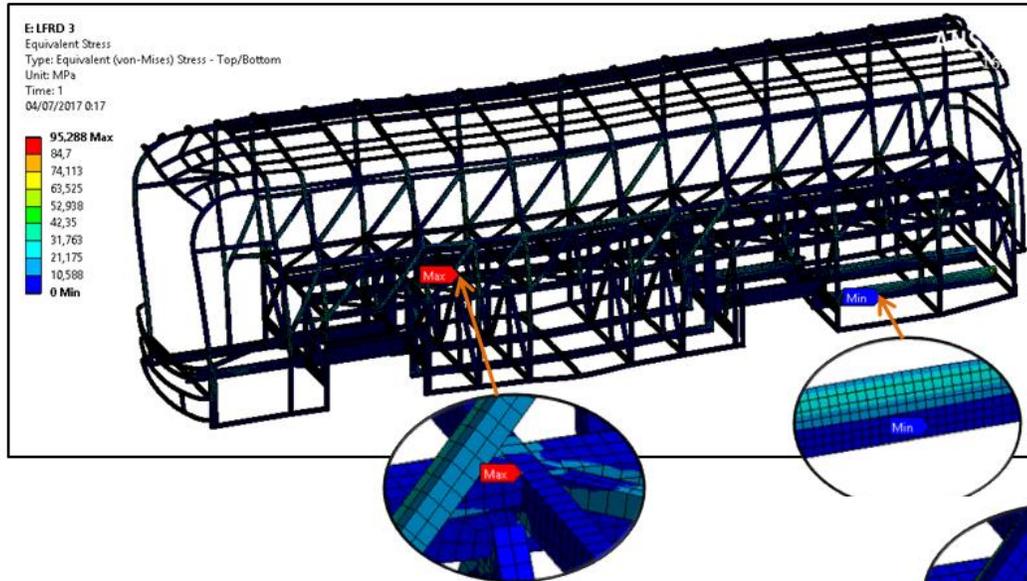
# COMBINACIÓN 2

- Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 2 tiene la configuración  $1,2M+1,6V+0,5G$  con un valor de 214321,005 N



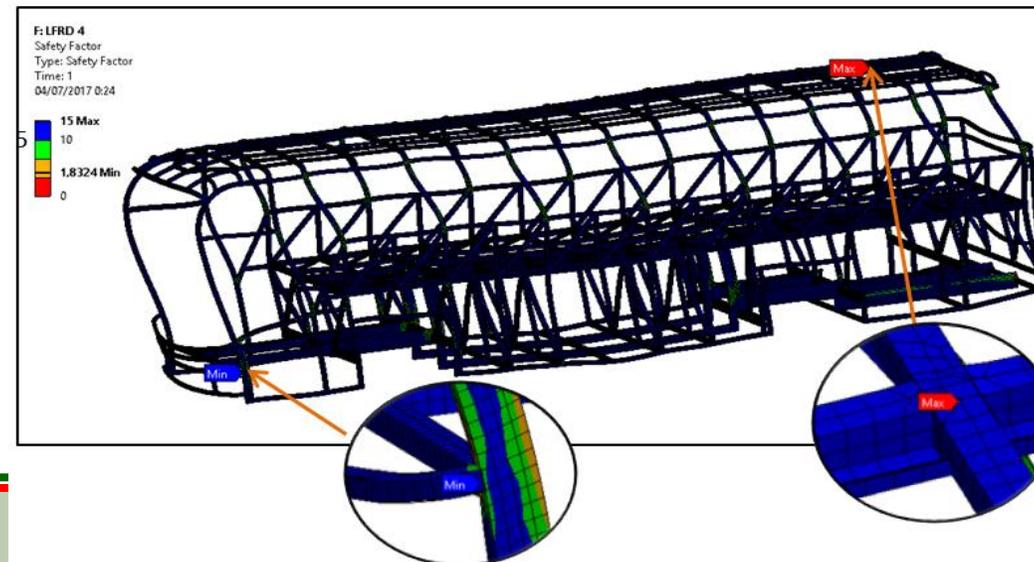
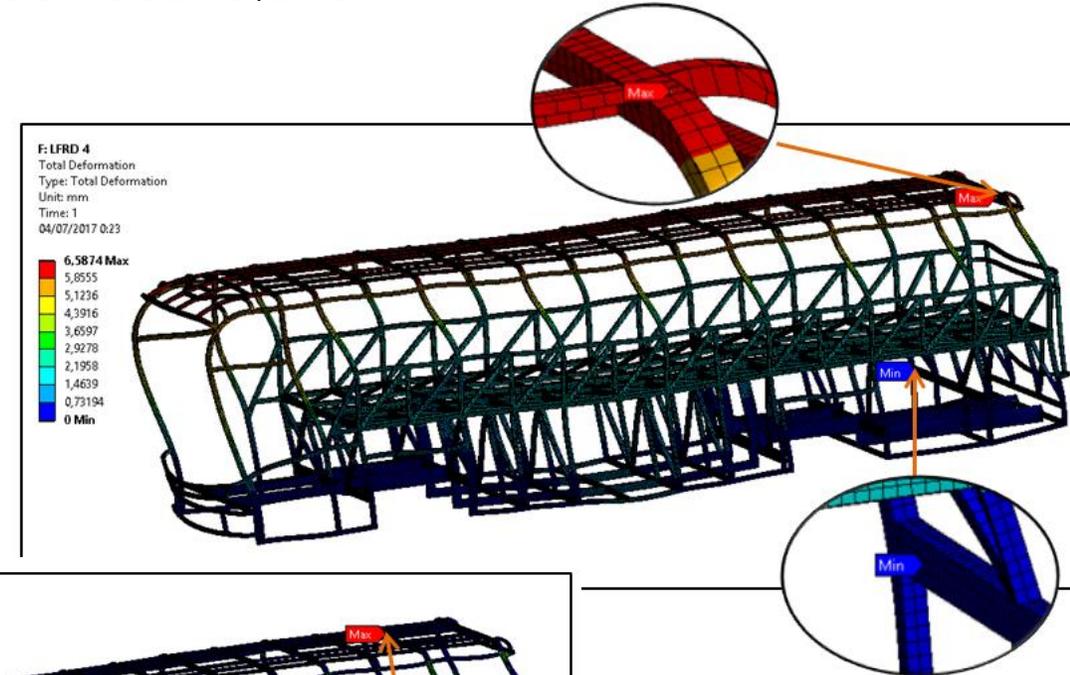
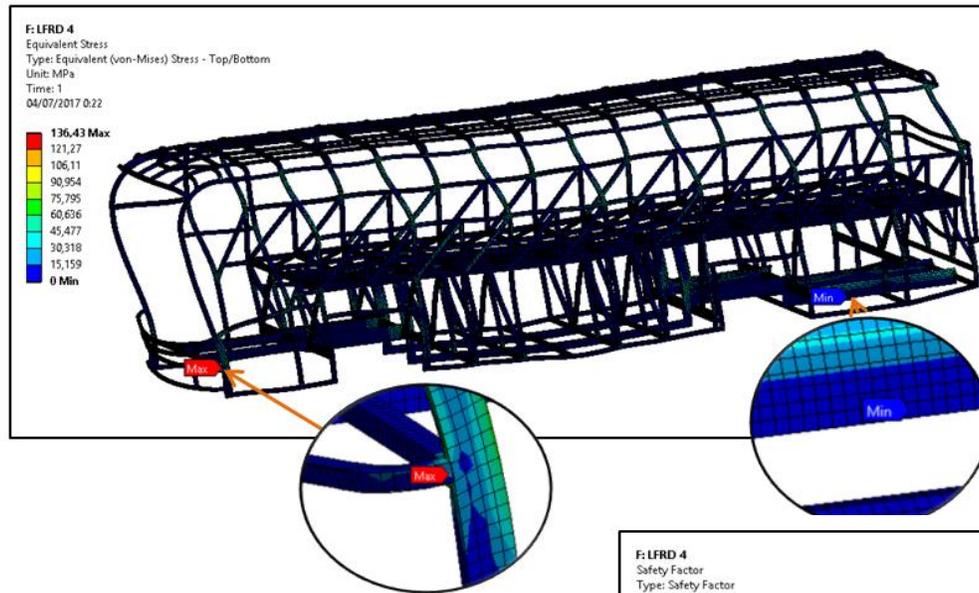
# COMBINACIÓN 3

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 3 tiene la configuración  $1,2M+0,5V+1,6G$  con un valor de 207146.823 N



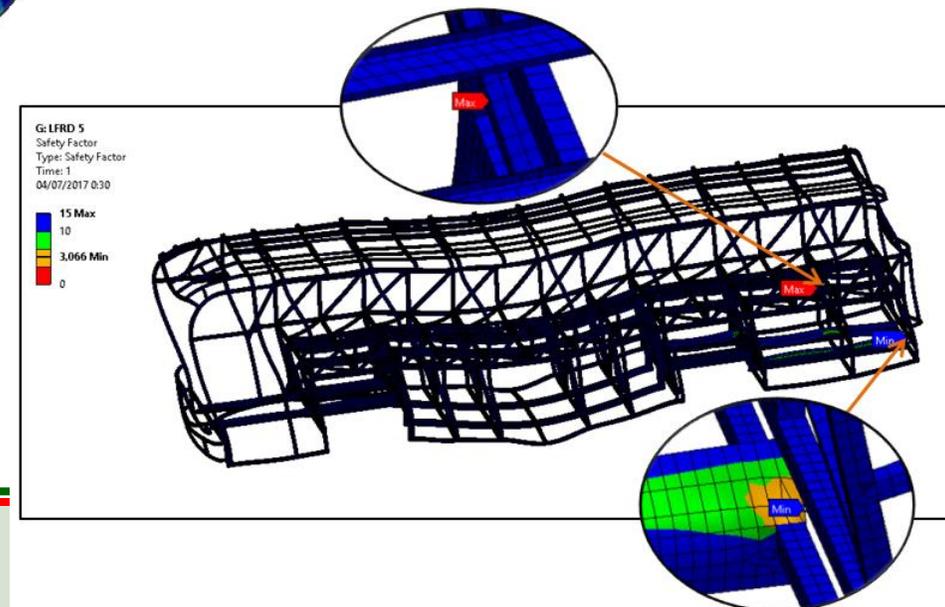
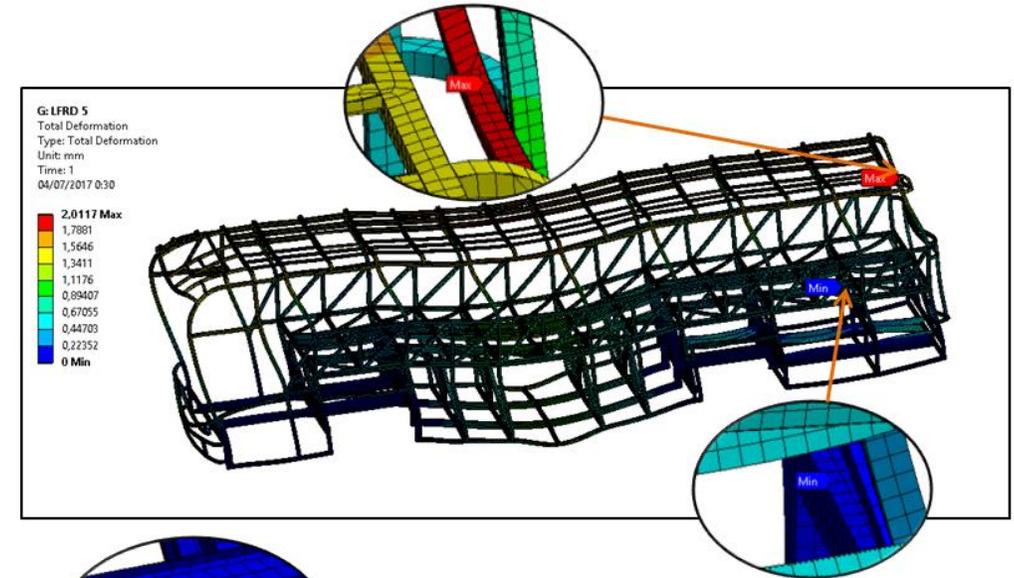
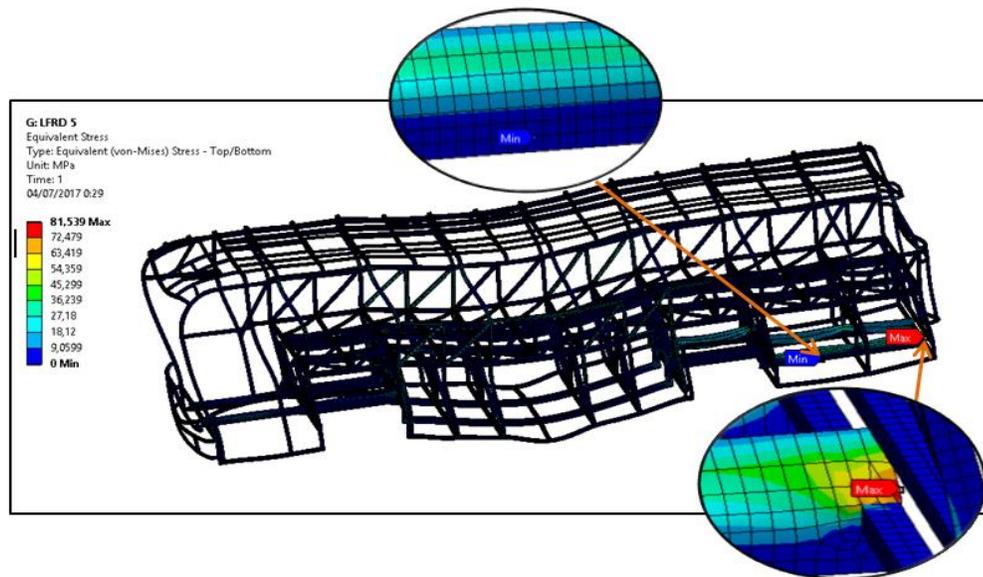
# COMBINACIÓN 4

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 4 tiene la configuración  $1,2M+1,6F+0,8Raf$  con un valor de 250543,915 N



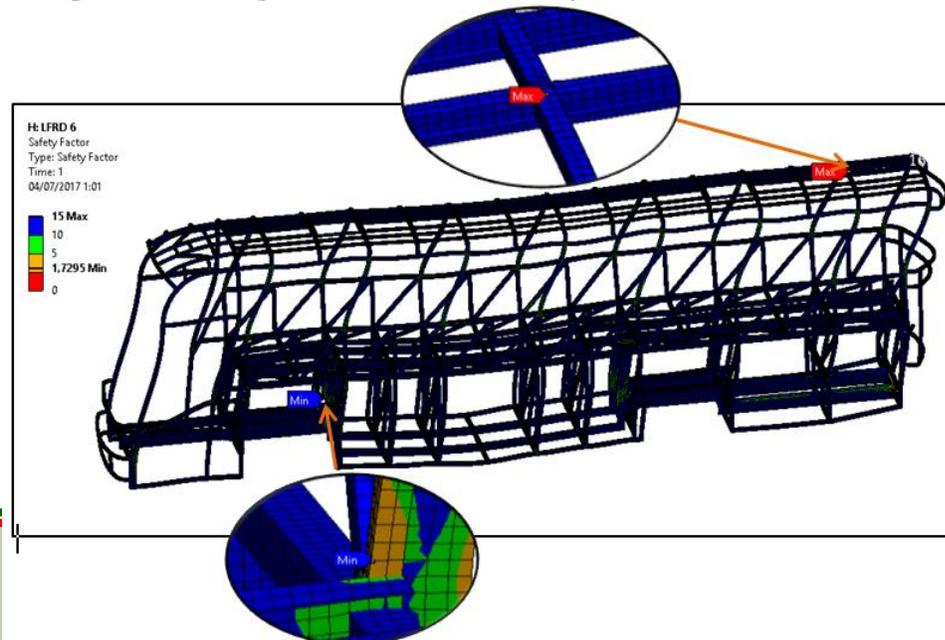
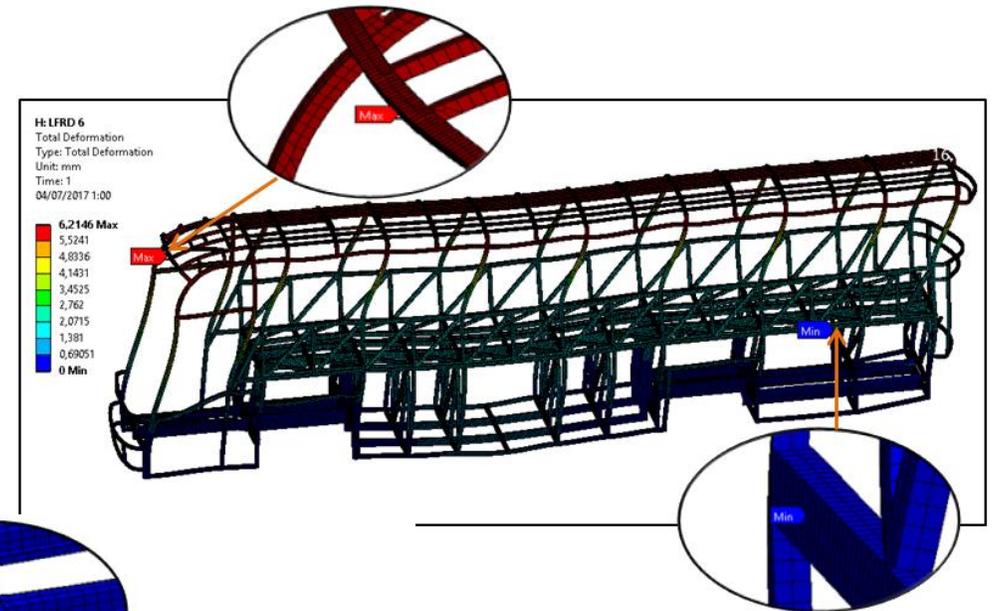
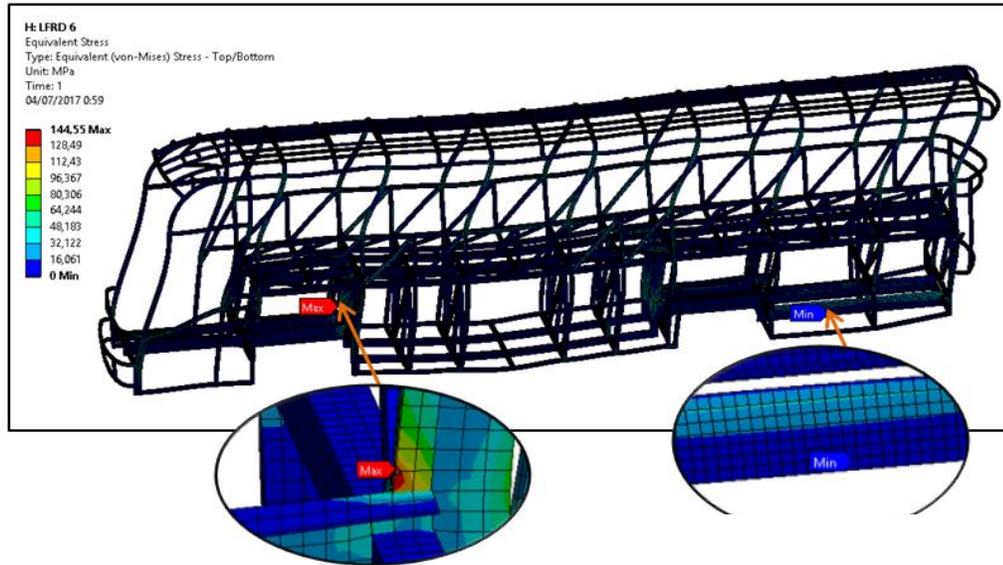
# COMBINACIÓN 5

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 5 tiene la configuración  $1,2M+0,5V+0,5F+1,3Raf$  con un valor de 198745,002 N



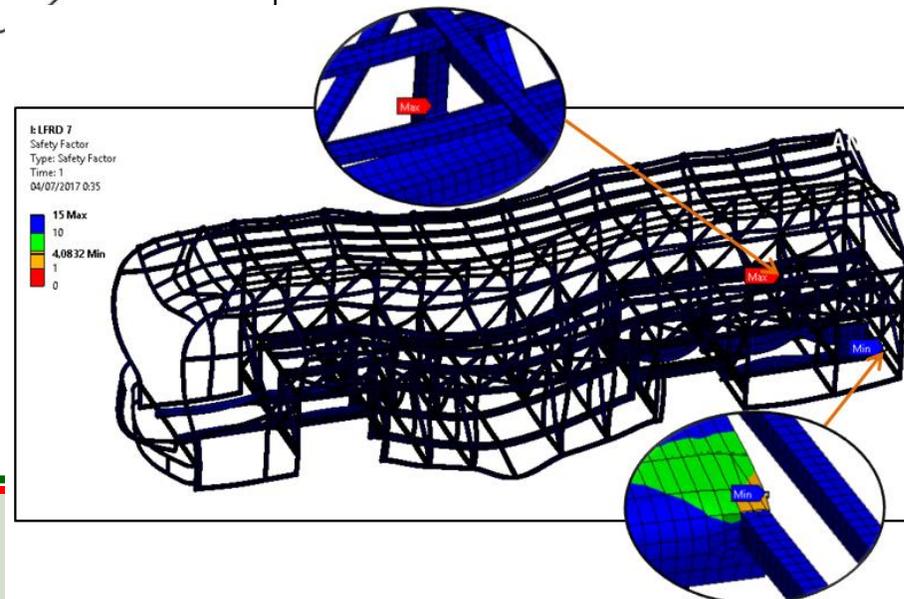
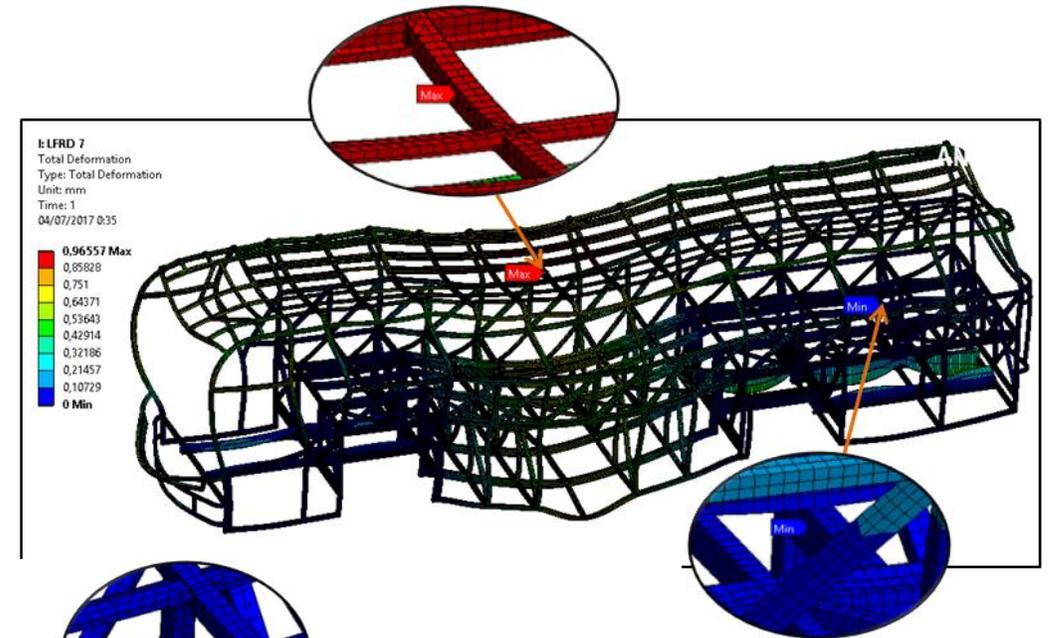
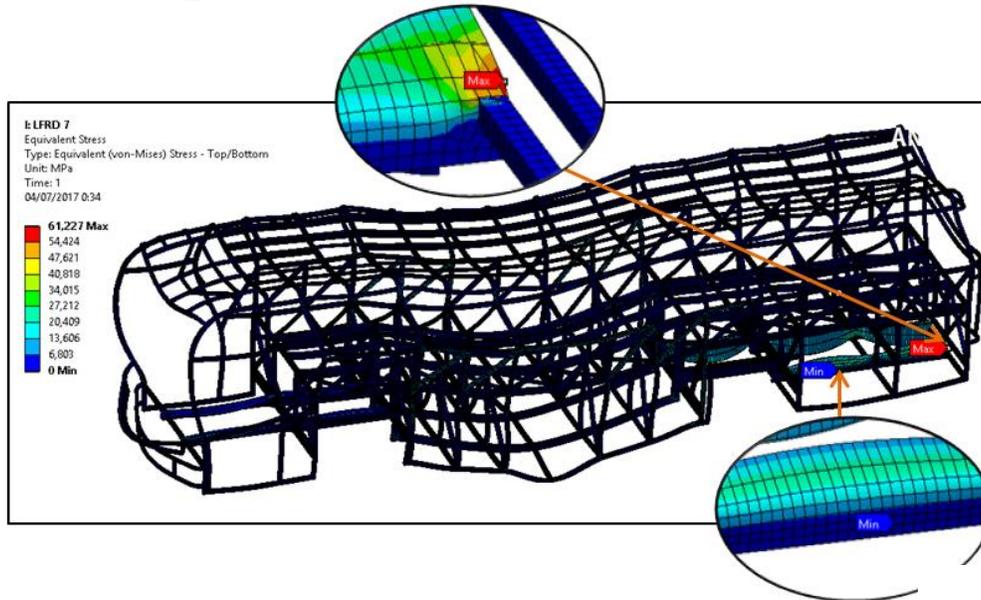
# COMBINACIÓN 6

- Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 6 tiene la configuración  $1,2M+1,5A_b+0,5V$  con un valor de 258972,234 N



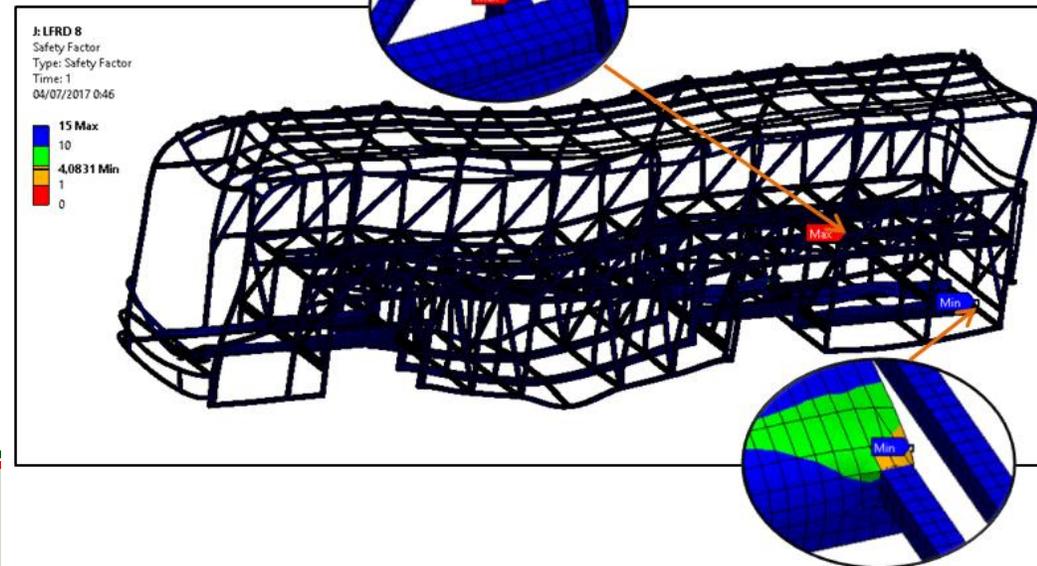
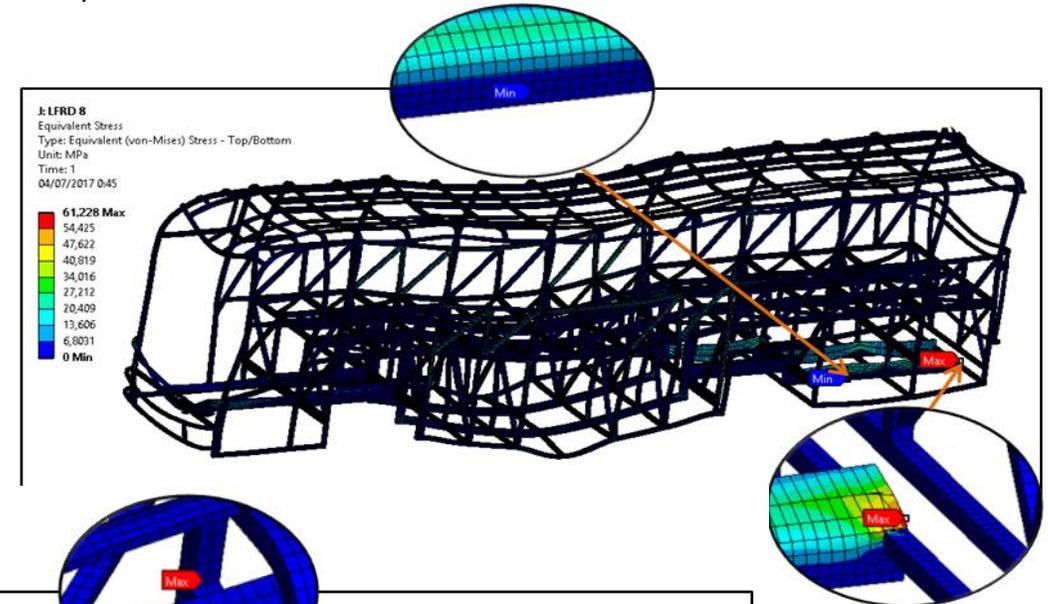
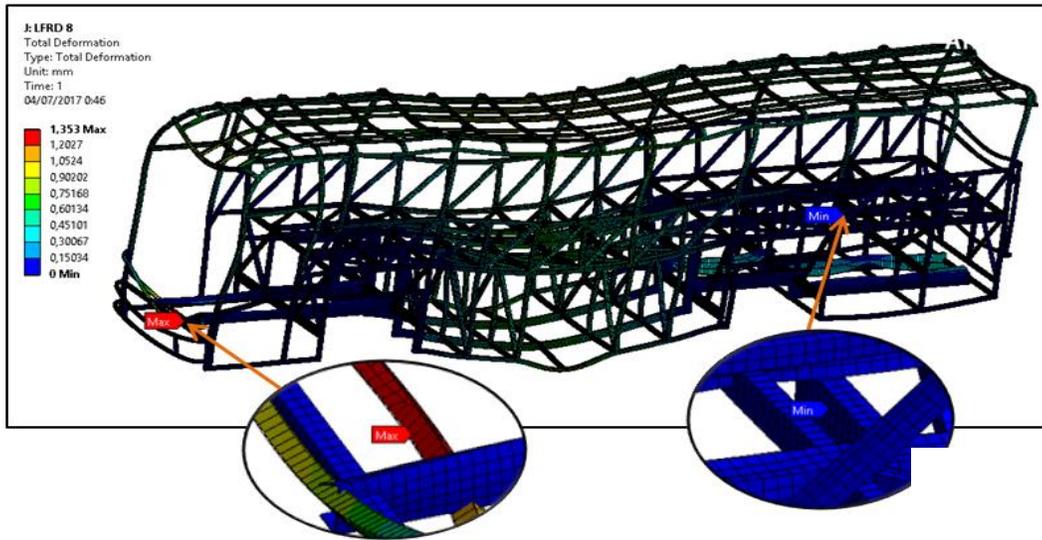
# COMBINACIÓN 7

- Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 7 tiene la configuración 0,9M-1,3Raf con un valor de 106505,478 N



# COMBINACIÓN 8

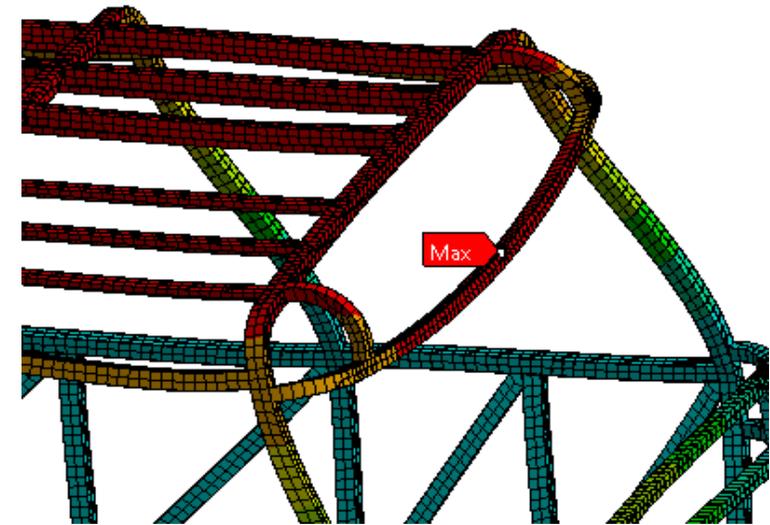
- Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 8 tiene la configuración  $0,9M+1,3Raf$  con un valor de 113366,007 N



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resumen de combinaciones de cargas aplicadas a la carrocería autoportante

Combinación LRFD	Valor (Mpa)		Valor (mm)	
	Esfuerzo Máx.	Esfuerzo Min	Deformación Máx	Deformación Min.
Combinación 1	95,07	0	1,53	0
Combinación 2	107,2	0	2,08	0
Combinación 3	95,28	0	6,21	0
Combinación 4	136,43	0	6,58	0
Combinación 5	81,53	0	2,01	0
Combinación 6	144,35	0	6,21	0
Combinación 7	61,22	0	0,96	0
Combinación 8	61,22	0	1,35	0



$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{1}{240}$$

$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{1765,29 \text{ mm}}{240} = 7,35 \text{ mm}$$

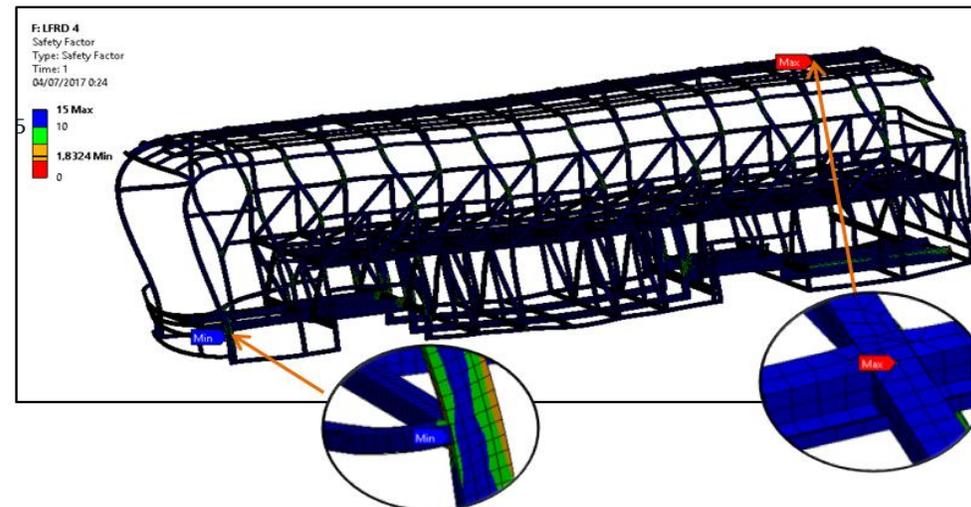
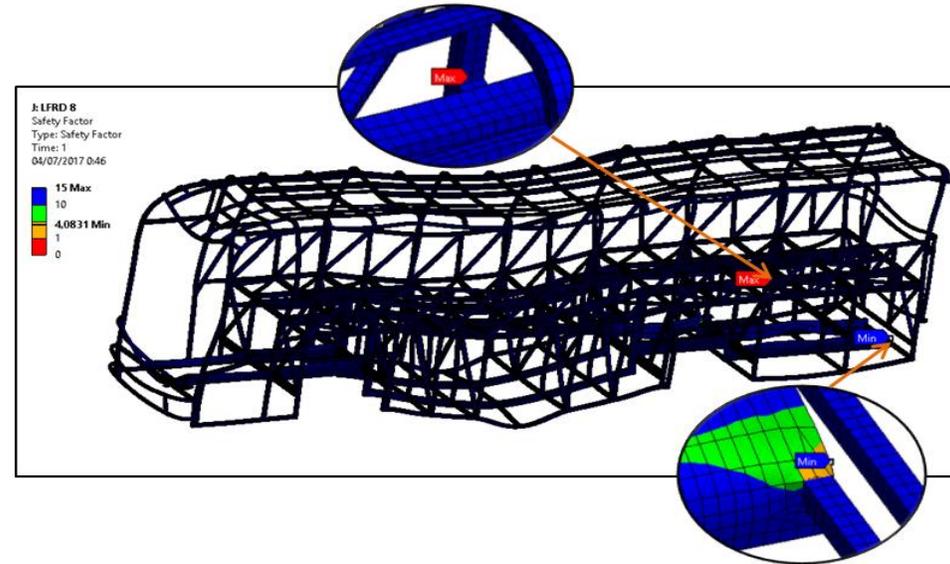
$$L_{240} = 7,35 \text{ mm} > 6,58 \text{ mm}$$



# FACTOR DE SEGURIDAD

Factor de seguridad por cada carga combinada según el método LRFD aplicada a la carrocería autoportante

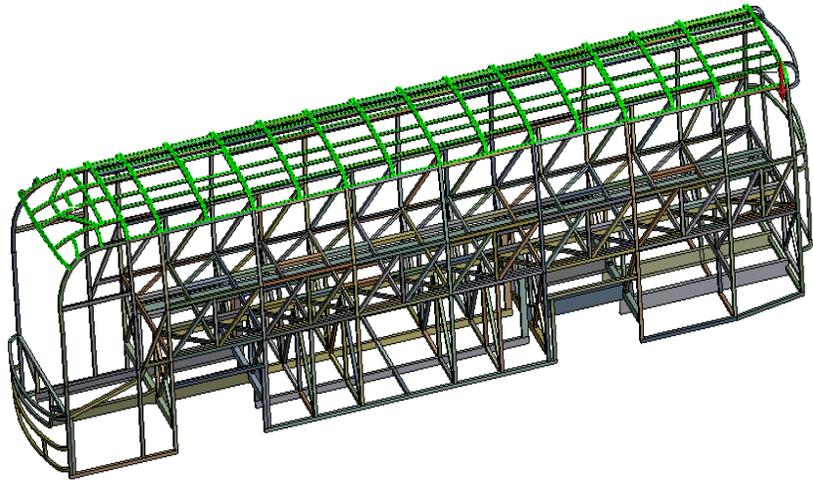
Combinación de carga	Valor
Combinación 1	$n = 2,6$
Combinación 2	$n = 2,3$
Combinación 3	$n = 2,62$
Combinación 4	$n = 1,83$
Combinación 5	$n = 3,06$
Combinación 6	$n = 1,72$
Combinación 7	$n = 4,08$
Combinación 8	$n = 4,08$



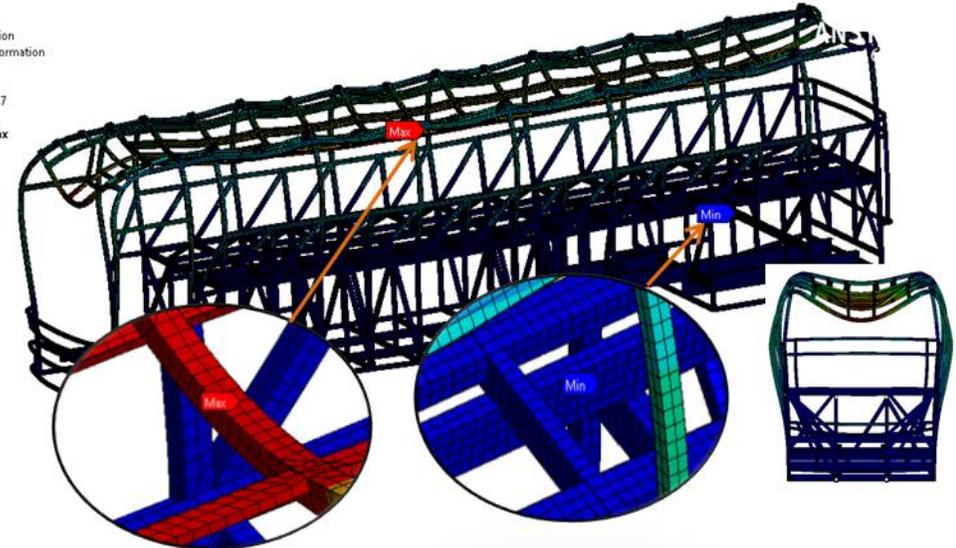
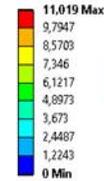
# CARGA ESTÁTICA SOBRE EL TECHO

$$\text{Carga techo} = 0,5(18500 \text{ kg}) \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Carga techo} = 90650 \text{ N}$$



E: Base  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
03/07/2017 21:37



la deformación máxima producida en el techo, la cual es de 11,019 mm



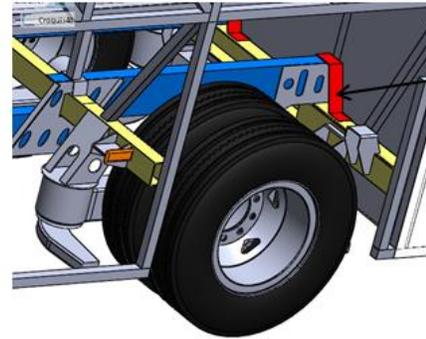
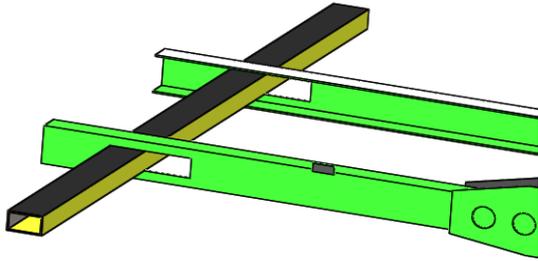


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

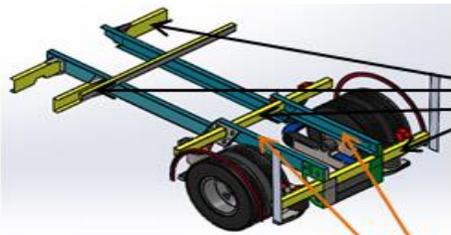
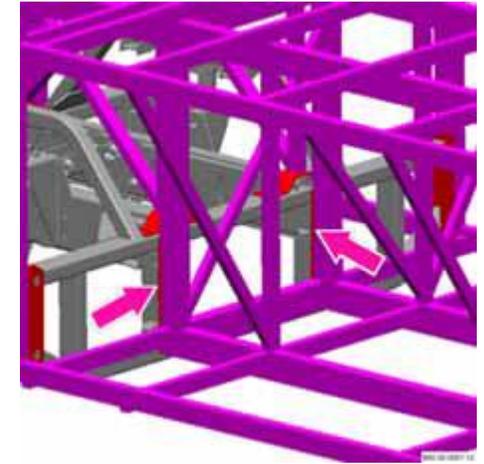
# PROPUESTA DE DISEÑO PARA BUS AUTOPORTANTE



# REGIONES PARA LA FIJACIÓN DE LA CARROCERÍA AL CHASIS

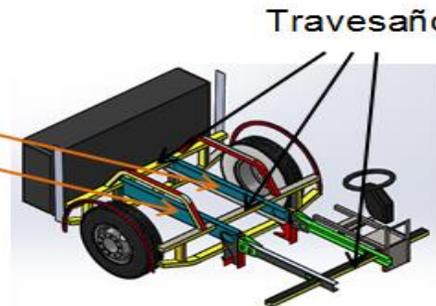


Fijación a la carrocería

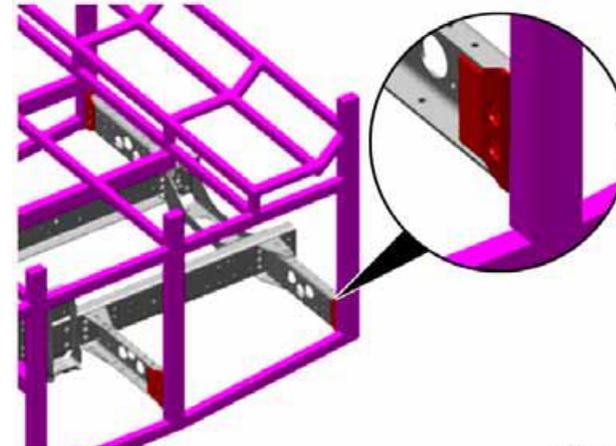


Travesaños

Bastidor



Travesaños



# SOLDADURA





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO ESTÉTICO DEL BUS INTERPROVINCIAL TIPO AUTOPORTANTE



# CONFIGURACIÓN INTERNA

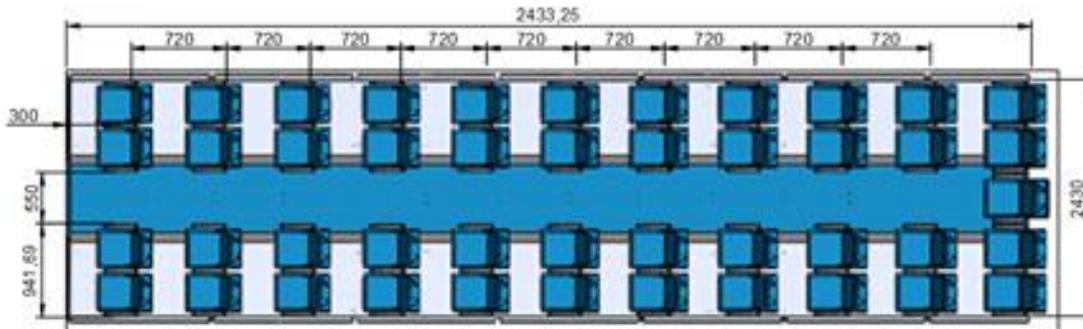
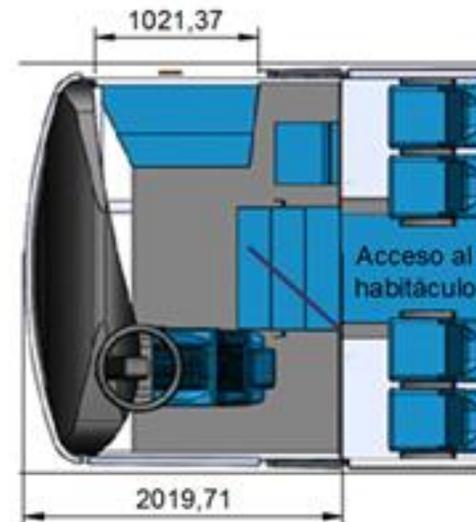
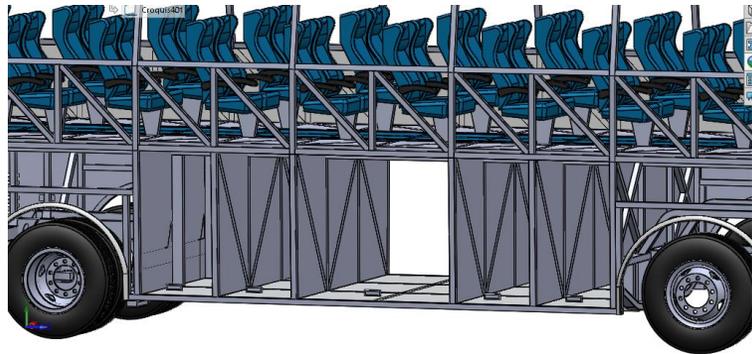


Figura 167 Disposición de los asientos



# CONFIGURACIÓN DE RECUBRIMIENTOS LATERALES, TECHO Y BODEGAS



# ***CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO***





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

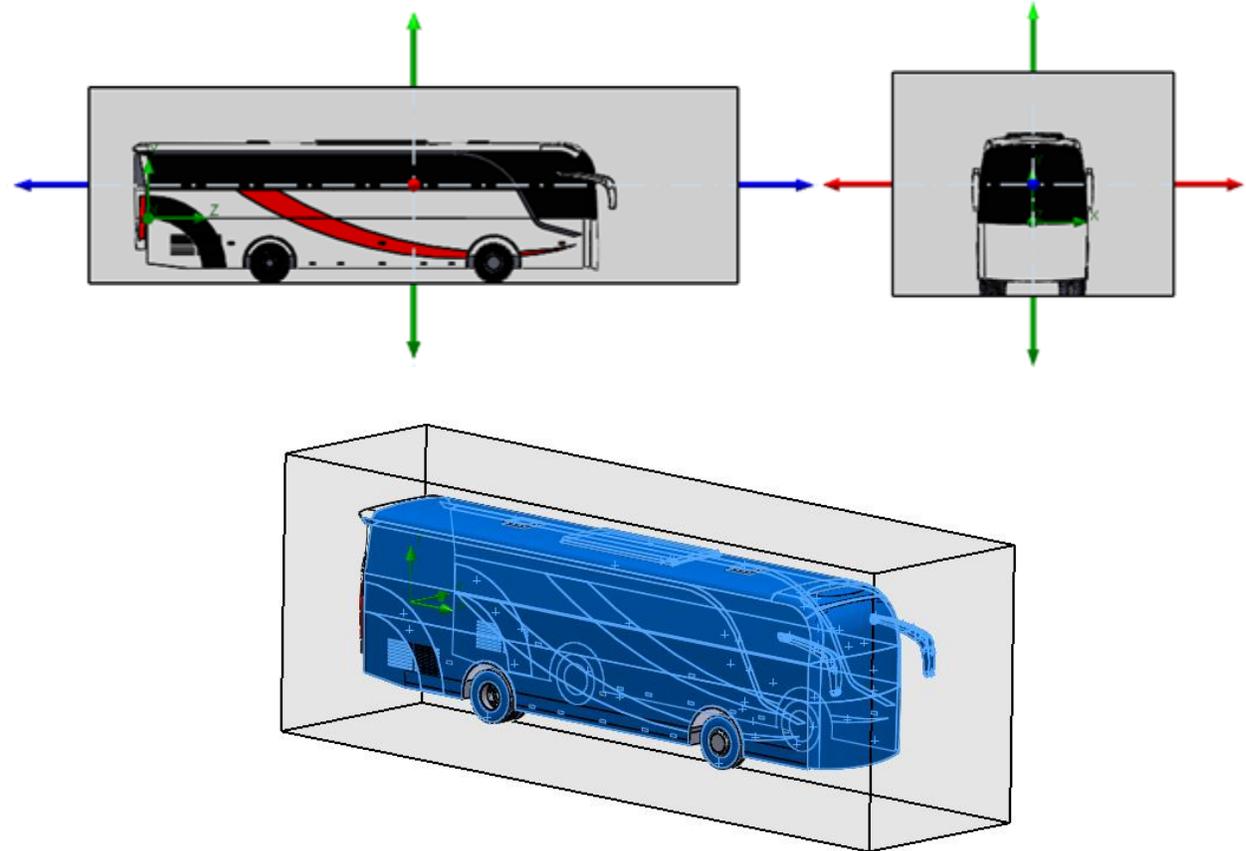
# ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL BUS AUTOPORTANTE



# CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE BUS AUTOPORTANTE

Condiciones de funcionamiento de bus autoportante

ITEM	VALOR
Presión	101325 Pa
Temperatura	293,2 °K
Velocidad del bus	27,78 m/s
Densidad del aire	1,225 Kg/m <sup>3</sup>
Humedad relativa del aire	50%



# Metas – Variables dependientes

Cz

Type	Equation Goal
Formula	GG Force (Z) $1/(0.5*GG \text{ Max Density (Fluid)} * (27.7^2)*7.976)$

Cy

Type	Equation Goal
Formula	GG Force (Y) $1/(0.5*GG \text{ Max Density (Fluid)} * (27.7^2)*7.976)$

Potencia

Type	Equation Goal
Formula	$0.5*Cz*GG \text{ Max Density (Fluid)} * 1*7.976*(27.7^3)$



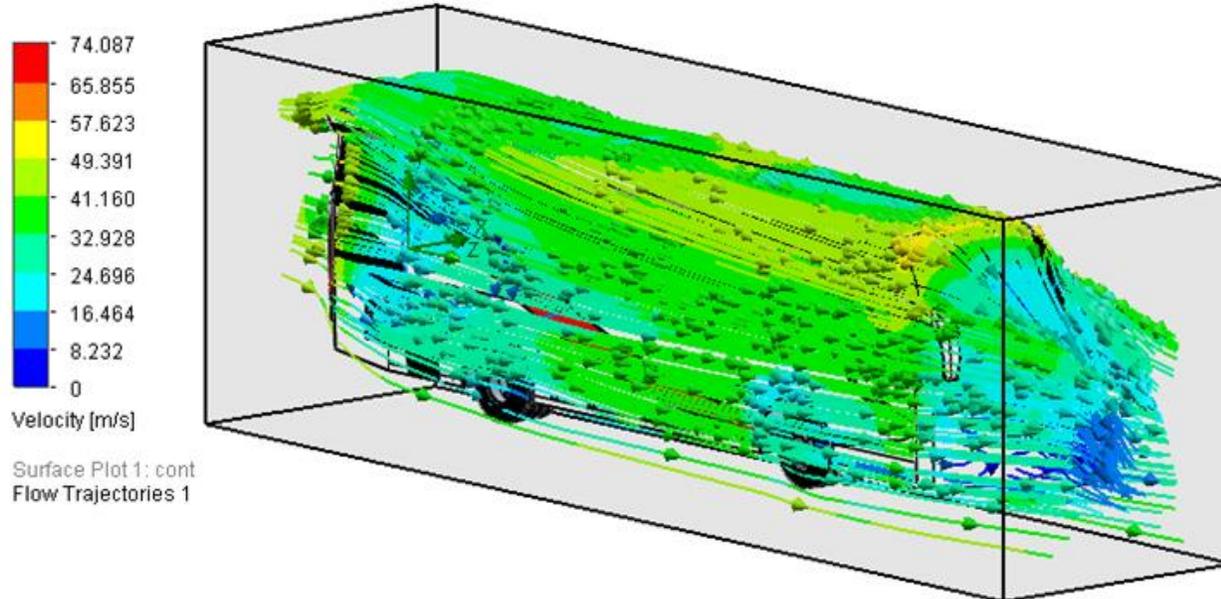


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL TUNEL DE VIENTO

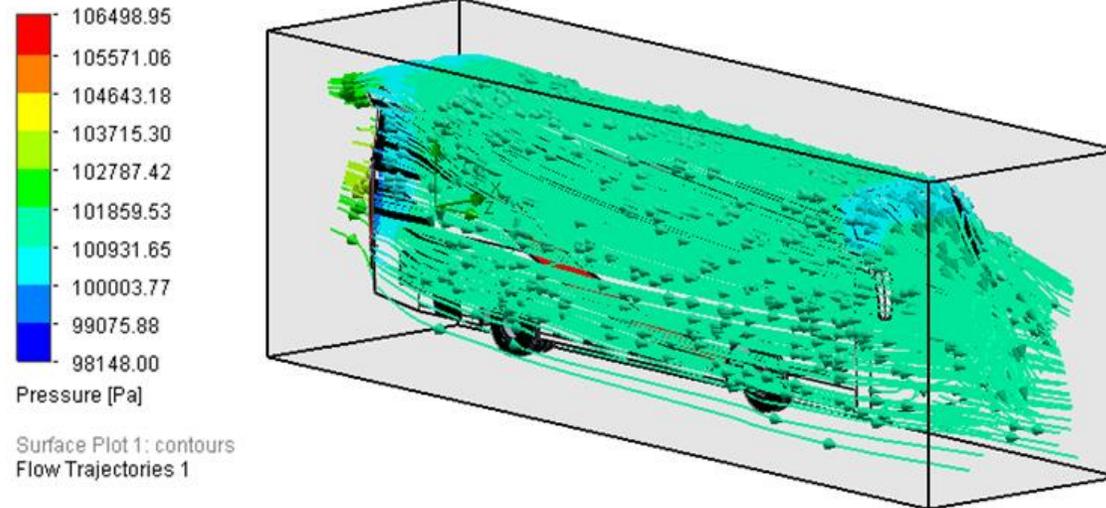


# ANALISIS DE RESULTADOS DEL TUNEL DE VIENTO



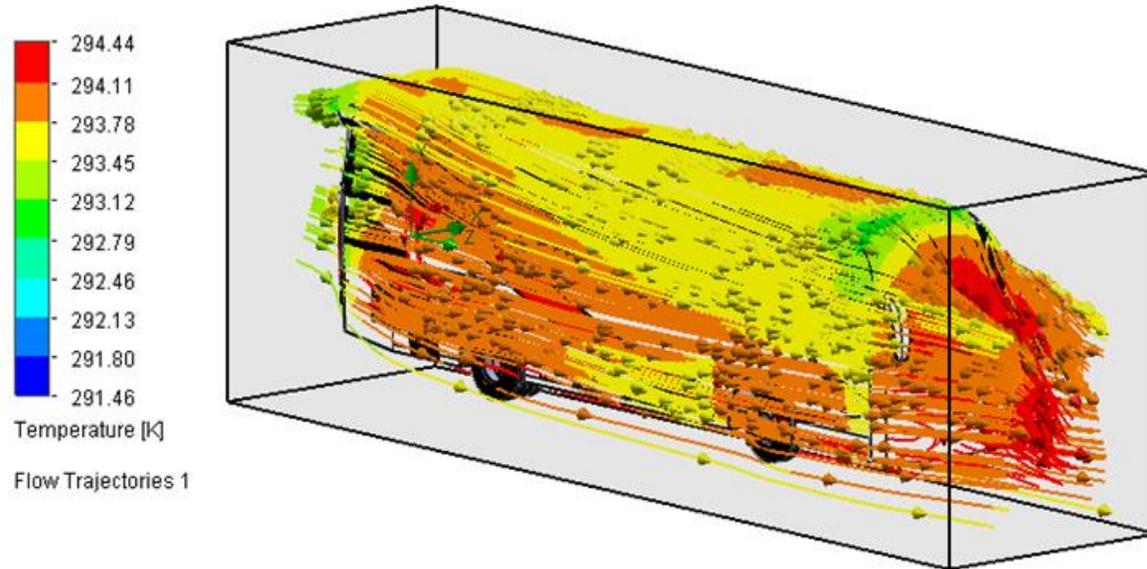
La velocidad del aire a la entrada del túnel de viento asciende desde 0 m/s hasta 24,696 m/s al chocarse contra la parte frontal del bus autoportante, al llegar a las curvas de diseño la velocidad del aire aumenta hasta 57,623 m/s, terminando el recorrido del bus con la velocidad del aire en disminución hasta 41,160 m/s

# ANALISIS DE RESULTADOS DEL TUNEL DE VIENTO



La presión del aire a la entrada del túnel de viento se mantiene constante incluso al chocarse contra la parte frontal del bus autoportante con un valor de 100931,65 Pa, al llegar a las curvas de diseño la presión del aire disminuye hasta 100003,77 Pa, terminando el recorrido del bus con la presión del aire en aumento hasta 103715,30 Pa.

# ANALISIS DE RESULTADOS DEL TUNEL DE VIENTO



La temperatura del aire a la entrada del túnel de viento se mantiene constante con un valor de  $294,1^{\circ}\text{K}$  hasta chocar contra la parte frontal del bus autoportante donde la temperatura haciende a  $294,44^{\circ}\text{K}$ , al llegar a las curvas de diseño la temperatura del aire disminuye hasta  $293,12^{\circ}\text{K}$ , terminando el recorrido del bus con la presión del aire en aumento hasta  $293,45^{\circ}\text{K}$ .

# METAS OBTENIDAS EN EL ANÁLISIS AERODINÁMICO

Nombre	Unidad	Valor
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1.21
Fuerza (Y)	N	1113.947
Fuerza (Z)	N	-2656.455
Velocidad Máxima	m/s	36.390
Número de Reinolds	kg/m <sup>3</sup>	7400058.13
C <sub>y</sub>	kg/m <sup>3</sup>	0.30
C <sub>z</sub>	kg/m <sup>3</sup>	-0.72
Potencia	kg/m <sup>3</sup>	-73583.79

$$R_{af} = 2656.455 \text{ N}$$

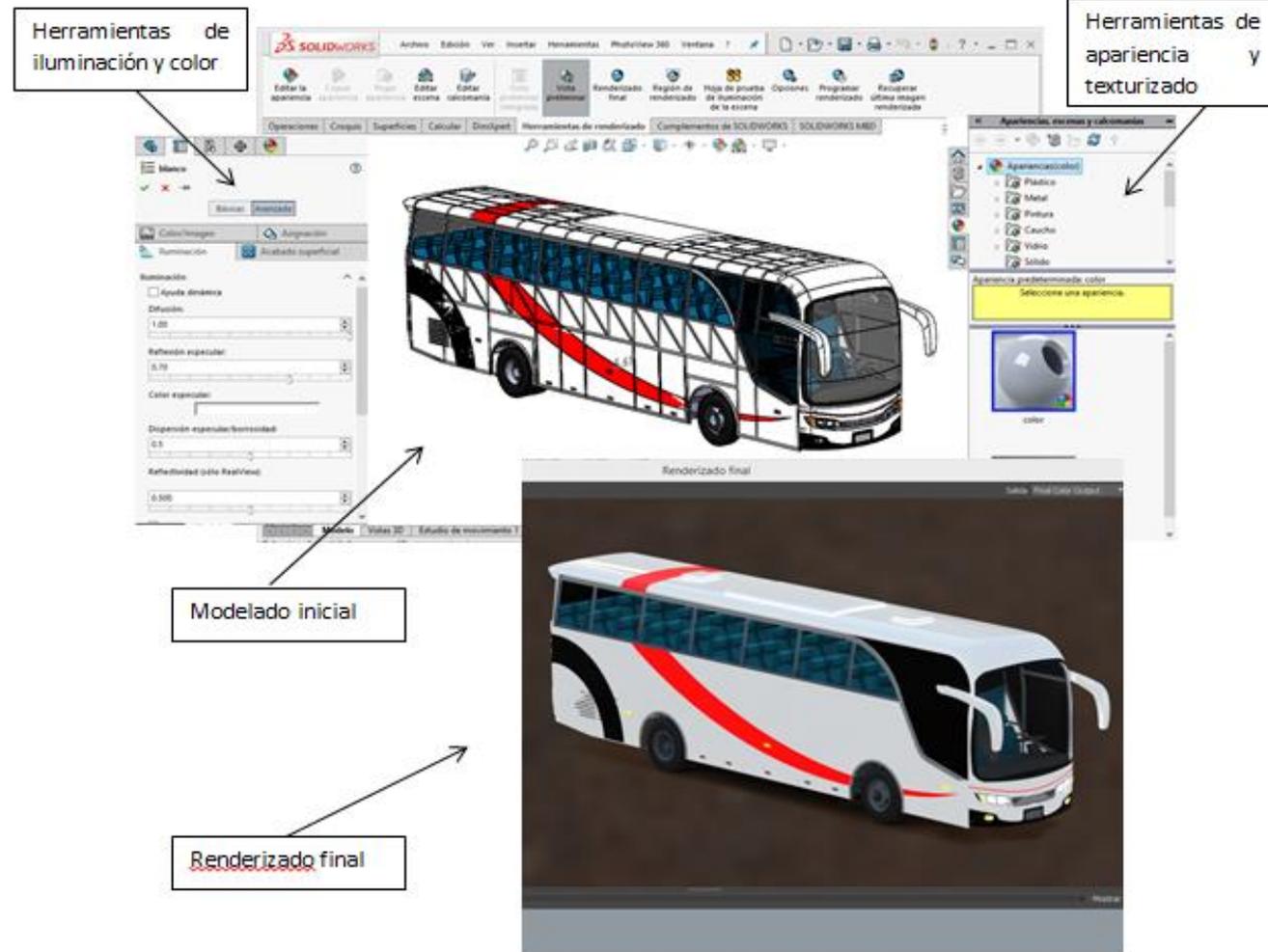
$$Potencia = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot A_f V^3$$

$$Potencia = \frac{1}{2} \cdot (0,7) \cdot \left( 1,225 \left( \frac{Kg}{m^3} \right) \right) \cdot 7,976 (m^2) \cdot \left( 27,77 \frac{m}{s} \right)^3$$

$$Potencia = 73,58 \text{ KW}$$



# RENDERIZACIÓN





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CONCLUSIONES

- Se obtuvo información teórica mediante el catálogo de construcción de carrocerías para chasis Mercedes Benz O500R18/3, el cual detalla los parámetros a tomar en cuenta para el dimensionamiento inicial a partir de la adquisición del chasis, configuración de componentes sobre cada módulo del bastidor y la construcción del bus autoportante, también se obtuvo planos, manuales de construcción y memorias técnicas de materiales empleados en la estructura a través del departamento de producción de carrocerías M&L.
- El presente análisis parte de un estudio detallado que determina el modelado geométrico y matemático de una estructura autoportante para bus interprovincial dirigido para Carrocerías M&L, conociendo las condiciones a las cuales es sometida la misma durante su funcionamiento, estableciendo las pautas adecuadas para verificar su resistencia a través del cumplimiento de Normas (NTE INEN 1323, NTE INEN 1668, NTE INEN 2415) y Reglamentos (RTE INEN 043) vigentes en el País.

# CONCLUSIONES

- Se utiliza la metodología de modelado 3D en software CAD en la simulación y análisis en la Unidad de transporte utilizando herramientas computacionales apropiadas para el modelado geométrico de la estructura, para la comprobación de interferencia y contactos de los perfiles diseñados; posteriormente el análisis de la superestructura mediante Software CAE.
- La malla realizada en el modelado de la estructura autoportante debe ser de buena calidad con la finalidad de que el análisis cuasiestático propine resultados exactos por lo que se utilizó tres indicadores para medir la calidad de malla: Orthogonal Quality, Skewness, y radio Jacobiano, en cada método de medición la calidad de malla fue excelente.



# CONCLUSIONES

- **Resistencia de la estructura en base a combinaciones de cargas**

La máxima deformación de la carrocería autoportante se presenta en la combinación 4 del método LRFD con un valor de 6,58 mm y se verifica que cumple con lo estipulado en la norma, pues alcanza una deformación del elemento menor a 1/240 veces su longitud

$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{1765,29 \text{ mm}}{240} = 7,35 \text{ mm}$$
$$L_{240} = 7,35 \text{ mm} > 6,58 \text{ mm}$$

Lo cual señala que la deformación se encuentra por debajo del límite aceptable sin ocasionar ruptura de los elementos.

- La máxima carga que soporta la carrocería autoportante se presenta en la combinación 6 del método LRFD con un valor de 144,35 MPa bajo el criterio de esfuerzos de Von Mises, el cual no apunta a una ruptura de los perfiles estructurales

# RECOMENDACIONES

- El modelo realizado en CAD no debe presentar errores de geometría, de interferencias, y mantener el contacto entre elementos ya que al momento de la simulación presenta errores e inconvenientes con resultados erróneos o nulos
- Utilizar una malla de buena calidad (30) mediante el uso de elementos triangulares, cuadráticos, tetraedros que presentan excelente distribución de deformación hacia la solución real. La calidad de mallado se puede comparar mediante las tablas establecidas en el Capítulo II.
- Tener especial atención en el modelado de las partes que son mas vulnerables a los efectos de las cargas como los elementos del piso, techo y la unión





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**

