



Maestría en Diseño Mecánico
Mención Fabricación de Autopartes

ANÁLISIS ESTRUCTURAL A CARGAS DE IMPACTO POSTERIOR POR ALCANCE DE UN BUS INTERPROVINCIAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Diego Geovanni Cuasapud Puente

Director: Ing. Julio Leguisamo, M.Sc.

Febrero 2018

JUSTIFICACIÓN



Organización
Mundial de la Salud



Agencia
Nacional
de Tránsito



OBJETIVO

Analizar el fenómeno físico de impacto posterior por alcance y su incidencia en la carrocería de un autobús empleado en el transporte interprovincial, mediante el método de elementos finitos en los elementos de falla de la estructura de la carrocería, para evaluar las deficiencias en el diseño estructural previo y en la selección de los materiales utilizados en la estructura de los autobuses.

TRABAJOS PREVIOS

Mejora de la resistencia de la estructura de un autobús sometido a impacto frontal.

Jongpradist P, Senawat S y Muangto B (2015)

Optimización de las superestructuras de autobuses y autocares sometidos al vuelco lateral.

Alcala Fazio, E. (1997)

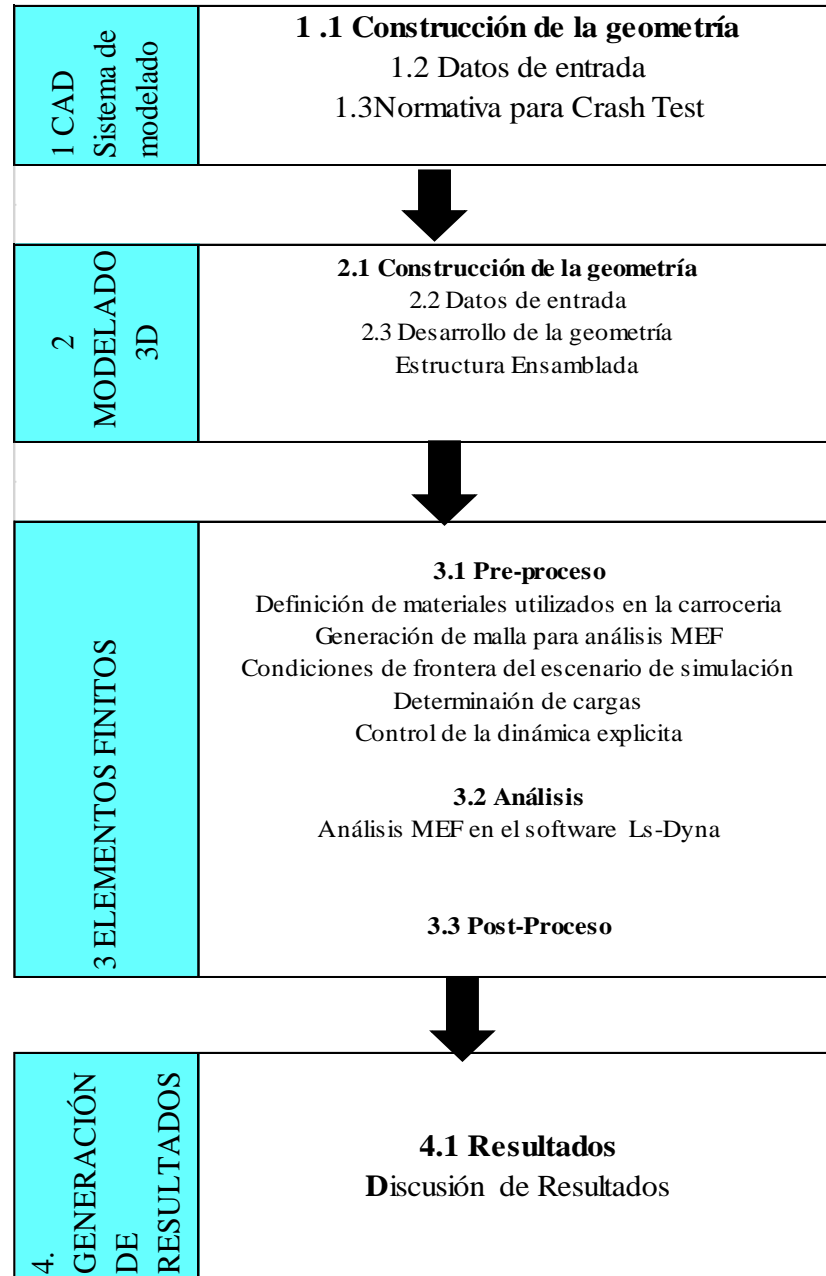
Propuesta de diseño estructural para buses de carrocería interprovincial.

Cárdenas, D., Escudero, J., Quizhpi, S., y Pinos, M. A. (2014)

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.

Esmeraldas, A. (2016)

MÉTODO



1. Datos de entrada

NORMAS PARA CONSTRUCCION DE CARROCERIAS EN ECUADOR

| | |
|---|---|
| Requisitos de seguridad | ----- RTE INEN 043 |
| Dimensiones externas del bus | ----- NTE INEN 1668 Primera revisión 2015-03 |
| Requisitos generales para el diseño fabricación y montaje de carrocerías | ----- NTE INEN 1323:2009 |

Materiales utilizados para la construcción de carrocerías en Ecuador NTE INEN 1323:2009

| Perfil | Material | Parte de la carrocería |
|-------------------------|-------------------|---|
| Canal U 100x50x2mm | Acero galvanizado | Piso |
| Canal U 25x50x2mm | Acero galvanizado | Lat. Izq. + Lat. Der. + Techo (refuerzo) |
| Perfil omega 2mm | Acero galvanizado | Refuerzo de techo |
| Plancha 1.5mm | Acero galvanizado | Lat. Izq. + Lat. Der (refuerzo) |
| Tubo cuadrado 40x40x2mm | Acero galvanizado | Piso |
| Tubo cuadrado 40x40x2mm | Acero galvanizado | Plataforma + Frente + Respaldo + Techo |
| Tubo cuadrado 50x50x2mm | Acero galvanizado | Lat. Izq. + Lat. Der. + Techo (principal) |
| Tubo cuadrado 50x50x2mm | Acero galvanizado | Contravientos |
| Tubo cuadrado 50x50x3mm | Acero galvanizado | Piso + Apoyos |
| Tubo cuadrado 50x50x3mm | Acero galvanizado | Piso + Apoyos |
| Angulo 50x50x2mm | Acero galvanizado | Lat. Izq. + Lat. Der. (faldón) |
| Curva R 80mm | Acero galvanizado | Piso + Lat. Izq |
| Perfil 290x85x5mm | Acero galvanizado | Placas + Chasis |
| Perfil 30x50x255x50x2mm | Acero galvanizado | Lat. Izq. + Lat. Der (refuerzo) |

Dimensiones externas del Autobús.

NTE INEN 1668 Primera revisión 2015-03

| | |
|---|---|
| Dimensiones externas del vehículo (5.6.4) | a) Longitud total del vehículo (10250 a 13300) mm |
| | b) Ancho total del vehículo 2600 mm máximo en las partes más salientes de la estructura, siendo un ancho máximo de 75mm a cada lado con respecto al ancho máximo del chasis. |
| | c) Altura total del vehículo 3800 mm La medición de la altura total del vehículo debe realizarse entre la calzada y el techo de la carrocería, sin tomas de ventilación superior. |
| | d) Voladizo delantero y posterior; (2000 a 2900) mm , El voladizo delantero se mide entre el eje delantero y el extremo final de la carrocería frontal y El voladizo posterior se mide entre el eje trasero y el extremo final de la carrocería posterior. |
| Guardachoques frontal y posterior (5.6.7) | No deben sobrepasar de la carrocería en más de 300 mm y debe tener elementos de sujeción que garanticen la absorción de impactos |
| | La parte delantera inferior del parachoques delantero estará a una altura máxima de 500 mm desde la calzada y, la parte posterior inferior del parachoques posterior estará a una altura máxima de 600 mm desde la calzada. |
| Dimensiones interiores (5.6.12) | a) Altura interna del vehículo ; La altura mínima en el corredor central medido en el eje central longitudinal del vehículo debe ser 1900 mm |
| | b) Altura piso – borde inferior de la ventana ; debe ser de 700 mm. |

Procesos de producción de carrocerías nacionales

Diseño

Estructuras

Forado

Pintura

Acabados

Inspección final

Estructuras del piso, laterales, techo, anclajes, frente, posterior, refuerzos, cajuelas, gradas, camarotes, soldadores calificados

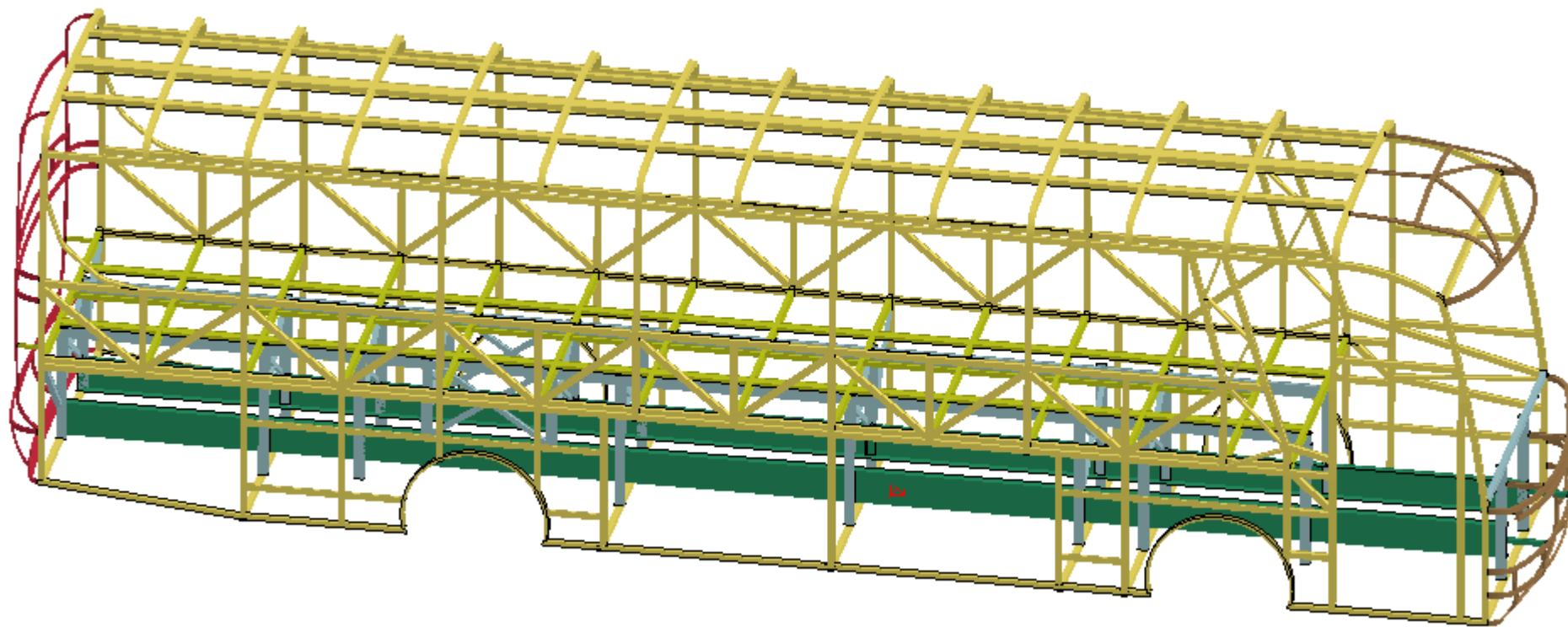
Forado externo e interno del autobús con recubrimiento de aluminio, fibra de vidrio o madera, vinil, acero.

Preparación de pintura y Pintura de la unidad, franjeado y señalítica

Electricidad, neumática, ventanas, parabrisas, asientos, asideros, puertas, tableros, consolas, etc.

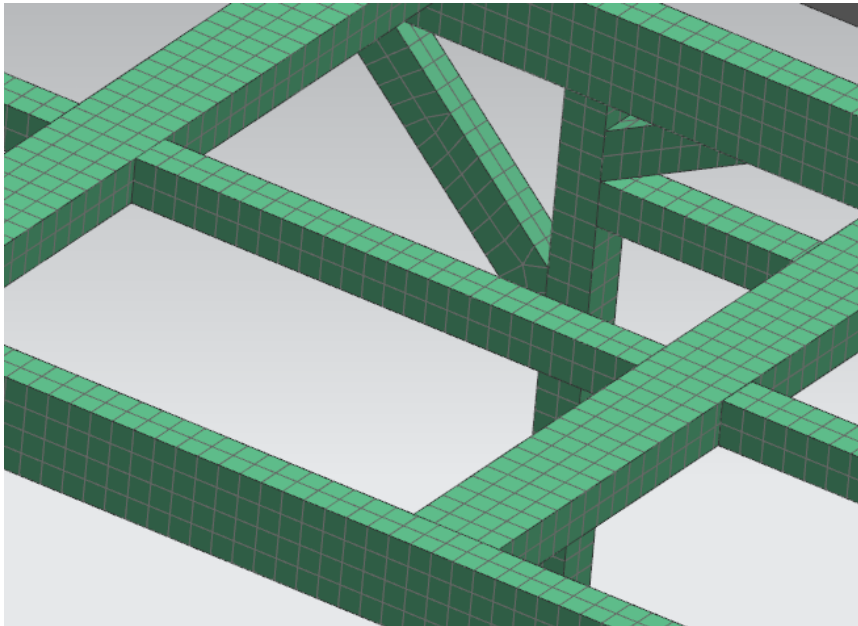
Inspección final a cargo de Control de calidad

Proyección de la geometría



GENERACIÓN DE LA MALLA

Malla 2D tipo superficie, tamaño 30 mm, teniendo en cuenta la el número de elementos para la simulación. de 310244 elementos



Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***ELEMENT_SHELL (310244)**

| EID | PID | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 7 | 8 | 5 | 6 | 0 | 0 |

COMMENT:

Total Card: 310244 Smallest ID: 1 Largest ID: 312102 Total deleted card: 0

- 302621_303178
- 303179_303736
- 303737_304294
- 304295_304852
- 304853_305410
- 305411_305968
- 305969_306526
- 306527_307084
- 307085_307642
- 307643_308200
- 308201_308758
- 308759_309316
- 309317_309874
- 309875_310432
- 310433_310990
- 310991_311548
- 311549_312102

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18

Verificar la calidad de la malla

Ratio Warping

| Shell check item | Allowable | Min. val | Max. val | #violated(%) |
|---|-----------|----------|----------|--------------|
| <input type="checkbox"/> Min side len | 625.4 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Max side len | 6254.0 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Aspect ratio | 10 | *** | *** | *** |
| <input checked="" type="checkbox"/> Warpage | 10 | 0 | 90 | 108(0.0348%) |
| <input type="checkbox"/> Min quad ang | 45 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Max quad ang | 135 | *** | *** | *** |

$0,1\text{min} \leq \text{Warpage} \leq 0,98$
Warpage=0,0348

Angle Skewness

| Shell check item | Allowable | Min. val | Max. val | #violated(%) |
|--|-----------|----------|----------|--------------|
| <input type="checkbox"/> Min tria ang | 30 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Max tria ang | 120 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Taper | 0.7 | *** | *** | *** |
| <input checked="" type="checkbox"/> Skew | 45 | 0 | 40 | 0(0%) |
| <input type="checkbox"/> Jacobian | 0.3 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Char. length | 1 | *** | *** | *** |

$0,1\text{min} \leq \text{Skewness} \leq 0,98$
Skewness=0,001

Ratio Jacobian

| Shell check item | Allowable | Min. val | Max. val | #violated(%) |
|--|-----------|----------|----------|--------------|
| <input type="checkbox"/> Skew | 45 | *** | *** | *** |
| <input checked="" type="checkbox"/> Jacobian | 0.3 | 0.301 | 1 | 0(0%) |
| <input type="checkbox"/> Char. length | 1 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Area | 5 | *** | *** | *** |
| <input type="checkbox"/> Feature angle | 30.00 | *** | *** | *** |

parámetro jacobiano es 0 %,

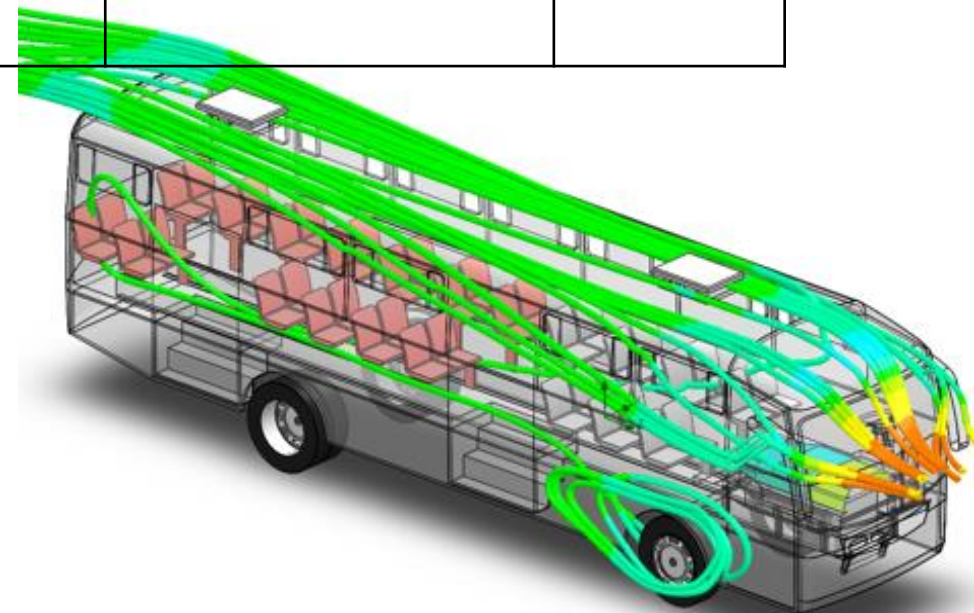
Precisión de las soluciones numéricas
Convergencia en simulaciones numéricas basadas en elementos finitos.

Condiciones de frontera análisis estático

Combinaciones de cargas según la Norma NTE INEN 1323:2009. Método LRFD

| | |
|--------|---|
| Caso 1 | $1.4 M + V$ |
| Caso 2 | $1.2 M + 1.6 V + 0.5 G$ |
| Caso 3 | $1.2 M + 0.5 V + 1.6 G$ |
| Caso 4 | $1.2 M + 1.6 F + 0.8 \text{ Raf}$ |
| Caso 5 | $1.2 M + 0.5 V + 0.5 F + 1.3 \text{ Raf}$ |
| Caso 6 | $1.2 M + 1.5 Ab + 0.5 V$ |
| Caso 7 | $0.9 M - 1.3 \text{ Raf}$ |
| Caso 8 | $0.9 M + 1.3 \text{ Raf}$ |

| Tipo de carga | Ref. Norma | Valor |
|---|--------------------|------------|
| Carga muerta (M) | NTE INEN 1323:2009 | 96399.86 N |
| Carga viva (V) | NTE INEN 1323:2009 | 42829,67 N |
| Carga de giro (G) | NTE INEN 1323:2009 | 25217,14 N |
| Carga de frenado (F) | NTE INEN 1323:2009 | 56486.45 N |
| Carga de aceleración brusca (Ab) | NTE INEN 1323:2009 | 56486.45 N |
| Carga de resistencia aerodinámica (Raf) | NTE INEN 1323:2009 | 2139.03 N |



Condiciones de frontera análisis dinámico

Material usado en la simulación

Keyword Input Form (Subsys: 1 004 simulacion bus completo.k)

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (2)
(Can not edit keyword since it is associated with post D3PLOT)

TITLE: acero

| MID | RO | E | PR | SIY | ETAN | FAIL | TDEL |
|-----|----|-----------|-----------|------------|------|------|------------|
| 1 | 1 | 7.800e-09 | 2.000e+05 | 0.30000000 | 0.0 | 0.0 | 0.30000000 |

| C | P | LCSS | LCSR | VP |
|---|-----|------|------|-----|
| 2 | 0.0 | 1 | 0 | 0.0 |

| EPS1 | EPS2 | EPS3 | EPS4 | EPS5 | EPS6 | EPS7 | EPS8 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| ES1 | ES2 | ES3 | ES4 | ES5 | ES6 | ES7 | ES8 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

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

Velocidad normas NHTSA, 2012

Keyword Input Form (Subsys: 1 004 simulacion bus completo.k)

*INITIAL_VELOCITY_NODE (115426)
(Can not edit keyword since it is associated with post D3PLOT)

| NID | VX | VY | VZ | VXR | VYR | VZR | ICID |
|-----|----|-----|-----|-----------|-----|-----|------|
| 1 | 1 | 0.0 | 0.0 | 1.556e+04 | 0.0 | 0.0 | 0 |

COMMENT:

Total Card: 115426 Smallest ID: 1 Largest ID: 115426 Total deleted card: 0

Restricciones

Keyword Input Form (Subsys: 1 004 simulacion bus completo.k)

*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY_(TITLE) (1)
(Can not edit keyword since it is associated with post D3PLOT)

TITLE:

| PID | CID | NSID | PNODE | IPRT | DRFLAG | RRFLAG |
|-----|-----|------|-------|------|--------|--------|
| 1 | 15 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 15 Largest ID: 15 Total deleted card: 0

Tiempo de impacto: 50 ms

Keyword Input Form (Subsys: 1 004 simulacion bus completo.k)

*CONTROL_TERMINATION (1)
(Can not edit keyword since it is associated with post D3PLOT)

| ENDTIM | ENDCYC | DTMIN | ENDENG | ENDMAS | NOSQL |
|--------|--------|-----------|--------|--------|-------|
| 1 | 1 | 0.2000000 | 0 | 0.0 | 0.0 |

COMMENT:

MODELOS MATEMÁTICOS

TEORÍA DEL IMPULSO

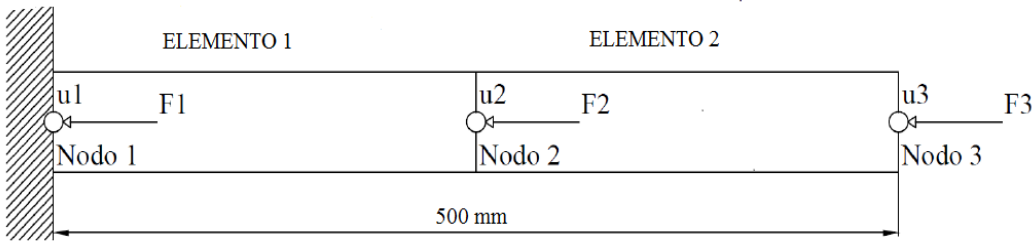
$$P_1 = P_2$$

$$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2}$$

Datos para el cálculo de la fuerza de choque

| Concepto | Valor |
|---|-----------------|
| Velocidad inicial del bus interprovincial | Cero |
| Velocidad de la barrera móvil | 50 Km/h |
| Tiempo de contacto en el choque | 50 ms |
| Masa del bus (Carga estructura) | 5085.03 Kg (m1) |
| Masa de la barrera móvil | 1500 Kg (m2) |

Método del elemento finito



Condiciones de frontera método de elementos

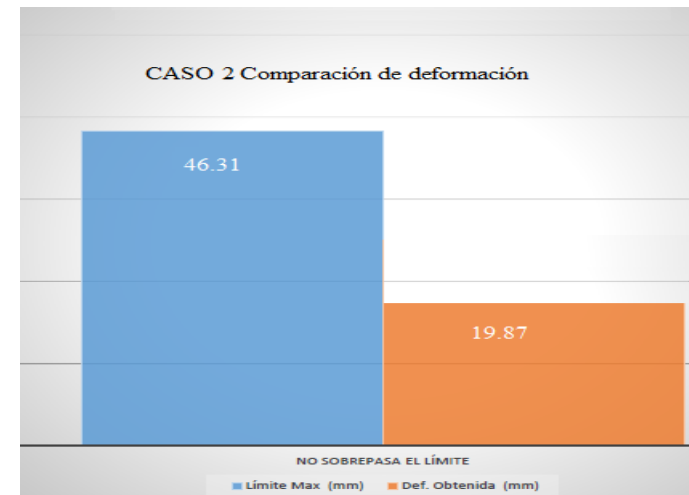
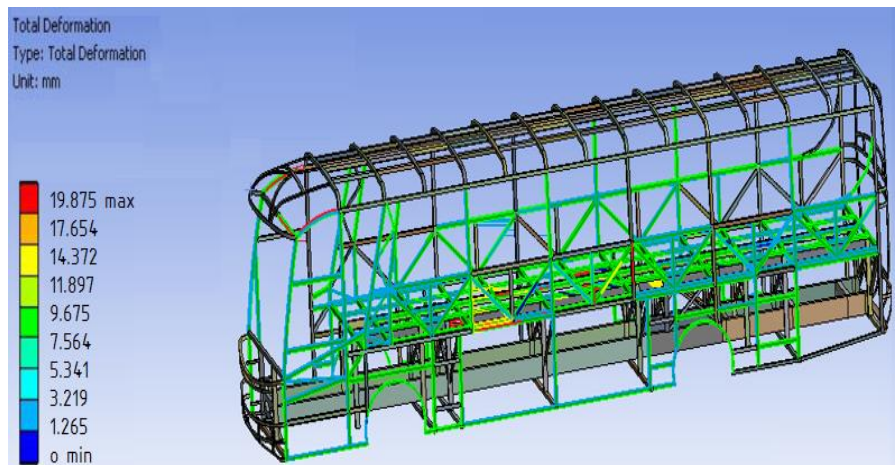
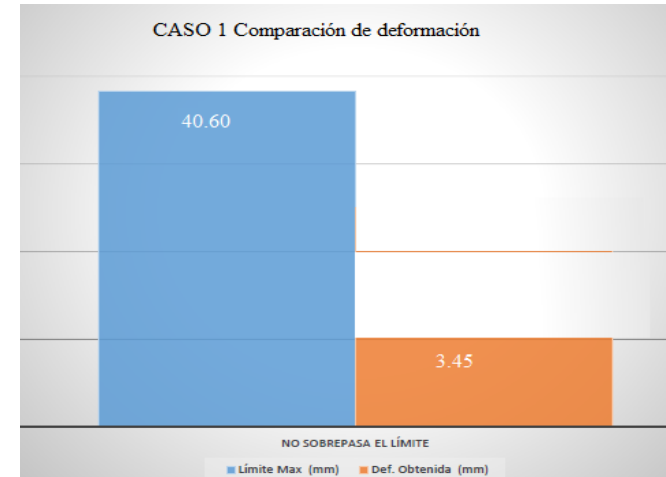
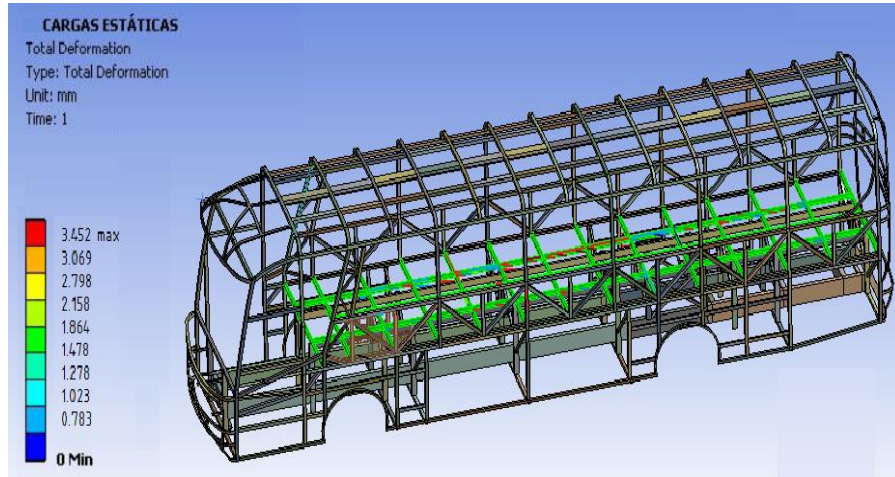
| Concepto | Valor |
|----------------------|------------|
| Desplazamiento u_1 | 0 |
| Desplazamiento u_2 | Incógnita |
| Desplazamiento u_3 | Incógnita |
| Fuerza F_1 | Incógnita |
| Fuerza F_2 | 0 |
| Fuerza F_3 | 272699,2 N |

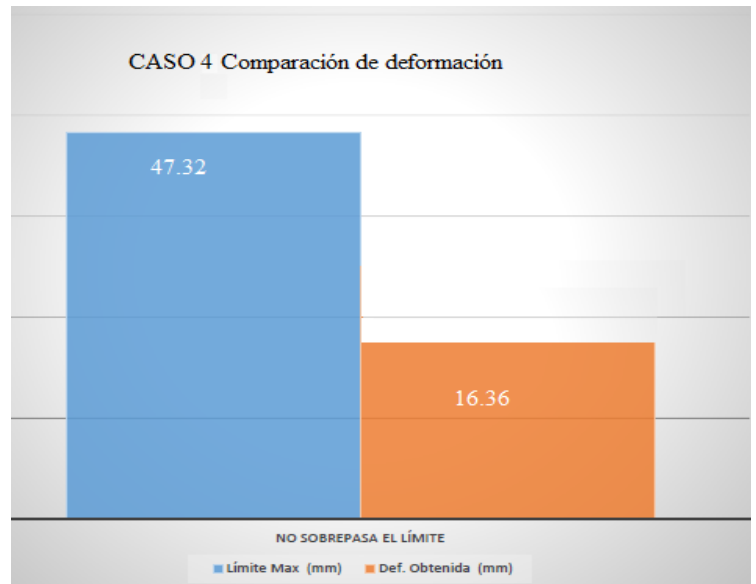
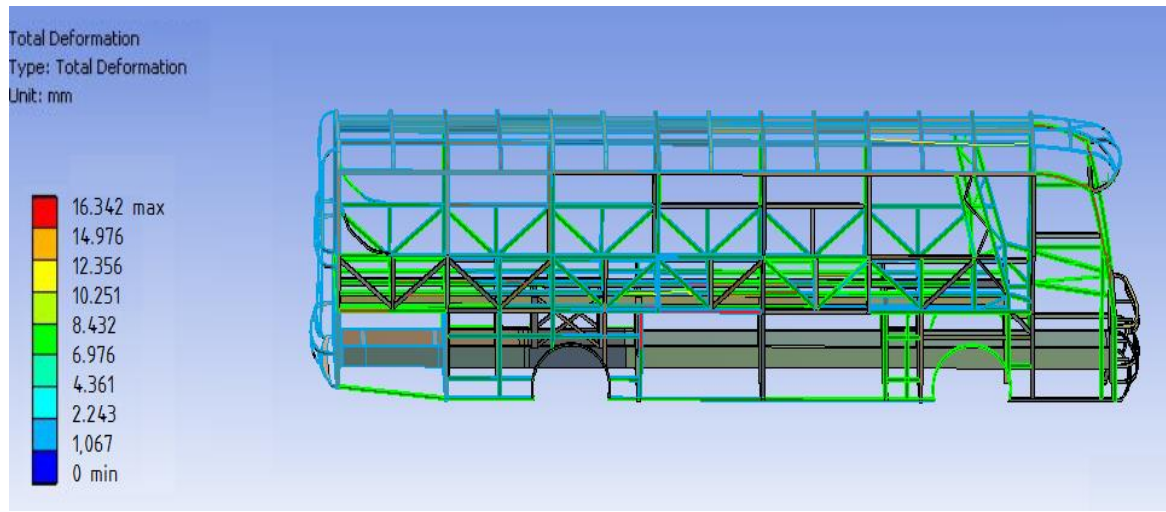
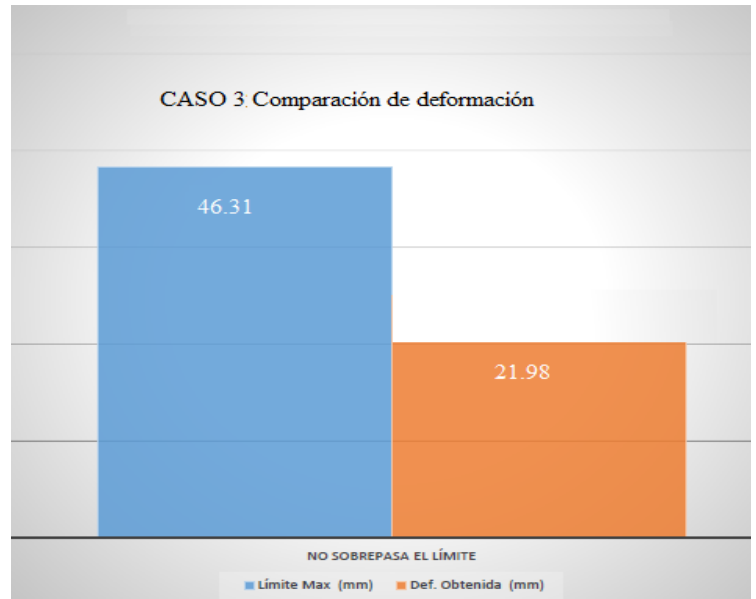
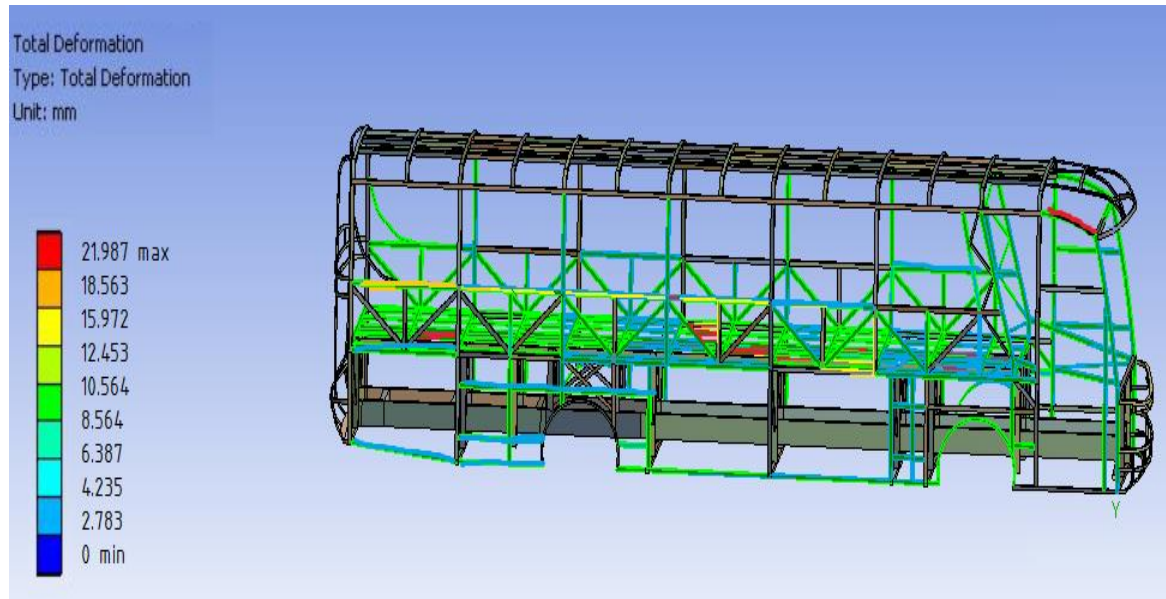
Matriz de rigidez

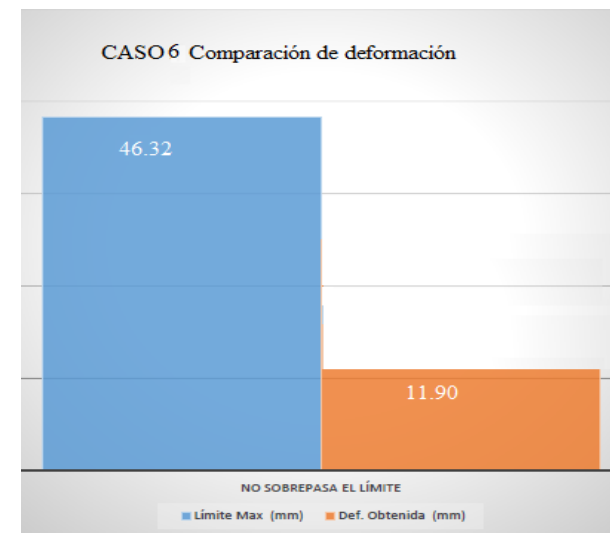
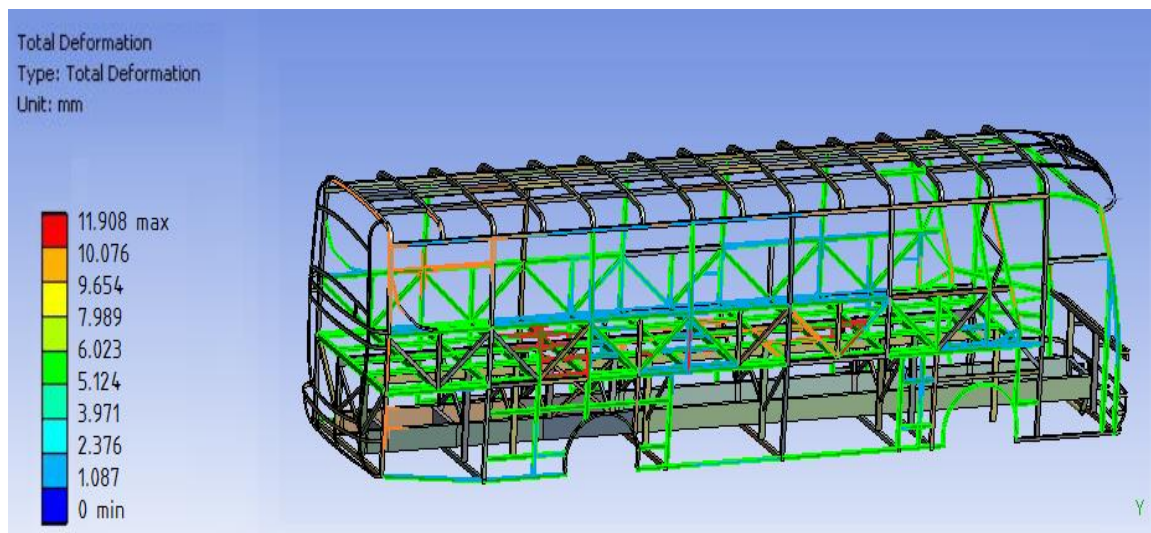
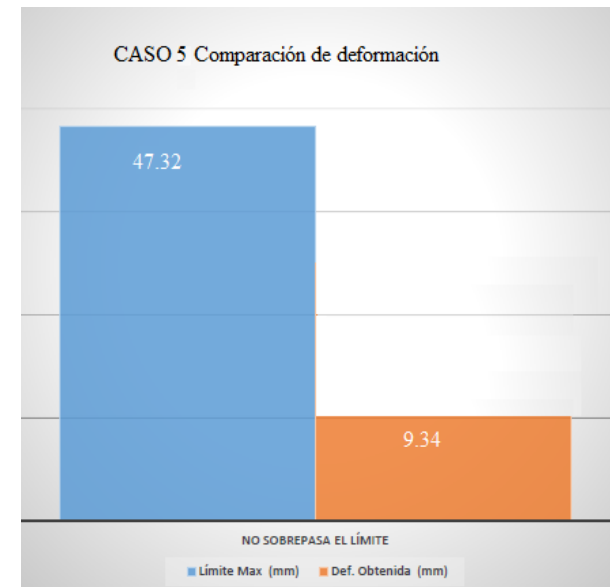
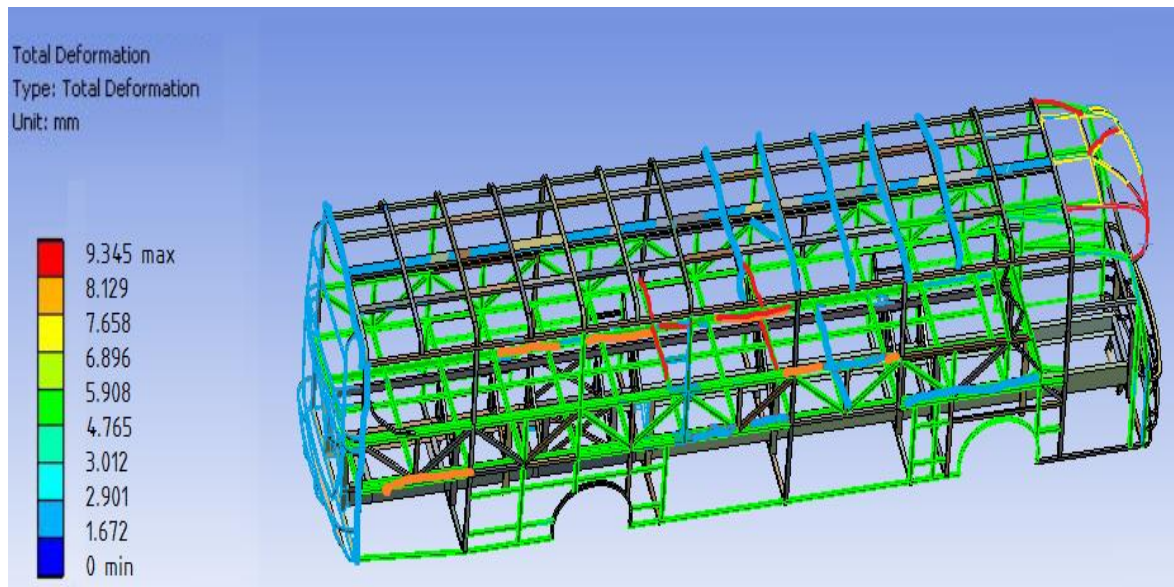
$$F = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix}$$

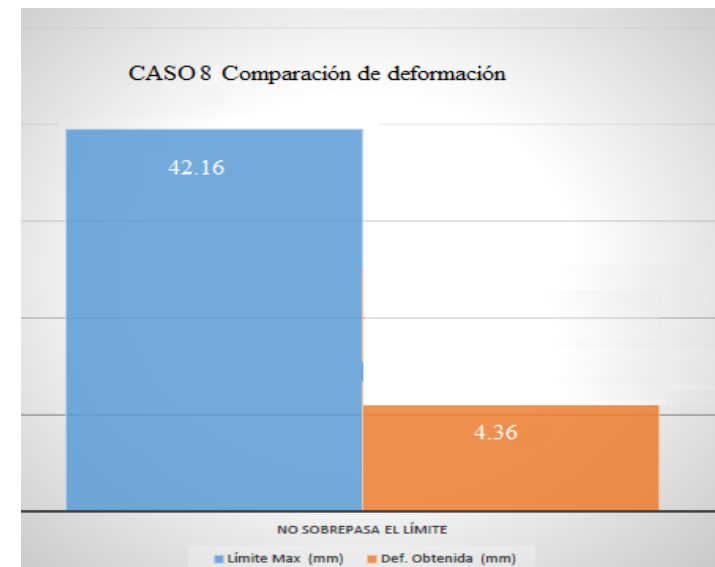
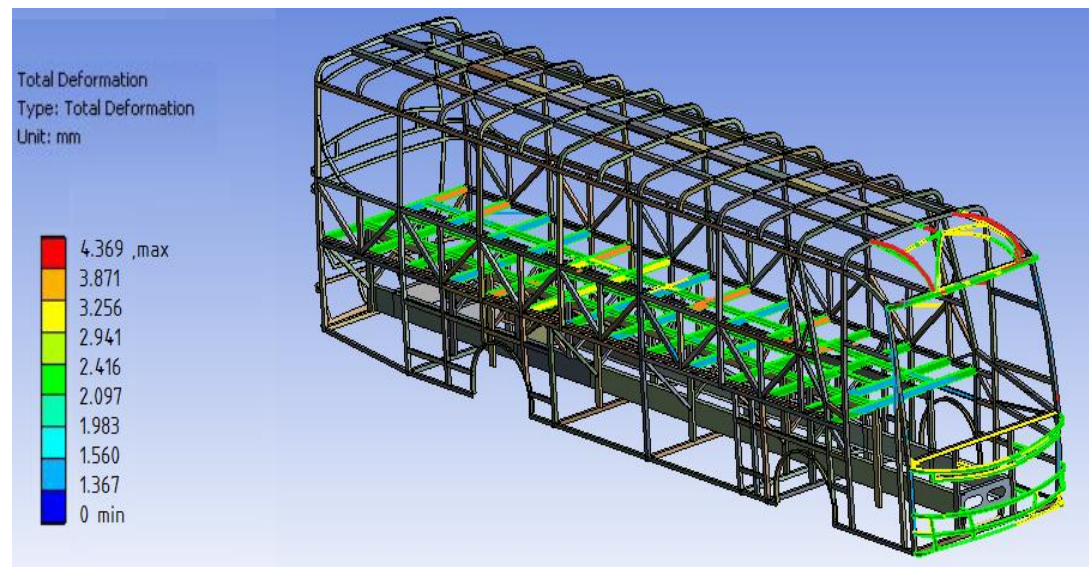
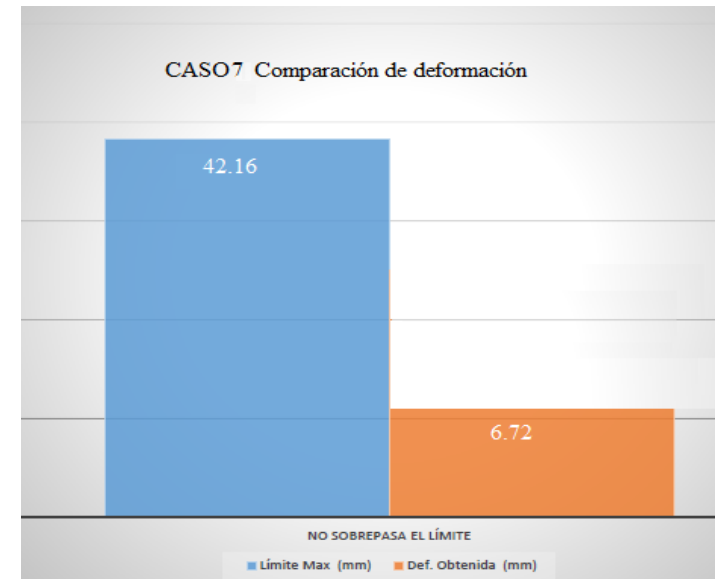
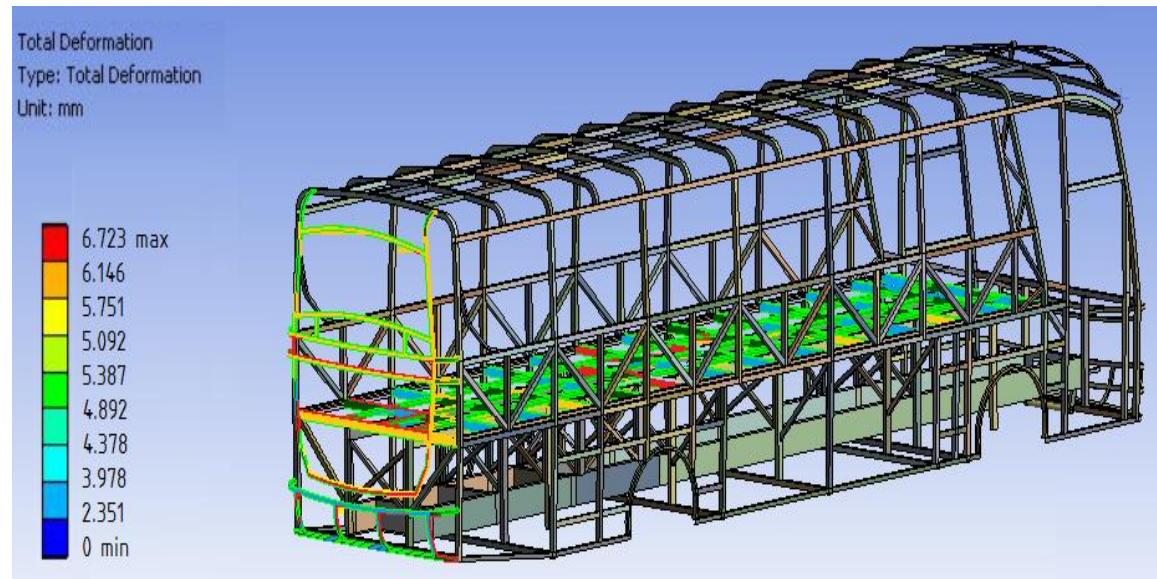
Resultados

Resultados de análisis de Método LRFD

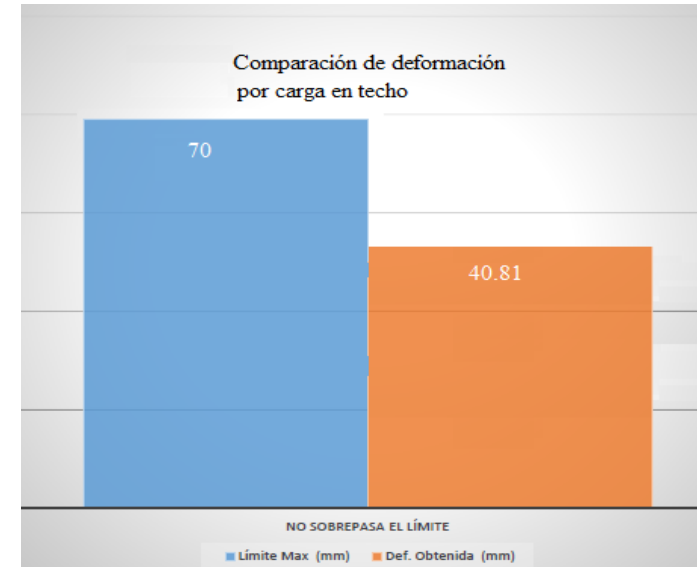
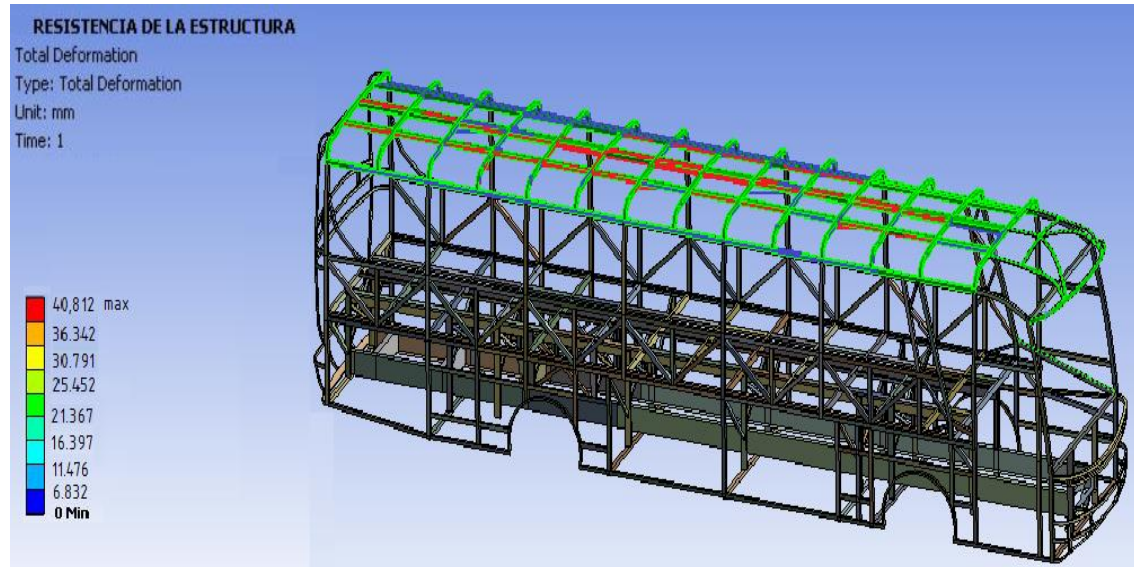






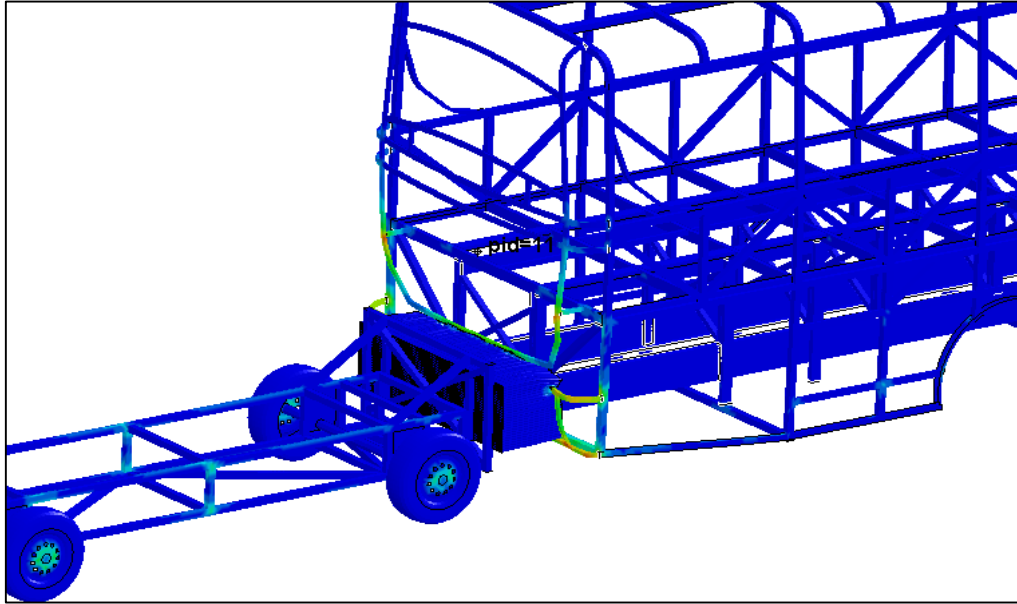


Resistencia de la estructura



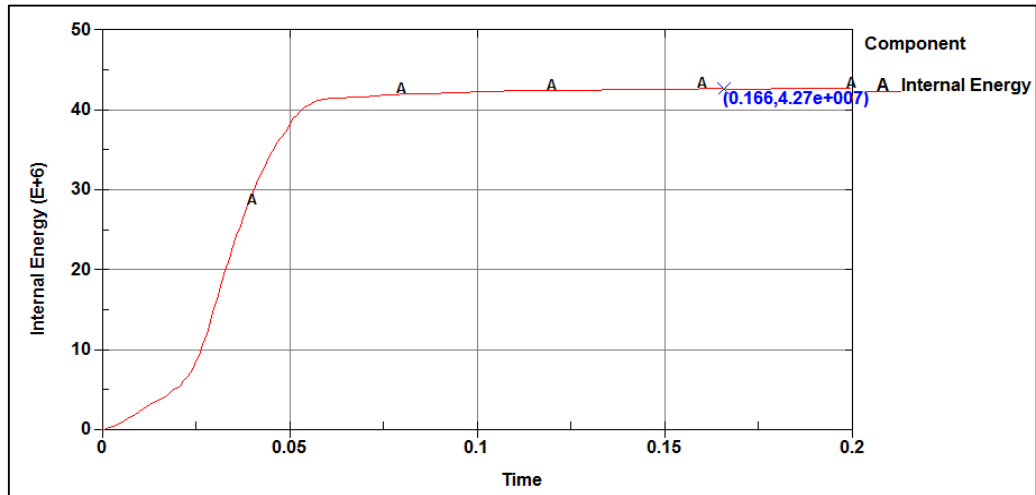
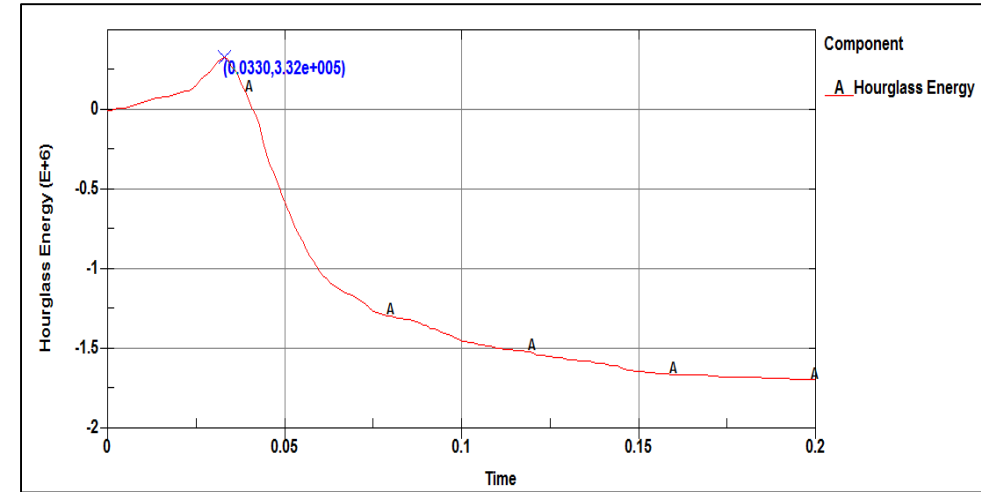
Las deformaciones presentadas en esta prueba no supera en ningún caso el umbral expedido por la norma NTE INEN 1323:2009 por lo cual se valida la estructura

ANÁLISIS DINÁMICO



Control de Hourglass

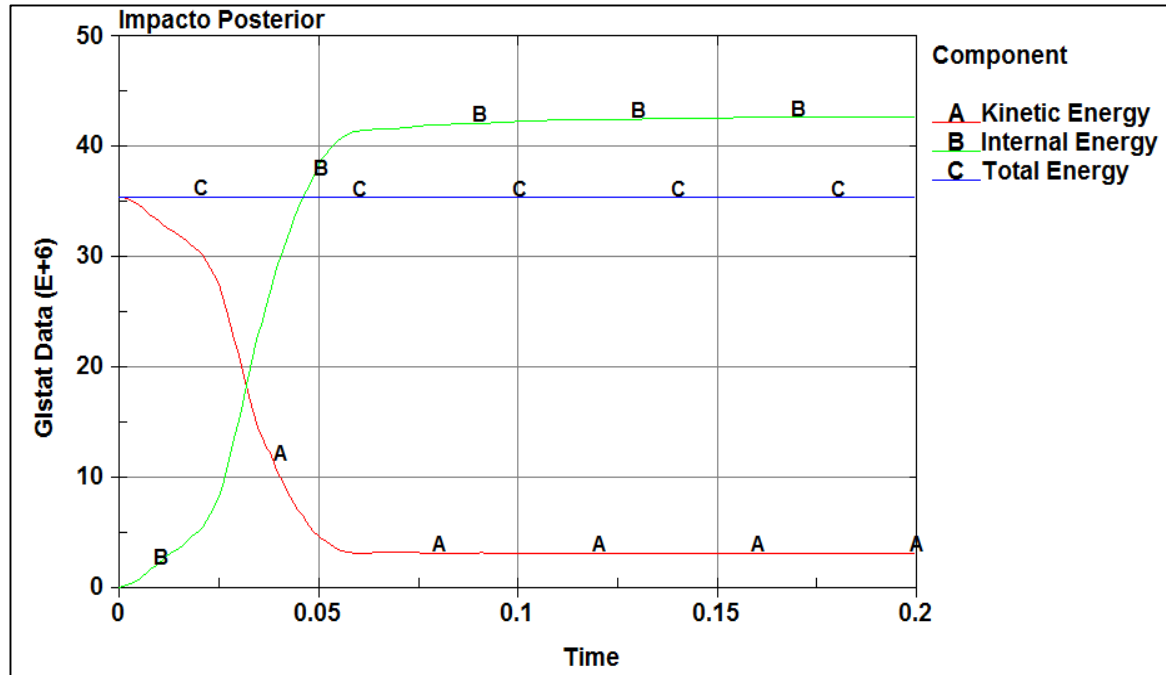
Formulación Flanagan Belytschko Stiffness.



$$H = \frac{\text{Hourglass}}{\text{Energia}_{int}}$$

$$H < 10\%$$

VALIDACIÓN EL ESTUDIO COMPUTACIONAL



Se toman en cuenta el balance de energías para evaluar la exactitud del análisis numérico. Ajinkya (2016) indica que en el balance de energías, uno de los parámetros para el análisis correcto es que la energía total permanezca constante.

DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTO

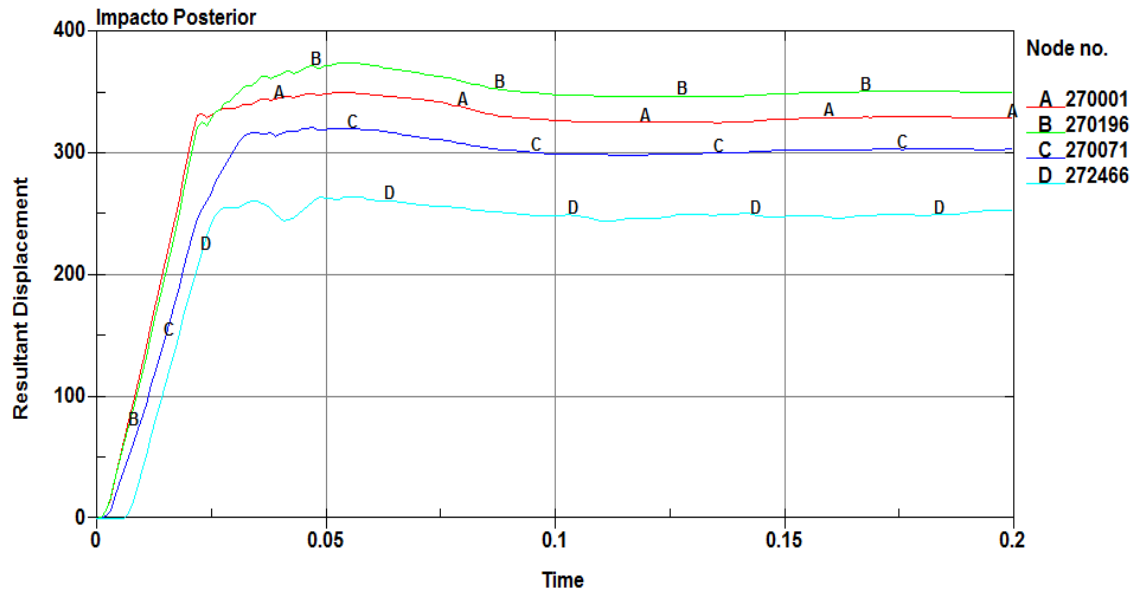


DIAGRAMA DEL ESFUERZO DE VON MISES

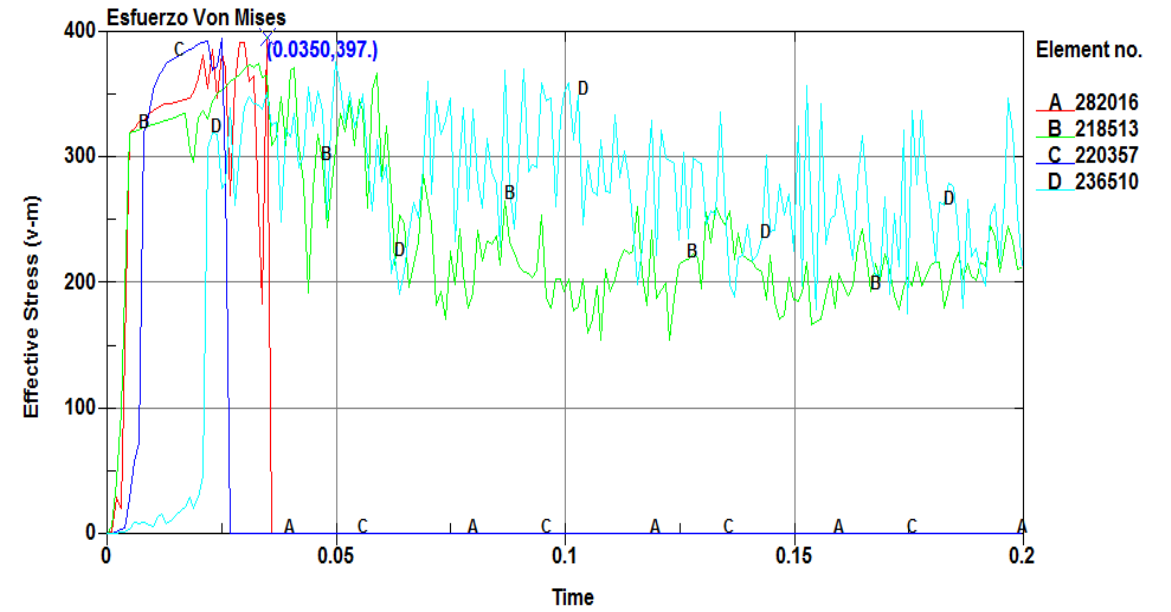


DIAGRAMA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EFECTIVA VS. TIEMPO

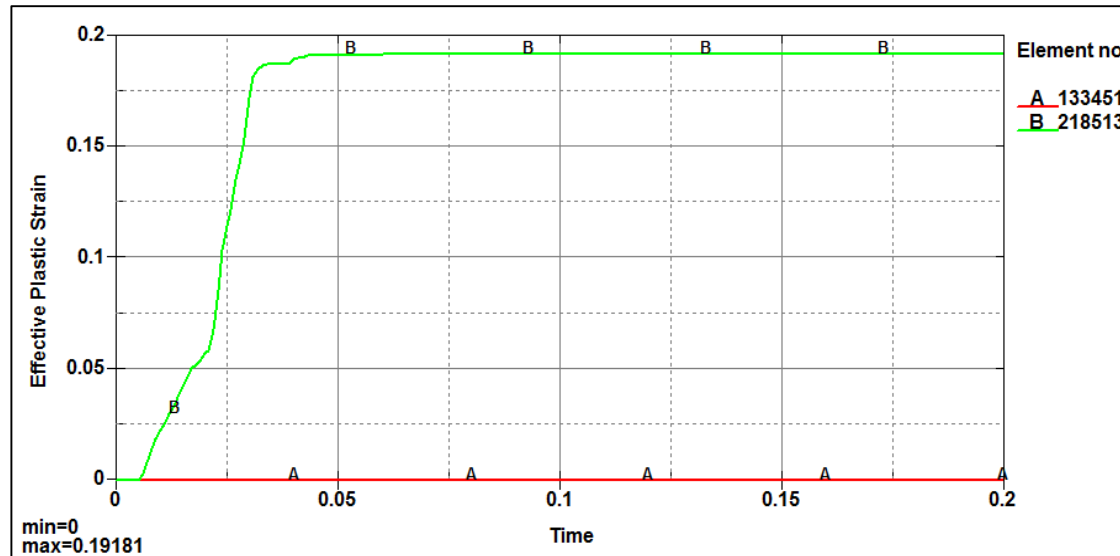


Diagrama deformación plástica efectiva el valor correspondiente al elemento de la zona de supervivencia se mantiene en un valor constante de 0 (cero), mientras que el elemento de la zona del impacto muestra un cambio, esto implica que el espacio de supervivencia no ha sido afectado por otros elementos estructurales

VALIDACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Comparativo de resultados obtenidos con diferentes métodos

| Conceptos de resistencia de | Software MEF directo | Elementos finitos método |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Materiales - Esfuerzo deformación | | |
| 1.68 mm | 1,703 mm | 1.693 mm |

CONCLUSIONES

La estructura del bus interprovincial ensayada cumple con los requisitos de diseño para satisfacer la norma NTE INEN 1323:2009, ya que los valores de los parámetros obtenidos de deformación no sobrepasaron los valores máximos de deformación que indica la norma.

El control de arena (Hourglass), se utiliza para evitar trabados de la malla y esto afectaría los resultados. La relación entre el Hourglass y la energía interna deben ser menores al 10%, siendo de este valor el estudio será validado

El balance de energía permitió verificar la precisión de los resultados de la simulación, ya que se verificó si la energía total permaneció constante durante el período de tiempo de la simulación

RECOMENDACIONES

Es importante definir el tamaño de malla adecuado, ya que de esto depende el gasto computacional que tendrá la simulación a realizar.

Identificar los elementos malos que se producen al realizar el mallado de la estructura ayudara a tener un malla de calidad, y esto evitará que la simulación se detenga.

Controlar que la malla se encuentre regulada por parámetros de calidad como el skewness, ratio jacobiano para un mejor análisis y obtener mejores resultados.