

## DISEÑO RESISTENTE FRENTE A CHOQUE POR VUELCO DE UN VEHÍCULO URBANO ELÉCTRICO

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

Facultad Regional General Pacheco, Universidad Tecnológica Nacional  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Hipólito Irigoyen 288, General Pacheco (B1617FRP), Buenos Aires, Argentina  
Correo-e: gcazzola@docentes.frgp.utn.edu.ar

### RESUMEN

El cuidado por el medio ambiente y la escasez de recursos fósiles están haciendo cada vez más populares a los vehículos eléctricos como alternativa para disminuir la contaminación ambiental y el consumo de combustibles. La utilización de motores eléctricos y baterías en este tipo de vehículos exige que su estructura esté diseñada para absorber una elevada energía que se traducirá en deformaciones de la estructura y otros elementos si se produce un vuelco. Tal deformación debe estar limitada en la parte correspondiente al compartimiento de los pasajeros, para que estos no sean “aplastados” dentro del mismo, preservando un espacio de supervivencia que no resulte invadido por elementos rígidos de la propia estructura u otros. A tales efectos, se han emitido numerosas normas y reglamentos que establecen requisitos para las estructuras de protección contra vuelco de vehículos.

En este trabajo se presenta el diseño de una estructura protectora para los pasajeros de un vehículo eléctrico urbano ante solicitaciones por vuelco frente a los requisitos de la norma FMVSS 216 Roof Crush Resistance. El diseño de la estructura protectora se ha realizado mediante un modelo de elementos finitos con el código Ansys en el que se han contemplado diferentes tipos de elementos y modelos constitutivos de materiales, con la finalidad de optimizar el modelo de elementos finitos. Los resultados obtenidos demuestran que el diseño de la estructura optimizada cumple satisfactoriamente los requisitos normativos.

**Palabras Clave:** Vehículo eléctrico, Vuelco, Elementos finitos.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Reflexión sobre la siniestralidad de los vehículos automotores en Argentina

Este trabajo comienza con algunos datos y una reflexión sobre la siniestralidad en las carreteras de Argentina, que está entre las más elevadas del mundo.

En el año 2019 se registraron un total de 6.627 muertes por siniestralidad vial (Promedio diario: 19 - Promedio mensual: 552), de las cuales el 29% son Conductores u ocupantes de un automóvil. Entre las principales causas de muerte están la: Agresividad al volante, Alcohol y conducción, y Autovaloración de los conductores. [1]

Si definimos a la Seguridad Activa del vehículo automotor, como todas las medidas que se toman para evitar accidentes (por ejemplo, ABS, control de estabilidad, etc.) y, por otro lado, definimos a la Seguridad Pasiva como las medidas tendientes a mitigar los daños a los ocupantes, una vez producido el accidente (cinturón de seguridad, airbags, cristales, carrocería, etc.) entonces, el análisis efectuado en este trabajo encuadra dentro de un test de la categoría Seguridad Pasiva.

Sin embargo, el análisis de los datos de siniestralidad muestra que, debido a la naturaleza de los accidentes viales, las estadísticas no mejorarían desde la seguridad activa, ni desde la seguridad pasiva. No se puede lograr ningún diseño de carrocería que proteja ocupantes contra, por ejemplo, la Agresividad al volante. Se producen muertes diariamente dentro de los vehículos, independientemente de si la carrocería conservase o no su integridad. Un ejemplo de ello es el trabajo acerca de siniestros en banquetas [2], en donde prácticamente la única causa de dichos siniestros es la agresividad al volante.

A pesar de la contundencia de los datos, este estudio se realiza con el ánimo de poder contribuir a mitigar, aunque sea en un porcentaje mínimo, la mortalidad en las carreteras, y contribuir mínimamente a la seguridad vial en general.

### 1.2 Desarrollo del trabajo

Este trabajo estudiará el colapso ante un vuelco de un diseño de vehículo eléctrico de carrocería tubular, de manera que la metodología pueda aprovecharse por los fabricantes. Para ello, primero se define la categoría de la estructura y a continuación la normativa aplicable, luego se pasa a describir el ensayo de aplastamiento de techo por el método de los elementos finitos (MEF), correlaciones previas, desarrollo del modelo etc. Por último, se presentan los resultados.

## 2. DISEÑO DE CARROCERÍA TUBULAR

Entre los vehículos eléctricos actualmente en desarrollo/producción en Argentina, se encuentran algunos diseños de carrocería tubular. Tal como lo demuestran los años de eventos de automovilismo deportivo, una estructura de carrocería de base tubular ofrece una mayor integridad estructural que una carrocería solamente de chapa, conservando (o más bien, reforzando), la misma ante una mayor carga dinámica. Por otra parte, el diseño de carrocería de

automóvil eléctrico, pensado para baja velocidad, responde algunas veces a este tipo tubular, debido a criterios como: como costo, modularidad, fabricación, etc.

### 2.1 Automóvil eléctrico urbano

Existe en Europa una categoría de automóvil denominado “microcoche”, o “coche sin carnet”, que pertenecen a la categoría de cuatriciclos ligeros. Su velocidad no es mayor de 45 km/h y su cilindrada no supera los 700 cc. En el caso de los eléctricos, la potencia máxima neta no supera los 4 kW (o 13 kW en el caso de los microcoches con carnet, ej. Renault Twizy)

Sin embargo, en Argentina, todos los vehículos deben estar patentados. Por lo tanto, existen varias empresas que, partiendo de esta base de microcoches, están desarrollando sus propios vehículos 100% eléctricos patentables, con velocidades de hasta 110 km/h en algunos casos, con opción de 2 y 4 ocupantes.

### 2.2 Tabby Evo

Se partirá de un diseño de Acceso Libre. El Tabby Evo (<https://www.openmotors.co/tabbyevo/>) es una plataforma de Vehículo Eléctrico abierta, o sea, una base mecánica Acceso Abierto con Licencia Hardware Libre (OH), a partir de la cual se puede desarrollar un vehículo eléctrico, por ejemplo, con dos o cuatro ocupantes. Este tipo de Licencia, que permite trabajar libremente con un diseño mecánico de carrocería, está definido en Referencia [3]

### 2.3 ¿Qué es una Plataforma de Automotor?

Una plataforma automotor es su arquitectura central, que comprende diseño compartido, ingeniería, y sistemas y componentes que comprenden el corazón mecánico de cualquier automóvil y que produce movimiento. Es el componente más caro y difícil de desarrollar, muchas veces tomando años de I+D y un alto costo en millones de USD. También es el componente más compartido del automóvil, y el período de fabricación puede ser tan largo como 50 años. Algunos datos rápidos: la plataforma Volkswagen Group A es compartida entre el Audi A3, Seat Leon, y el VW Jetta. Similarmente, el Tesla Model S y Model X también comparten la misma plataforma.

A continuación, puede verse la base tubular de la plataforma del Tabby Evo:

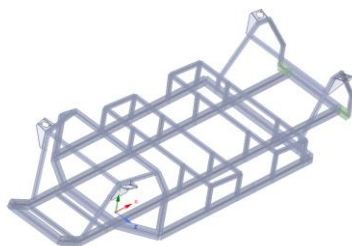


Figura 1. Plataforma abierta Tabby Evo 2-asientos (OH es la abreviatura de Open Hardware).

Tomando esta plataforma, el grupo GITEVE de UTN-FRGP realizó un desarrollo preliminar de una carrocería tubular de vehículo Eléctrico de 4 ocupantes, que se muestra a continuación:

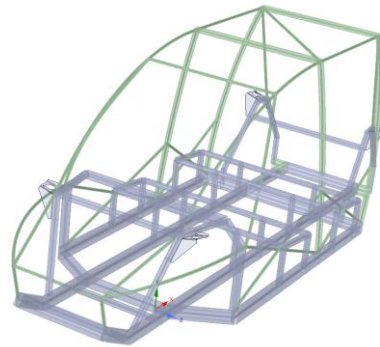


Figura 2. Estructura de Tabby Evo con chasis y carrocería tubular. Puede apreciarse el desarrollo del techo, frontal y lateral.

En las imágenes anteriores se puede ver del concepto preliminar de vehículo urbano eléctrico para 4 ocupantes, pensado para desplazamientos urbanos no mayores a 90 Km/h. Es parte de más diseños de un Proyecto que permita incorporar una tecnología de diferencial electrónico que distribuya la potencia del motor eléctrico en las ruedas tractoras de forma inteligente.

### 3. NORMATIVA DE ENSAYO DE LA RESISTENCIA DEL TECHO

Uno de los requerimientos de integridad estructural un chasis/carrocería tubular, como el mostrado en las imágenes anteriores, es certificar una resistencia mínima al aplastamiento para su estructura de techo.

En la norma Referencia [4] “Laboratory Test Procedure for FMVSS 216 Roof Crush Resistance” TP-216-05, de USA (2006), se define un Procedimiento de Ensayo para verificar la resistencia al aplastamiento del techo del compartimiento de pasajeros de automóviles, vehículos de pasajeros de usos múltiples, camiones y autobuses con un GVWR de 2722 kg. o menos.

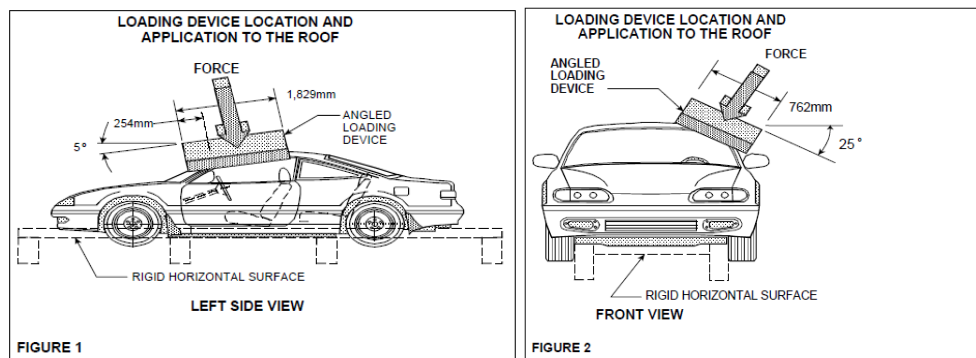


Figura 3. Ensayo de vehículo prototipo según norma TP-216-05.

#### 4. ENSAYO DE RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO MEDIANTE MEF

Debido a que el grupo GITEVE cuenta con recursos de Software de elementos finitos, se evalúa constantemente qué tan lejos está el estado del arte de una Certificación mediante Análisis, y consecuentemente, se trabaja en el sentido de acortar la brecha entre el análisis de elementos finitos y el ensayo real (Referencia [4]).

En este contexto, se procedió a realizar el ensayo -Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) 216 “Roof Crush Resistance”- mediante modelos numéricos, intentando reproducir, en la medida de lo posible, las condiciones de Prototipo y ensayo real, que generalmente son muy difíciles de disponer por cuestiones de presupuesto en los grupos de investigación. Por esta razón, existe una tendencia a experimentar con modelos de elementos finitos, que intenten reproducir condiciones de ensayos reales.

##### 4.1 Modelo de material

Para todos los modelos MEF subsiguientes, se utilizarán las mismas propiedades de materiales, de manera de poder efectuar las correspondientes comparaciones. Las mismas corresponden al acero SAE 4130, y el modelo que se adopta es el “endurecimiento isotrópico bilineal”:

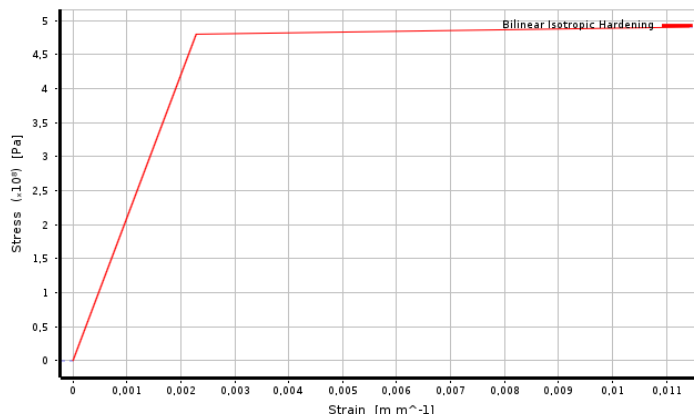


Figura 4. Propiedades elasto-plásticas del acero SAE 4130. Modelo Bilineal.

##### 4.2 Correlación entre elementos finitos tipo “shell” (cáscara) y “beam” (viga)

Si bien existe mucha investigación respecto a modelado de grandes deformaciones, colapso, etc., ésta es mayormente utilizando elementos del tipo sólido o cáscara. Debido a que la estructura tubular se modelará principalmente con elementos de viga, el trabajo inicial consiste en ver en qué medida dicho elemento de viga puede modelar el fenómeno físico de interés.

En la teoría de vigas de ingeniería estructural, el término "rótula plástica" se utiliza para describir la deformación de una sección de viga donde ocurre una flexión plástica. En ingeniería sísmica, rótula plástica también se refiere a un dispositivo de amortiguamiento que permite rotación plástica en una conexión de columna que sería rígida de otra forma.

En la bibliografía de Feodosiev [Referencia 5], existe una sección para estructuras que trabajan sobre el límite de elasticidad, dentro de la cual hay un apartado de flexión elasto-plástica para barras de sección maciza

A continuación, se obtendrá la curva de flexión elato-plástica de Feodosiev, para un modelo MEF de caño de acero (inicialmente curvado), del tipo que muestra en la siguiente figura:

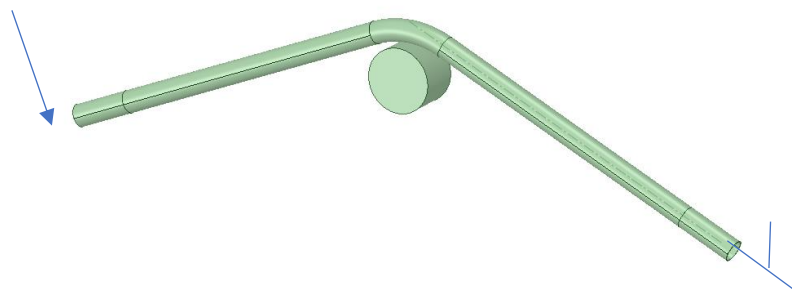


Figura 5. Modelo de caño curvo para modelar con distintas tipologías (elementos de cáscara, viga, etc.).

#### 4.3 Resultados con elementos tipo cáscara o 'shell'

Considerando una formulación de grandes deformaciones y curva elasto-plástica bilineal, el modelo de cáscara se comporta inicialmente siguiendo la curva de Feodosiev, para luego (al no converger), mostrar signos de "beam crippling" o colapso de vigas, como se muestra en las figuras a continuación:

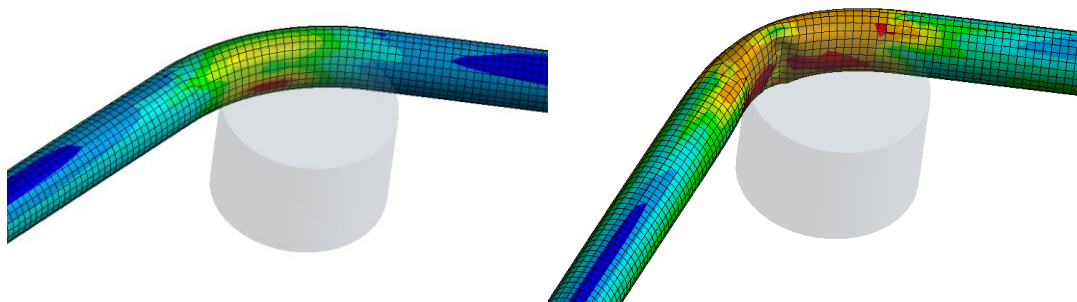


Figura 6. Tensiones en Ensayo con elementos tipo cáscara. Izq.: 47,5% de la carga. Der.: 100% de la carga (no convergido).

En la figura anterior (izq.) se observa el comportamiento de flexión elasto-plástica del caño, mientras que, en la figura de la derecha, el exceso de deformaciones provoca un aplastamiento o colapso conocido como “beam crippling”, el cual es un fenómeno de inestabilidad local cuyo análisis queda fuera del alcance de este trabajo.

#### 4.4 Resultados con elementos tipo viga o “beam”. Referencia [6].

A continuación, se mostrarán resultados del mismo ensayo, pero realizado con elementos tipo viga de Ansys.

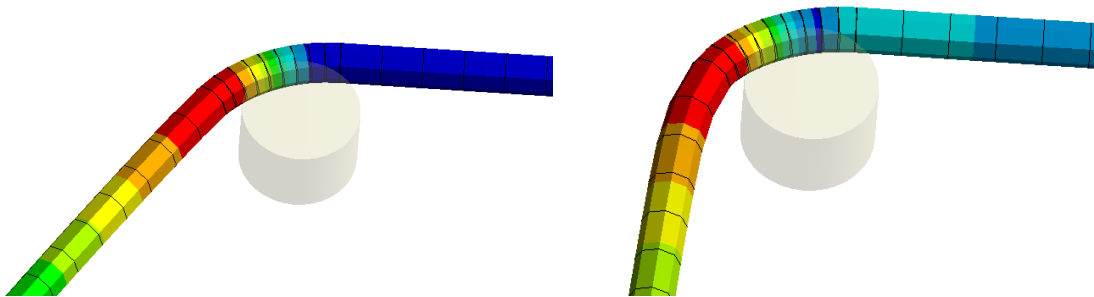


Figura 7. Tensiones en Ensayo con elementos tipo “beam”. Izq.: 52,5% de la carga. Der.: 100% de la carga.

Como se puede observar en la figura, el modelo de vigas no es capaz de representar el comportamiento de colapso de vigas conocido como “crippling”, por lo tanto, converge hasta el final.

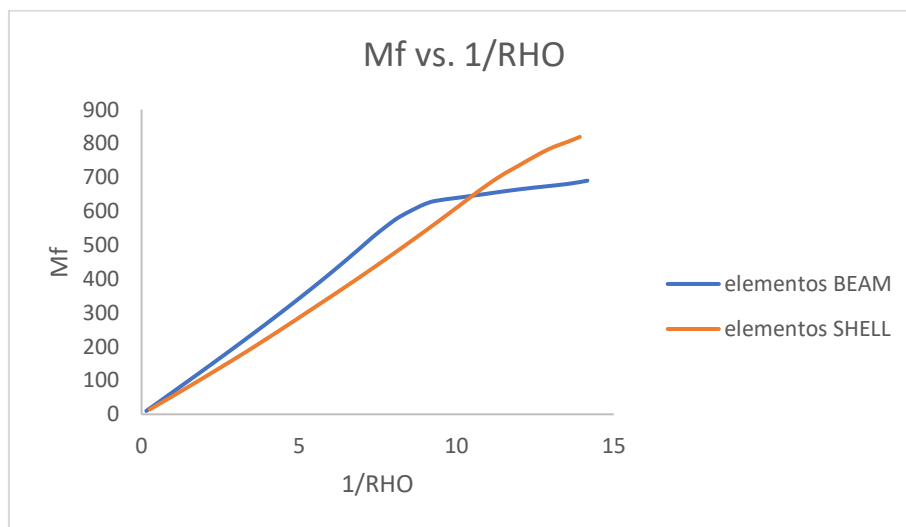


Figura 8. Comparativa de resultados modelo de cáscara vs. Modelo de vigas.

En la comparativa de la figura anterior se puede apreciar que, en un modelo de vigas, la flexión elasto-plástica se puede dividir en tres zonas: elástica, de transición, y plástica, mientras que, en el modelo de cáscaras, sólo se aprecia la zona elástica y de transición, hasta que se produce



una brusca inestabilidad (comienzo del “cripling”), y la correspondiente no-convergencia del modelo MEF.

#### 4.5 Modelo de ensayo de aplastamiento sobre estructura tubular

A continuación, se describe el modelo dinámico desarrollado principalmente con elementos tipo BEAM188.

#### 4.6 Modelo MEF Dinámico

Se desarrolló un modelo de elementos finitos a partir de la geometría CAD del chasis base + diseño preliminar, que se describirá a continuación.

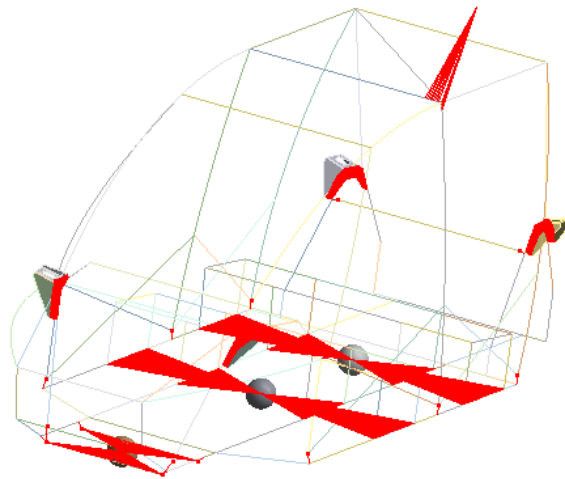


Figura 9. Modelo de elementos finitos dinámico para estructura tubular.

En la figura anterior, se aprecian los elementos utilizados para la adecuada representación de la estructura tubular: Las líneas representan elementos de viga, las esferas representan masas concentradas correspondientes al motor y a las baterías, las superficies son elementos tipo cáscara o “shell” para la unión de la suspensión, y las líneas rojas representan “constraint equations”, o sea vinculaciones entre grados de libertad de nodos, que representan apoyos de motor y batería, soldaduras entre distintos tipos de elementos, y también distribución de una fuerza en una determinada área de interés.

#### 4.7 Tipos de elementos finitos en el modelo

El principal tipo de elemento finito con el que se generó el modelo, y por lo tanto el tipo de elemento finito donde se produce el colapso de la carrocería, es el BEAM188 de Ansys (ya descrito en el párrafo 4.3). A continuación, se hará una descripción resumida de demás tipos que componen el modelo construido:



### 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 (las líneas rojas de la Figura 12), entre los extremos de las vigas, o entre los nodos de las vigas y de las “shell” (esto es, las placas de apoyo de suspensión).

### RBE3

Distribuye la fuerza/momento aplicada a un nodo maestro, en un grupo de nodos esclavos, teniendo en cuenta la geometría de los nodos esclavo como factores de ponderación. En este caso, se utiliza para aplicar la carga (forma de cono en la fig. 12).

### SHELL181

Elemento de lámina utilizado para representar los apoyos de la suspensión.

### MASS21

Las masas concentradas se utilizan como nodos en el centro de gravedad correspondiente, representando el motor, los ocupantes, las baterías, etc.

### COMBIN14

Elemento tipo resorte/amortiguador, utilizado para conectar dos nodos entre sí (en los grados de libertad de la rótula plástica).

### COMBIN39

Es un elemento de “resorte no-lineal”, unidireccional, con capacidad de una relación fuerza-desplazamiento generalizada, utilizado para representar la rótula plástica. Este elemento fue definido en el modelo con la característica definida en la figura a continuación:

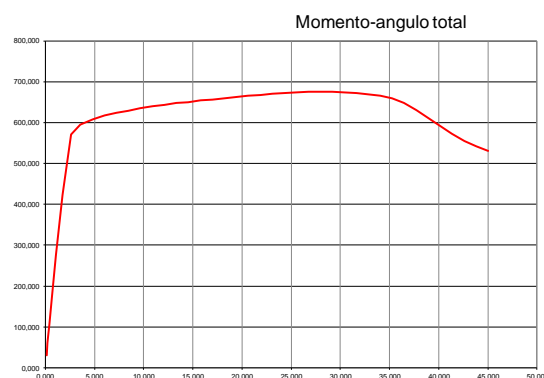


Figura 10. Curva momento-ángulo total del elemento COMBIN39, utilizado para definir la rótula plástica.

## 4.8 Propiedades del material

Se utilizó el Acero SAE4130 descrito anteriormente, que es un material típico en automóviles de competición con refuerzo de tubos de acero.

#### 4.9 Cargas y apoyos

En el ángulo indicado en la Norma FMVSS 216, se aplicó una carga dinámica de 16927,67 N durante 120 segundos.

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 Vibraciones libres

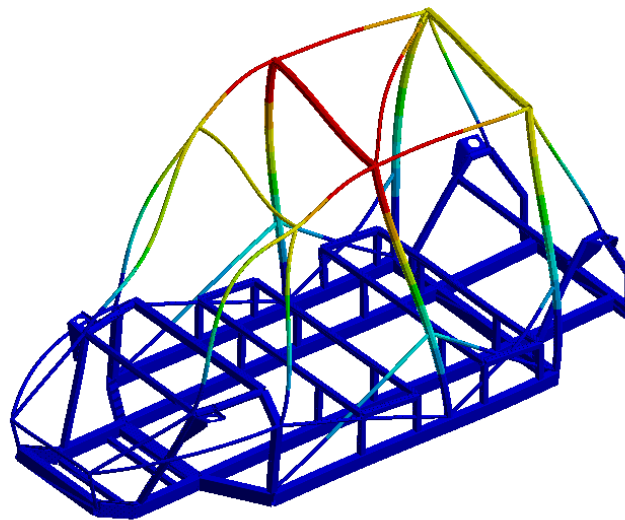


Figura 11. 4º modo natural de vibración. Frecuencia: 31,57 Hz

En la figura anterior, se puede apreciar la fuerte integridad de una estructura tubular. Cada uno de sus miembros actúan como refuerzo, y la estructura trabaja en conjunto, dándole relativamente una alta resistencia a fenómenos como pandeo y/o flexión elastoplástica.

#### 5.2 Ensayo de aplastamiento de techo por elementos finitos

Se realizó el ensayo mediante un modelo dinámico de elementos finitos, considerando la rigidez, masa y amortiguamiento de la estructura, sometido a una carga monótonamente creciente de 16382 N en la dirección que establece la norma, durante un tiempo de ensayo de 120 segundos. El programa utiliza el método de Newmark de integración en el tiempo.

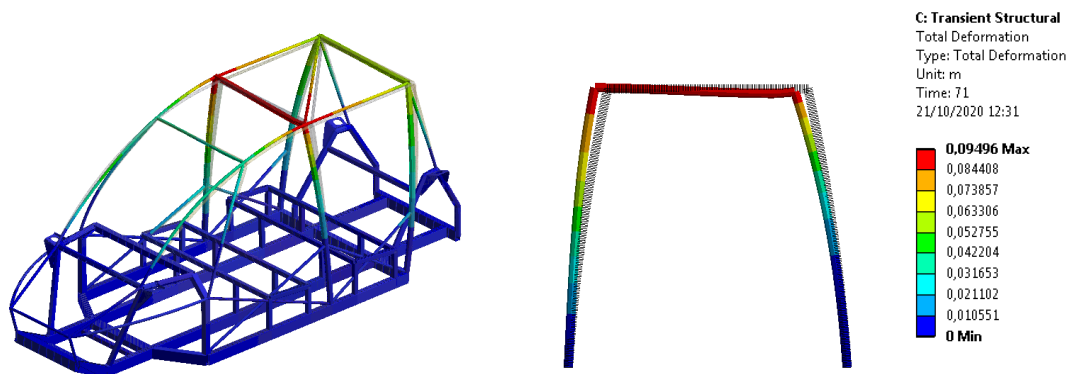


Figura 12. Desplazamientos totales al 71% de la carga (último punto convergido del modelo).

En estos resultados de la figura anterior, se puede ver claramente que la soldadura del pórtico (conocido como Pilar B), no “cede” a la fuerza aplicada, siendo muy rígida, unida rígidamente mediante contactos MPC. En este punto se introducirá el elemento COMBIN39 con su correspondiente diagrama, de modo de poder obtener una modelización de la “rótula plástica”, o sea un fenómeno en el cual la soldadura “cede” debido a la magnitud de la fuerza.

### 5.3 Comparación entre modelo sin rótula plástica vs. Modelo con rótula plástica (COMBIN39).

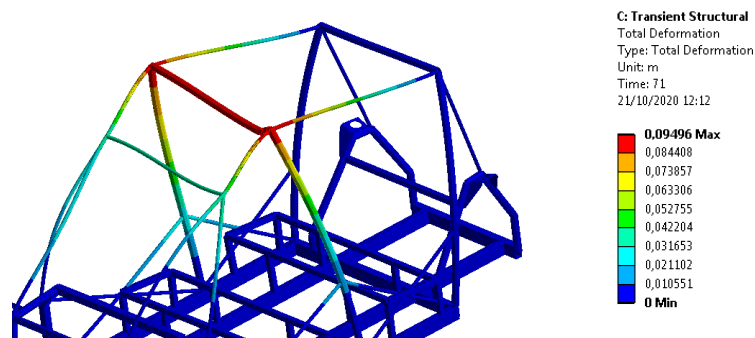


Figura 13 Desplazamientos al 71% de la carga amplificados 3,8 veces (modelo sin rótula plástica).

OCT 21 2020  
11:30:41

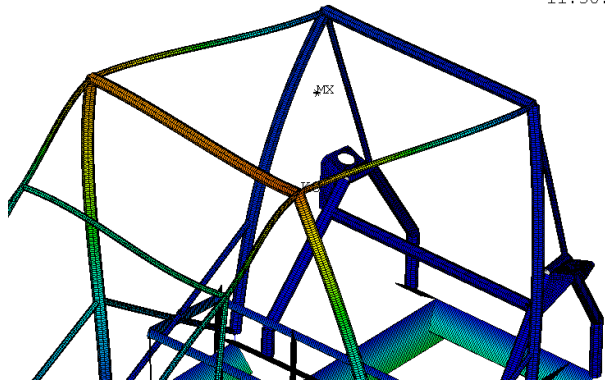


Figura 14. Desplazamientos al 71% de la carga amplificados 3,8 veces (modelo con rótula plástica).

En las dos figuras anteriores se puede ver claramente la diferencia entre el colapso plástico en la viga propiamente dicha, o bien, como es en el segundo caso, en la soldadura. Esta situación va a depender de qué tan resistente sea dicha soldadura. En este modelo, esta resistencia está dada por el diagrama momento-ángulo del elemento COMBIN39. Sin embargo, si la soldadura fuere lo suficientemente resistente, se produciría la situación de la primera figura.

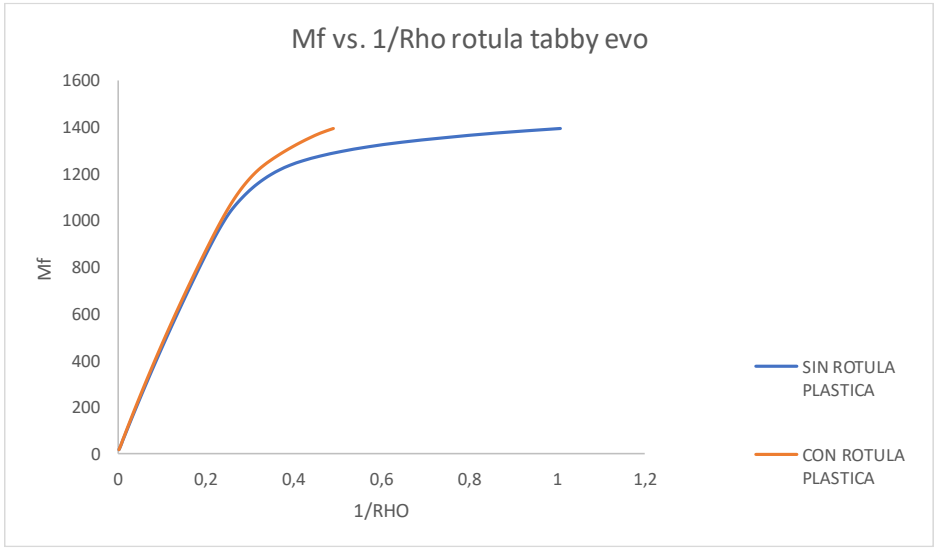


Figura 15. Comparativa de diagramas de la rótula del Tabby Evo.

En la imagen anterior, se puede apreciar la curva de Feodosiev para el punto de unión soldada del pilar B de la estructura completa. Si la comparamos con modelizaciones anteriores, se aprecian varios fenómenos: por un lado, la transición entre la parte elástica y la parte plástica es suave en ambos casos. Por otro, en ninguno de los dos casos el modelo converge hasta el 100% de la carga.



Esta comprobación numérica del colapso del techo establece la carga límite en aprox. un momento flector de 1200 Nm. Independientemente de la máxima deflexión que establezca la norma, en este ensayo por MEF se puede ver claramente el punto en donde la estructura comienza a colapsar.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo demuestran que, mediante software MEF avanzado, se puede modelar con mucha precisión el colapso de una estructura tipo celda tubular/chapa. Los datos de partida son, necesariamente, conocer muy bien las propiedades de material, y la resistencia máxima de la soldadura a la flexión, y de esta manera obtener una muy buena aproximación que es útil en el momento del diseño, y una vez desarrollado el diseño final, rubricarlo con un ensayo físico.

Cabe aclarar también que el modo específico de colapso en este caso es flexión elasto-plástica en la viga, o bien rótula plástica en las uniones soldadas, y que, tal como se dijo al principio del trabajo, esta resistencia al colapso, aunque ayuda, no necesariamente evita las lesiones de los ocupantes del vehículo, ya que esto depende de muchos factores.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, al CIDIV y al Departamento de Ingeniería Mecánica de UTN FRGP por el apoyo brindado para llevar a cabo este trabajo.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Luchemos por la Vida. Asociación Civil. Estadísticas de Muertos en Argentina durante 2019.
- [2] Melina Dorsa, Fabián Pons, "Investigación sobre mal uso de banquetas en General Paz, CABA, Buenos Aires, Argentina", Segundo Congreso sobre medios de transporte y sus tecnologías asociadas, UTN FRGP 11 a 13 sep 2019.
- [3] Open Source Hardware Association (<https://www.oshwa.org/>).
- [4] Laboratory Test Procedure for FMVSS 216 Roof Crush Resistance TP-216-05, U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration. 2006.
- [4] Jackson, K. E., Fasanella, E. L., & Lyle, K. H. (2006). Crash Certification by Analysis-Are We There Yet?.
- [5] FEODOSIEV, V. I. Resistencia de Materiales—Ed. Sapiens—Buenos Aires—1976, 1985.
- [6] 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.