

**TERCER CONGRESO SOBRE MEDIOS DE TRANSPORTES
Y SUS TECNOLOGÍAS ASOCIADAS.**

**UTN Facultad Regional Haedo, octubre 2021, Haedo, Buenos
Aires, Argentina**

**Ensayo virtual de módulo estructural de autobús de doble piso según
reglamento Anexo III CNRT**

José A. Santelli, Gustavo J. Cazzola, Horacio M. Mirassou

*Grupo de investigación GITEVE. Centro de Investigación CIDIV, Facultad
Regional Gral. Pacheco, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina*

Autor principal: jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar

Palabras claves: autobús, ensayo, CNRT, elementos finitos

Resumen

Los módulos estructurales de los autobuses de doble piso están certificados para resistir determinadas cargas y no superar las deformaciones definidas (en el caso de Argentina) en el reglamento Anexo III de CNRT (Comisión Nacional de Regulación del Transporte - Aprobación de Módulos Estructurales). En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos mediante modelización, por elementos finitos, de un módulo típico de estructura de autobús de doble piso, mediante elementos de viga, analizando el colapso ante cargas sobre el techo y lateral. Luego estos resultados se comparan con los de un ensayo de laboratorio de un módulo de esa estructura, y se contrastan con estudios técnicos sobre las condiciones de seguridad de los autobuses. Como conclusión se refleja que, en el caso de módulos estructurales de autobuses de doble piso, la correlación entre el análisis de elementos finitos y el ensayo es prácticamente posible, abriendo la posibilidad de diseñar mediante análisis.

1. Introducción

En la Argentina, en la Jurisdicción Nacional, los ómnibus de Doble Piso representan más del 66 % del parque vehicular de pasajeros de servicio público [1]. De la citada referencia, también se extrae que la siniestralidad, definida como ocupantes fallecidos en este tipo de vehículos por cada cien millones de pasajeros-km, es más alta con respecto a otros países del mundo, pero (también citando la misma referencia), al contrastarse con la totalidad de la siniestralidad local, también por encima del resto del mundo, se concluye que estos vehículos tienen una siniestralidad similar al resto del sistema de transporte del país.

A continuación, se presenta un estudio estructural que, a pesar de tener la clara intención de colaboración para aumentar la seguridad en el transporte, el resultado estudiado (esto es, colapso estructural) no está citado como la principal causa de lesiones o accidentes en el citado informe de referencia. La siniestralidad depende de factores muy distintos a los resultados del presente trabajo.

A pesar de todo, la comprensión de cómo trabaja el módulo estructural, y cuán lejos está el colapso de los valores de certificación, son los objetivos de este trabajo, con el ánimo de contribuir a la seguridad y desarrollo tecnológico de este medio de transporte.

2. Módulo estructural de carrocería con 2 pisos

Los autobuses tienen dos estructuras básicas: El chasis, que es la base que da estabilidad, y sobre la que se montan la suspensión, el motor, los sistemas, etc. Y por otro lado la superestructura o carrocería:

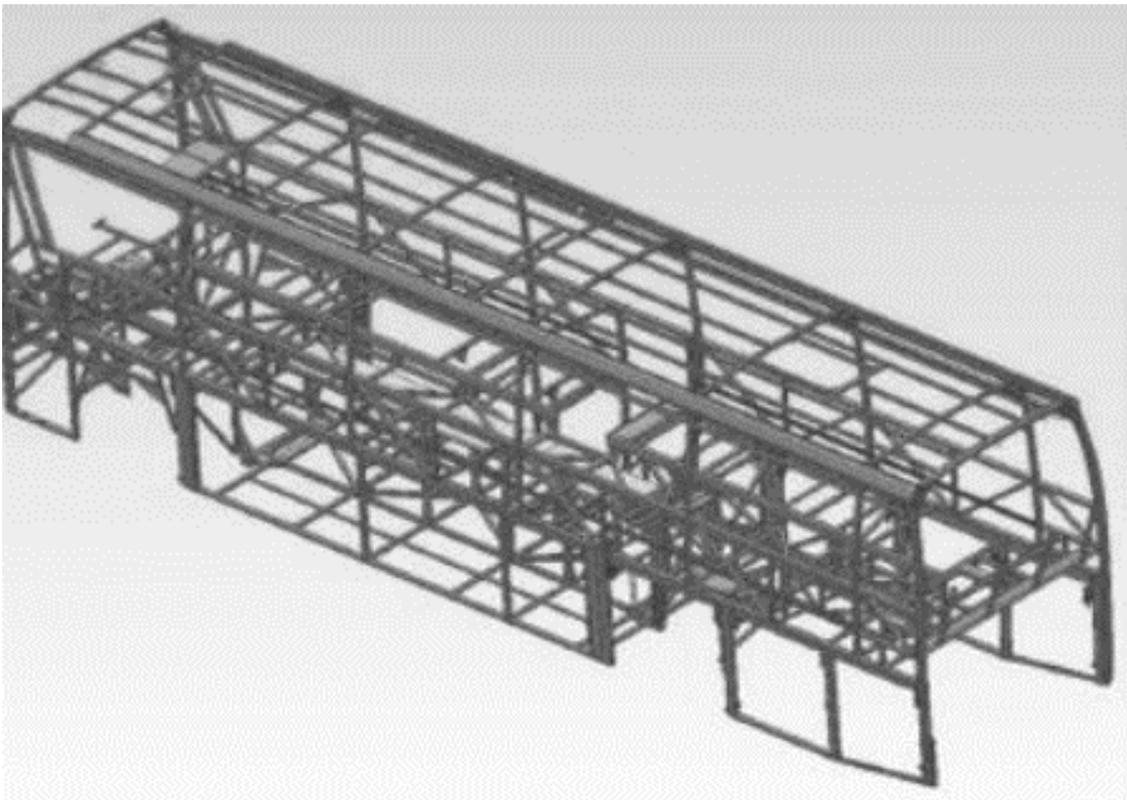


Ilustración 1. Ejemplo de una superestructura de autobús.

Esta superestructura mostrada en la Ilustración 1 tiene un método constructivo que consiste en el ensamblaje final de módulos estructurales:

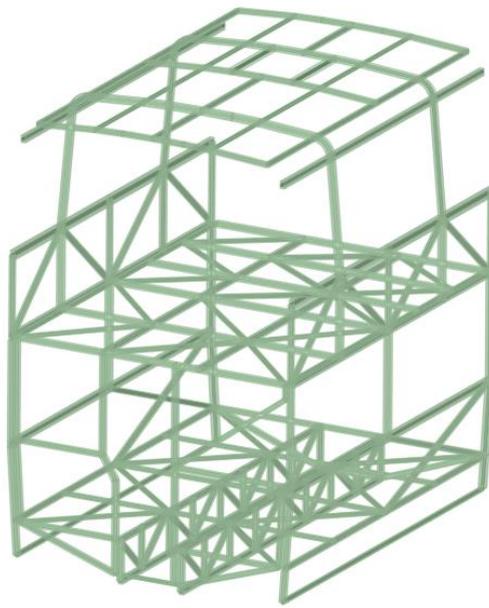


Ilustración 2. Ejemplo de módulo estructural de autobús de 2 pisos.

En la Ilustración 2 puede observarse un ejemplo de módulo estructural central de autobús de doble piso. El mismo se construye como un sistema soldado de vigas de diferente perfil, que consiste en laterales, los dos pisos centrales, y luego unos pórticos que sostienen el entramado del techo. Estos pórticos, principalmente, están sometidos a grandes esfuerzos en caso de accidente.

3. Modelo de elementos finitos

3.1. Malla de elementos finitos

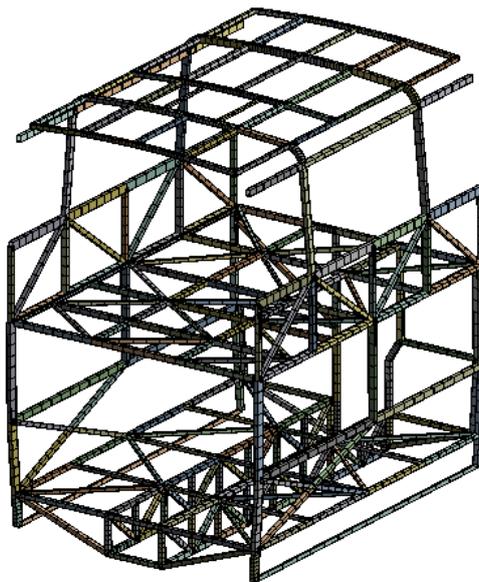


Ilustración 3. Malla de elementos finitos del módulo estructural de doble piso. Nótese que, para mejor visualización, los elementos están representados con sus perfiles en 3D, pero el cálculo es de elementos de viga (1D).

3.2. Tipos de elementos

La malla está desarrollada con los siguientes tipos de elementos:

El elemento tipo BEAM188 [2] de Ansys, es apto para analizar estructuras de vigas esbeltas a estructuras de canto moderadamente grande/grueso. El elemento está basado en la teoría de Vigas de Timoshenko, que incluye efectos de deformación por corte. El elemento ofrece la opción de activar el modelo de Timoshenko-Vlasov para vigas no-homogéneas (warping en inglés). Esta tecnología de elementos de viga es capaz también de representar vigas curvas geoméricamente no-lineales, en 3D, según la teoría de Vigas de Reissner J.

MPC184

Este tipo de elemento representa una clase general de elemento “multi point constraint”, esto es, compatibilización cinemática de desplazamientos entre los nodos relacionados. Se aplica como vínculos entre los extremos de las vigas, entre otros tipos de conexiones.

3.3. Modelo de Material

El material considerado es el ZAR 230 con la siguiente curva “bilinear isotropic hardening” (tensión de fluencia 300 MPa estimada 30% mayor a la mínima de la norma 230 MPa, según resultados de ensayos de materiales de casos semejantes):

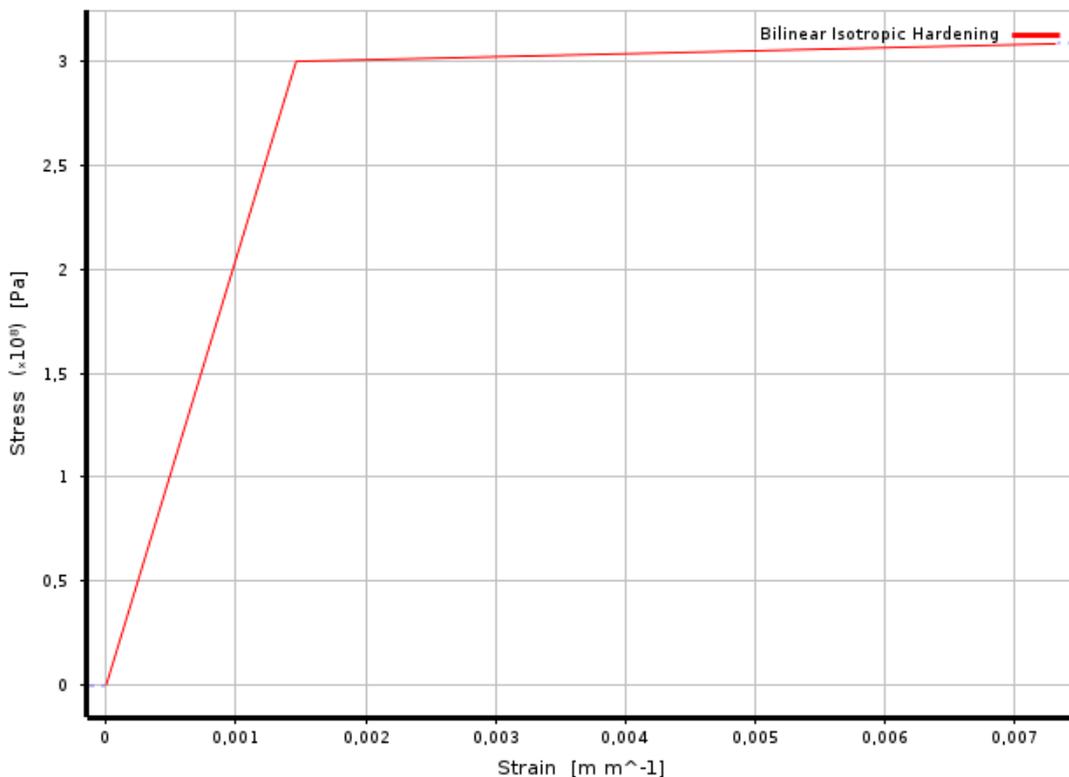


Ilustración 4. Curva tensión-deformación (elasto-plástica) para el material acero ZAR 230.

3.4. Configuración del análisis

Solver: Estático estructural

No-linealidad estructural (large deflection): Activada

Método de resolución: Full Newton-Raphson

No-linealidad por contacto: Desactivada

Con el modelo configurado de la manera descrita, se procedió a aplicar las cargas correspondientes a cada caso, y el apoyo en la parte inferior, como se desarrolla a continuación.

4. Ensayo de carga sobre el techo

4.1. Cargas y apoyos

A: Static Structural
Static Structural
Time: 1, s
30/06/2021 14:40

A Force: 40000 N
K Fixed Support

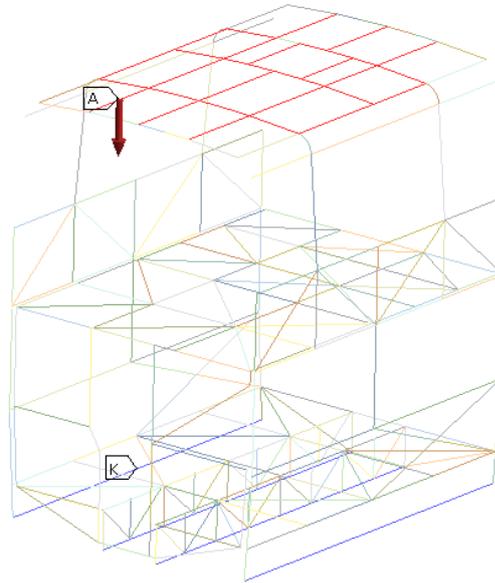


Ilustración 5. Carga sobre el techo (rojo) y apoyo inferior (azul) para el ensayo estático de carga sobre el techo.

En la Ilustración 5 se observa la carga máxima aplicada en el ensayo por elementos finitos (40000 N exceden la carga máxima calculada según el Reglamento).

4.2. Resultados

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 0,9125
30/06/2021 14:45

0,057879 Max
0,051448
0,045017
0,038586
0,032155
0,025724
0,019293
0,012862
0,006431
0 Min

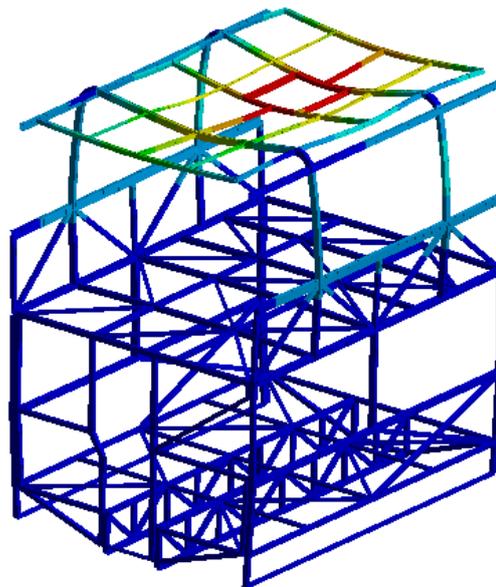


Ilustración 6. Desplazamientos totales. Carga sobre techo

En la Ilustración 6 se muestran los resultados de desplazamientos (amplificados 4,1 veces). Se observa la zona de máximo aplastamiento, en la zona donde está ubicado el marco de una compuerta de emergencia.

A: Static Structural
Maximum Combined Stress
Type: Maximum Combined Stress
Unit: Pa
Time: 0,7574
30/06/2021 14:46

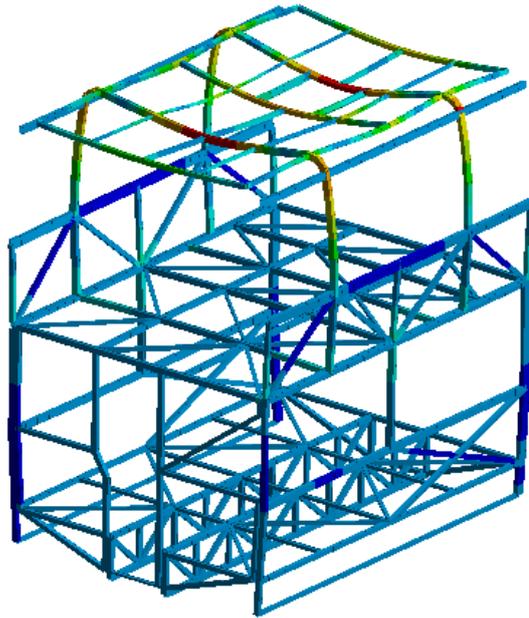
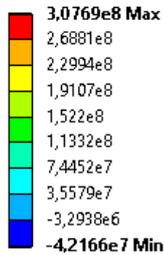


Ilustración 7. Tensiones máximas Combinadas (axil+flexión). Carga sobre techo

En la Ilustración 7 se observan las tensiones sobre las dos estructuras de pórtico en el piso superior del autobús, consideradas elementos críticos en el diseño.

5. Ensayo de carga lateral

5.1. Cargas y apoyos

B: Static Structural
Static Structural 2
Time: 1, s
30/06/2021 15:00

- A** Fixed Support
- B** Force: 10000 N
- C** Force 2: 10000 N

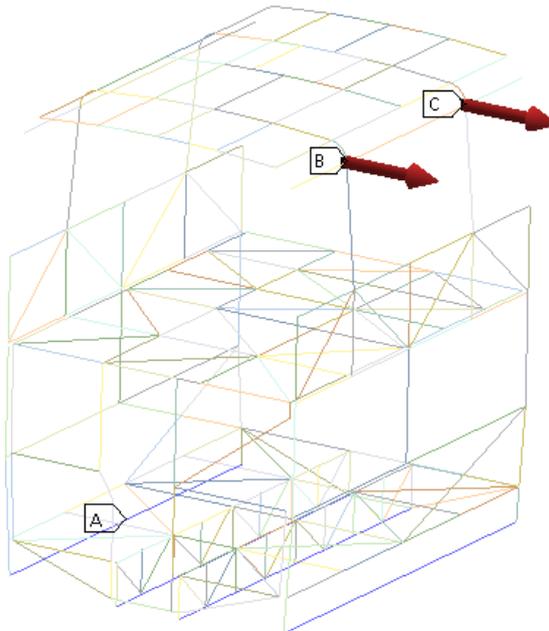


Ilustración 8. Carga lateral (rojo) y apoyo fijo (azul) para el ensayo correspondiente.

En la Ilustración 8 se observa que la carga aplicada lateralmente es de un total de 20000 N, superior a la carga calculada según el Reglamento.

5.2. Resultados

B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 0,8
30/06/2021 15:02

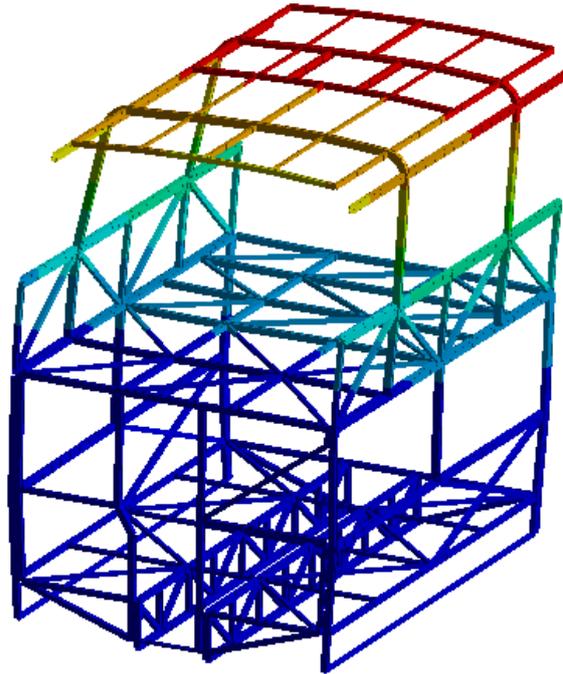
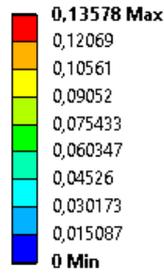


Ilustración 9. Desplazamientos totales. Carga lateral.

En la Ilustración 9 se observan los desplazamientos laterales de la estructura. Es notable el gran desplazamiento de los pórticos del piso superior.

B: Static Structural
Maximum Combined Stress
Type: Maximum Combined Stress
Unit: Pa
Time: 0,8
30/06/2021 15:11

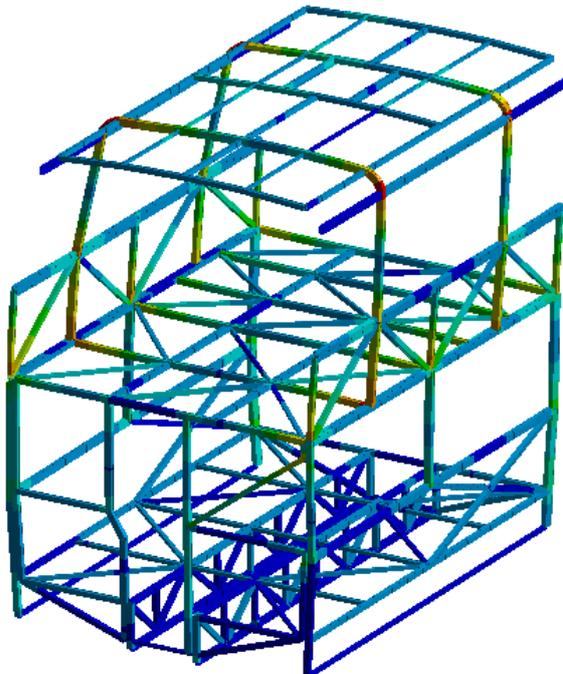
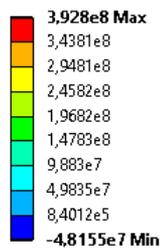


Ilustración 10. Tensiones máximas (axil+flexión) ante carga lateral.

La Ilustración 10 muestra las tensiones por carga lateral, notables en los pórticos.

6. Reglamento para la aprobación de módulos estructurales CNRT

6.1. Módulo estructural para ensayo

A los efectos de realizar el ensayo, deberá adoptarse como módulo experimental el tramo de la estructura correspondiente al mayor paso de ventanillas que la posea, con las respectivas prolongaciones hasta una distancia equivalente a la mitad del paso, a cada lado de los respectivos anillos de la estructura o pórticos, incluyendo todos los elementos laterales y techo desde el nivel del piso del vehículo hacia arriba.

El amarre de las teleras de piso con los parantes del lateral tratará de reproducirse fielmente pudiéndose colocar, además, un caño o ménsula por debajo de la telera de la misma sección. Si las diagonales del antepecho no tienen parante intermedio, en los medios pasos se colocará uno de la altura correspondiente al antepecho, para soldar a este la intersección de la diagonal.

6.2. Carga sobre techo

La estructura de la carrocería estará diseñada para soportar una carga estática sobre el techo, equivalente al 50% del peso máximo del chasis (P_{mach}), distribuida uniformemente a lo largo del mismo, durante un lapso de (5) minutos, sin experimentar deformaciones que superen los 70 mm en ningún punto.

La carga sobre el módulo se determinará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C = \frac{P_{mach} \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot P_{max}}{L_t}$$

Donde:

C: Carga a aplicar sobre el techo (kg)

P_{mach} : Peso máximo admitido por el chasis (kg)

P_{max} : Paso máximo entre ventanas (mm)

L_t : Longitud del vehículo (mm)

Dicha carga se aplicará directamente por medio de chapas de acero de espesor no superior a dos (2) mm en forma transversal al módulo, sobre los arcos de cada anillo de estructura, dividida en dos partes iguales. La longitud de las chapas será tal, que abarque el ancho total del techo. Se debe tomar como referencia el módulo descargado. Se cargan las chapas en forma alternada sobre cada uno de los parantes en tres etapas. Al final de cada etapa se deben tomar los valores de corrimiento vertical. Luego de la tercera etapa dejar estabilizar durante un periodo de 5 minutos y tomar el corrimiento máximo, luego descargar y tomar los valores remanentes.

6.3. Carga lateral

Los anillos de estructura o pórticos deben estar diseñados además para soportar como mínimo una carga estática horizontal igual al 15% del peso máximo admisible del chasis (P_{mach}), distribuida uniformemente sobre cada uno de ellos, aplicada a la altura del dintel longitudinal del lateral sin que el mismo sufra un corrimiento horizontal mayor a 140mm. Dicha carga deberá mantenerse aplicada por un lapso de tiempo no menor a cinco (5) minutos. El valor de la fuerza lateral sobre cada parante del mismo lateral se determinará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$T = \left(\frac{P_{mach} \cdot 0,15}{N_p} \right)$$

Donde:

T: Fuerza a aplicar sobre cada parante (kg)

P_{mach} : Peso máximo admitido por el chasis (kg)

NP: Número de pórticos.

Adóptese el mismo módulo anterior, la carga lateral (T) se aplicará sobre cada uno de los parantes del lateral por medio de una estructura accesoria en el centro del módulo y soldada sobre los caños o ménsulas de teleras. Con mecanismos neumáticos, hidráulicos o con pesos suspendidos, desde la estructura accesoria, se aplicará una fuerza de tracción horizontal sobre el dintel en la unión con cada uno de los dos (2) parantes de cualquier lateral.

Se debe tomar como referencia inicial el módulo inicial descargado. Se aplica presión a los cilindros o se cargan los pesos en forma simultánea sobre cada uno de los dos parantes en tres etapas. Al final de cada etapa se debe tomar los valores del corrimiento horizontal. Luego de la tercera etapa dejar estabilizar durante un periodo de 5 minutos y tomar el corrimiento máximo, luego descargar y tomar los valores remanentes.

7. Ensayo físico



Ilustración 11. Disposición del ensayo físico para carga superior.

En la Ilustración 11 se observa la fotografía de un ensayo físico de carga superior, el cual, a diferencia del análisis por elementos finitos, se realizó hasta la carga máxima estipulada por la fórmula citada en el Reglamento.



Ilustración 12. Montaje del ensayo de carga lateral

En la Ilustración 12 se ve el montaje de la estructura con un dispositivo de aplicación de carga lateral. La misma, a diferencia de la simulación por elementos finitos, es aplicada hasta llegar al valor especificado por el Reglamento.

8. Correlación entre ensayo físico y virtual

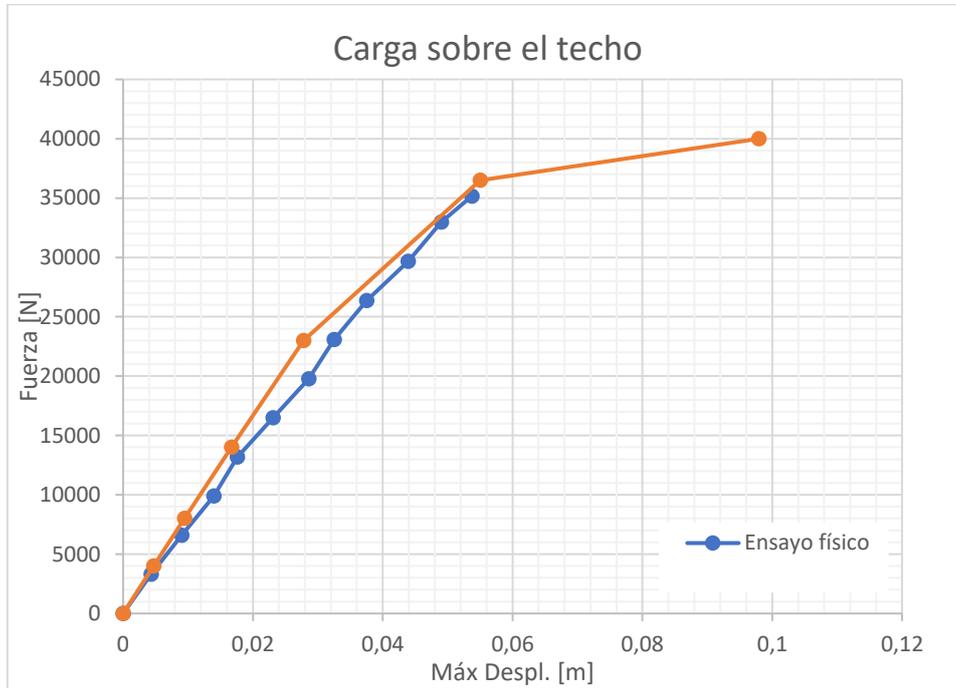


Ilustración 13. Correlación ensayo físico vs. Simulación en la carga sobre el techo.

En la Ilustración 13 puede apreciarse que la simulación reproduce con aceptable precisión los valores obtenidos en el ensayo físico. Luego de los valores máximos del ensayo físico (aprox. 35150 N), se produce una flexión elasto-plástica en la simulación, que produce un colapso de la estructura, reflejado en las imágenes anteriores.

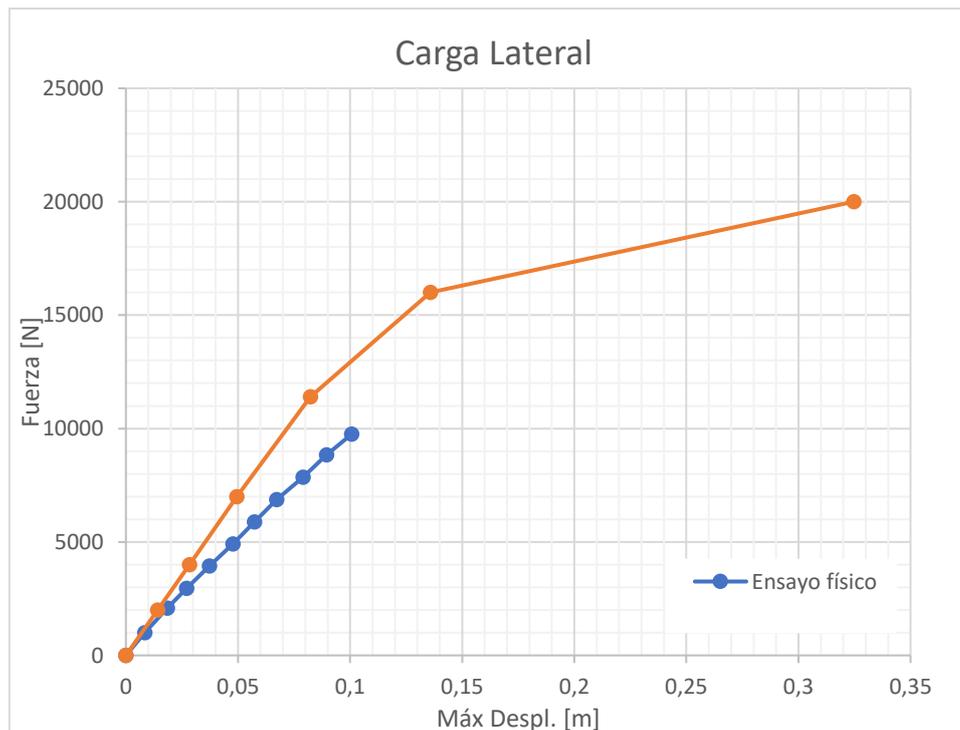


Ilustración 14. Correlación ensayo físico vs. Simulación en la carga lateral.

En la Ilustración 14 se puede apreciar una correlación aproximada a pesar de la diferencia de valores, posiblemente debido a que el desplazamiento fue tomado en diferentes puntos de la estructura. Sin embargo, se aprecia nuevamente la flexión elasto-plástica de la estructura y el suave colapso, debido a la carga lateral.

9. Conclusiones

Este trabajo concluye con el modelado de los respectivos ensayos estáticos de un ejemplo de módulo estructural de autobús de doble piso, aportando la continuación del modelado más allá de las cargas Reglamentarias, mostrando el mecanismo de colapso de la estructura, tanto ante carga sobre el techo, como ante carga lateral.

Se observa en las curvas de correlación, que los valores con los cuales la estructura colapsa están aproximadamente un 20% después de los valores fijados en el Reglamento. Por otro lado, se observa un colapso suave, progresivo, que inclusive permite al Software de elementos finitos converger hasta el final de la carga.

Por último, se reitera que, en la mayoría de los accidentes producidos en autobuses de doble piso, se ha registrado la mayor cantidad de muertes/heridos debido a la falta de uso de cinturón de seguridad, falta de concientización de los pasajeros, problemas en las carreteras, imprudencia en la conducción, etc. y un escaso porcentaje debido al colapso estructural.

Referencias:

[1] Fuente: "Vehículos de transporte automotor de pasajeros de doble piso. Estudio técnico: evaluación de las condiciones de seguridad". *Centro Tecnológico de Transporte, Tránsito y Seguridad Vial, UTN-FRA, 2007*. <http://c3t.fra.utn.edu.ar/?p=340>

[2] Adnan Ibrahimbegovic. "On Finite Element Implementation of Geometrically Nonlinear Reissner's Beam Theory: Three-dimensional Curved Beam Elements". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 122. 11-26. 1995.