

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE MAYORACIÓN DE CARGA ESTÁTICA PARA CUANTIFICAR EL IMPACTO DE UN VEHÍCULO EN UNA ESTRUCTURA

DETERMINATION OF THE STATIC LOAD COEFFICIENT TO QUANTIFY THE IMPACT OF A VEHICLE ON A STRUCTURE

María H. Peralta^a, Leonel O. Pico^b, Norma L. Ercoli^a

^aÁrea de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs. As., Avda. Del Valle 5737, 7400 Olavarría, Bs. As. Argentina
mperalta@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>

^bÁrea de Mecánica, Departamento de Ingeniería Electromecánica, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs. As., Avda. Del Valle 5737, 7400 Olavarría, Bs. As. Argentina

Palabras clave: impacto, colapso estructural, falla, medio de unión.

Resumen. En este trabajo se muestran los análisis teóricos, numéricos y experimentales realizados para la evaluación de la estructura de un limitador de altura que colapsó debido al impacto de un vehículo. El limitador está compuesto por una viga de hormigón armado apoyada sobre dos columnas de igual material. La viga está vinculada a cada columna por medios de unión constituidos por un conjunto de barras roscadas y arandelas de acero. Debido al impacto del vehículo, la colisión provocó la caída de la viga sobre el vehículo. En los análisis realizados se planteó un escenario de mínima energía involucrada para determinar la mínima fuerza equivalente que provocaría el volcamiento de la viga. Los resultados obtenidos indican que el colapso estructural se debió a la falla del medio de unión de columna con viga del limitador de altura. Se presenta el estudio realizado para determinar la carga de colapso, a partir de la solicitud del Municipio de Olavarría pretendiendo sentar un precedente para futuros proyectos que contemplen esta acción en el diseño estructural.

Keywords: impact, structural collapse, failure, means of union

Abstract. In this work the theoretical, numerical and experimental analyzes carried out for the evaluation of the structure of a height limiter that collapsed due to the impact of a vehicle are shown. The limiter is composed of a reinforced concrete beam supported on two columns of the same material. The beam is linked to each column by joining means constituted by a set of threaded rods and steel washers. Due to the impact of the vehicle, the collision caused the fall of the beam on the vehicle. In the analyzes carried out, a scenario of minimum energy involved was established to determine the minimum equivalent force that would cause the bending of the beam. The results obtained indicate that the structural collapse was due to the failure of the column joining means with beam of the height limiter. The study carried out to determine the burden of collapse is presented, based on the request of the Municipality of Olavarría, which aims to set a precedent for future projects that contemplate this action in structural design.

INTRODUCCIÓN

Las acciones dinámicas constituyen un tema de relevancia en el diseño de estructuras. La importancia de su análisis reside fundamentalmente en que no son de fácil determinación y en que son de gran magnitud, actuando en cortos intervalos de tiempo. Usualmente, a partir de planteos energéticos es posible estimar su magnitud estática equivalente. En particular, las cargas dinámicas de impacto adquieren importancia en el análisis estructural dado que pueden ocasionar pérdidas de vidas humanas.

Frecuentemente, las estructuras más evaluadas son los puentes de hormigón (Do et al, 2019), donde se determinan los perfiles de esfuerzos y clasificación de tipos de falla de pilares frente al impacto de vehículos. Las colisiones de vehículos pesados pueden causar víctimas fatales, como en Texas en 2002 (Buth et al., 2010). Numerosos estudios muestran que este problema se ha abordado con pruebas experimentales (Buth et al., 2011), simulaciones numéricas (Sharma et al, 2012; Abdelkarim y El Gawady, 2017; Do et al., 2018; Agrawal, 2011; Agrawal, 2013) y modelos teóricos simplificados (Chen et al., 2016; Al-Thairy y Wang, 2013) para estudiar el comportamiento estructural bajo cargas de impacto. Los dos últimos métodos se utilizan cada vez más en comparación con los primeros, no solo por los altos costos y la seguridad asociados con las pruebas experimentales, sino también por la capacidad de lograr una alta precisión en la predicción de las respuestas dinámicas de las estructuras con modelos numéricos y analíticos avanzados.

Sin embargo, existen otras estructuras que pueden sufrir impacto de vehículos, como ser postes y limitadores de altura. En este último caso, motivo del presente trabajo, resulta necesario estimar la carga mínima que causa el colapso estructural, y determinar si el colapso se debe a falla de los elementos estructurales o bien a la falla de los medios de unión.

1 ESTRUCTURA EVALUADA

La estructura evaluada es un limitador de altura de hormigón armado cuya resistencia característica es 21 MPa, que se muestra en la Figura 1. La estructura fue premoldeada en taller y montada en el lugar. Está formada por vigas de hormigón armado, de dos tramos independientes con luces entre centros de apoyo de 11,20 m y 8,80 m, respectivamente. Ambos tramos son de sección tipo L de 0,50 m × 0,80 m × 0,15 m Figura 2. Las vigas están apoyadas en tres columnas de hormigón armado, de sección 0,40 m × 0,40 m, ubicadas en los extremos de viga y un apoyo central donde apoyan ambos tramos. La altura de las columnas es de 3,45 m sobre el nivel de terreno. La sujeción de cada viga a cada columna está dada por dos medios de unión horizontales (Figuras 2 y 3), que consiste en una barra roscada de $\frac{3}{4}$ " y 0,40 m de longitud, tuerca hexagonal y arandela de diámetro 0,09 m, espesor 4 mm y agujero interior de 0,02 m. La barra roscada se encuentra sin adherencia con el hormigón, dentro de agujeros rectangulares de 0,03 m × 0,07 m realizados en la columna.

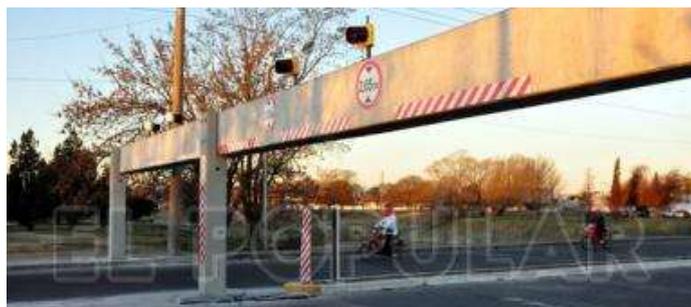


Figura 1: Vista general de la estructura del limitador colocada sobre el puente.

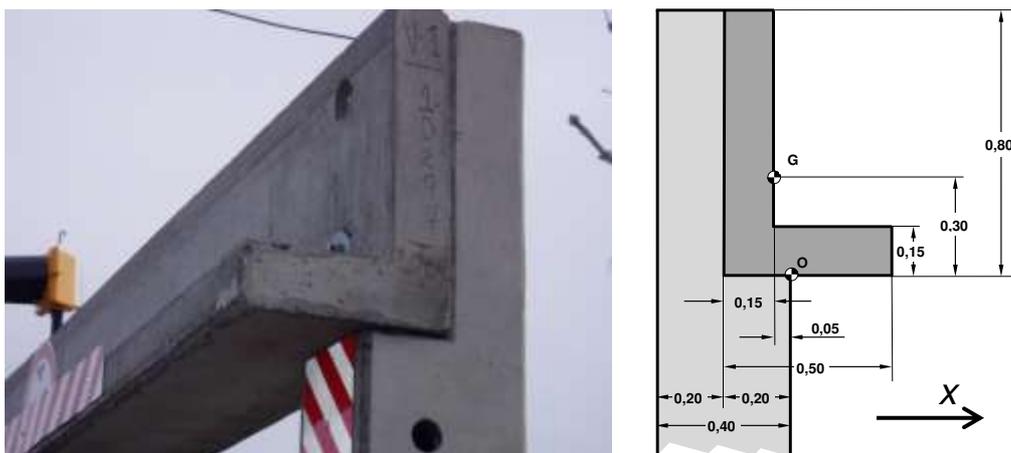


Figura 2: Detalle de la viga y apoyo en columna correspondiente a apoyo extremo y dimensiones en m.



Figura 3: Vista del medio de unión colocado.

2 MARCO TEÓRICO

Se planteó el escenario correspondiente al impacto de un vehículo con características similares al del evento, para lo cual consideró la masa de 3000 kg y un área de impacto en la parte central de la viga de 0,25 m de alto por 2,5 m de largo, según surge de los registros fotográficos del evento.

El planteo teórico del problema permite obtener el coeficiente de maximización de la carga estática para considerar el efecto del impacto. Este coeficiente depende de las características mecánicas y geométricas de la estructura, del material, de las masas involucradas de la viga y del vehículo y de la velocidad. Se supone que la energía cinética del cuerpo se transforma íntegramente en trabajo desarrollado por el cuerpo en la distancia recorrida x y que el cuerpo se frena totalmente sin deslizar. Por consiguiente, la energía cinética se obtiene de la Ec. (1).

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

donde m es la masa del vehículo en kg y v es la velocidad en m/s. El trabajo W desarrollado por el cuerpo en la distancia x cuando se aplica una fuerza F_d está dado por la Ec. (2).

$$W = F_d x \quad (2)$$

donde x es la distancia recorrida en m y F_d es la fuerza dinámica en N. En consecuencia, la fuerza dinámica se obtiene al igualar la energía cinética con el trabajo desarrollado, Ec. (3).

$$F_d = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{x} \quad (3)$$

La fuerza estática del cuerpo es su peso mg , Ec. (4).

$$F_s = mg \quad (4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

Relacionando la fuerza dinámica con la fuerza estática, se obtiene el coeficiente de mayoración ϕ , representado por la Ec. (5).

$$\phi = \frac{F_d}{F_s} = \frac{v^2}{2gx} \quad (5)$$

La desaceleración a se obtiene a partir de la sumatoria de fuerzas de la segunda ley de Newton, dada por la Ec. (6).

$$a = \frac{F_d}{m} \quad (6)$$

Si la velocidad final es cero, el tiempo de impacto t está dado por la Ec. (7).

$$t = \frac{v}{\phi g} \quad (7)$$

3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se realizaron 3 (tres) ensayos experimentales para la determinación de los parámetros mecánicos del medio de unión, que se detallan a continuación:

1. Ensayo de penetración del conjunto barra roscada-tuerca-arandela en una unión estructural de hormigón viga-columna, para evaluar y cuantificar la carga de falla del medio de unión, según se muestra en la configuración de la Figura 4.
2. Ensayos experimentales para la caracterización del material de las arandelas: determinación de la composición química del material para establecer el tipo de acero.
3. Ensayos experimentales para la determinación del límite elástico del material de la arandela y la curva tensión-deformación.

En el ensayo de penetración del conjunto barra roscada-tuerca-arandela en una unión estructural de hormigón viga-columna se determinó que la arandela es el elemento que se deforma, con una carga de inicial de 22500 N que se muestra en la Figura 5. En el ensayo se pudo observar que no hay evidencia de deformación en la tuerca y en la barra roscada. El patrón de deformación muestra que la tuerca produce troquelado sobre la arandela, replicando sobre ésta la forma hexagonal, como se muestra en la Figura 6. El proceso de deformación finaliza con una carga máxima de 53460 N (Figura 5), cuando la barra roscada y la tuerca atraviesan completamente la arandela, como se aprecia en la Figura 6.

La caracterización química del material permitió establecer que el acero de la arandela es AISI 1020.

Los resultados del ensayo de tracción realizado sobre una probeta extraída de la arandela según norma ASTM E8 indican que la tensión de fluencia es 416 ± 8 MPa y que la tensión de rotura es 471 ± 10 MPa.

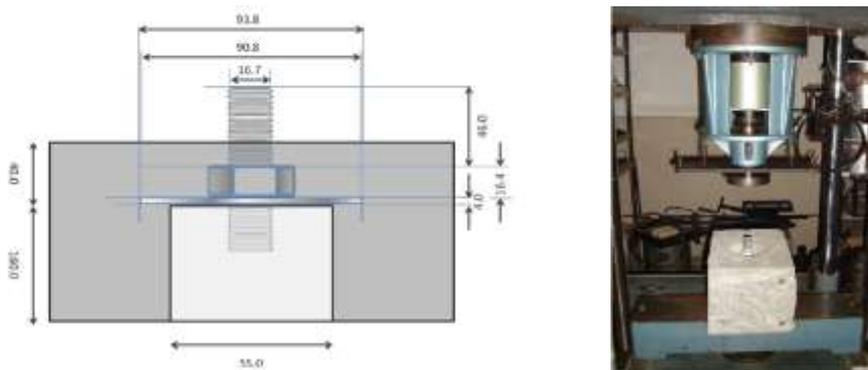


Figura 4. Esquema de la disposición del medio de unión y materialización del ensayo.

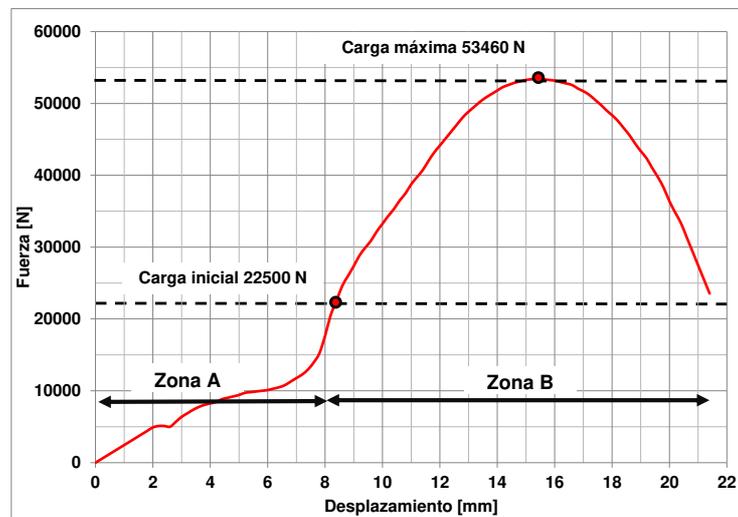


Figura 5. Ensayo de fuerza en función del desplazamiento del medio de unión.



Figura 6. Medio de unión: a) antes del ensayo; b) y c) después del ensayo.

4 MODELOS NUMÉRICOS

Se realizó la modelización numérico-computacional del conjunto columna-viga y de los componentes del medio de unión. La modelización permitió determinar el comportamiento del medio de unión y en particular el de la arandela cuando actúa un esfuerzo horizontal sobre la unión. El modelo generado se implementó en un software (AlgorTM) que utiliza el Método de los Elementos Finitos (MEF), obteniéndose los estados tensionales y de deformación de los elementos que constituyen el medio de unión.

En la Figura 7 se muestra el modelo numérico-computacional global del medio de unión con la columna y en la Figura 8 se indica el detalle de la modelización del sector

correspondiente al medio de unión con sus componentes: barra roscada, tuerca y arandela.

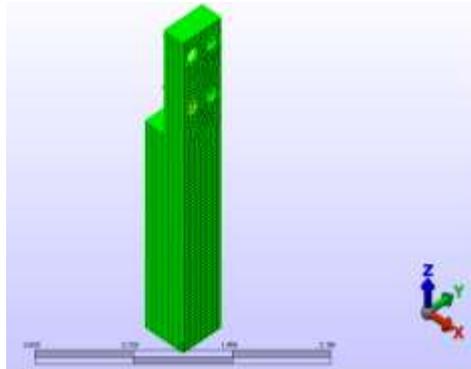


Figura 7. Malla de elementos finitos del modelo global de columna con medio de unión.

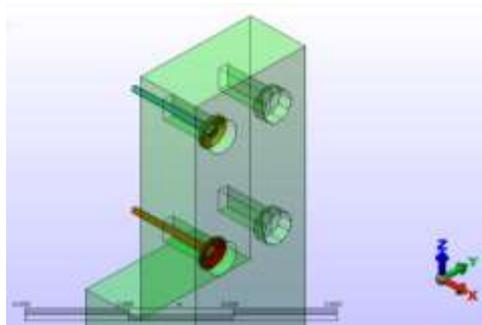


Figura 8. Detalle de modelización de la unión viga-columna.

La Figura 9 muestra la curva tensión-deformación adoptada para el material de la arandela simulada en el modelo numérico. Los parámetros del modelo material se obtuvieron a partir de los resultados experimentales descritos anteriormente.

- Fluencia: deformación de 0,2% (0,002 mm/mm) y tensión de 420 MPa.
- Rotura: deformación de 34% (0,34 mm/mm) y tensión de 480 MPa.

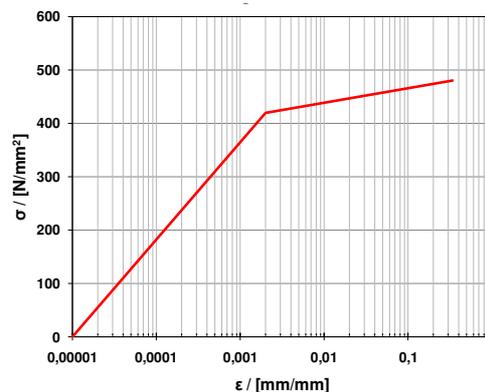


Figura 9. Curva tensión-deformación del acero de la arandela.

5 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE MAYORACIÓN

Con el objetivo de determinar el coeficiente de mayoración se evaluaron distintos escenarios posibles para lograr estados tenso-deformationales de fluencia y de rotura en el medio de unión que originen el colapso estructural.

Como resultado de estos análisis previos surgió una condición de mínima energía que ocasiona el colapso. Esta condición implicó una velocidad de 21,5 km/h del móvil de masa estimada de 3000 kg que produce el mínimo desplazamiento de 0,20 m requerido para el vuelco de la viga. En esta situación se obtuvo una fuerza dinámica de 267506 N, que se tradujo en un coeficiente de mayoración de 9 (aproximadamente). En la Tabla 1 se resumen los datos ingresados en el cálculo y en la Tabla 2 se muestran los resultados calculados. La carga dinámica obtenida se introdujo en el modelo numérico como carga estática equivalente.

Velocidad (km/h)	21,5
Velocidad (m/s)	5,97
Masa (kg)	3000
Distancia desarrollada (m)	0,20

Tabla 1. Datos ingresados para el cálculo teórico.

Fuerza estática (N) o peso	29430
Fuerza dinámica total (N)	267506
Desaceleración (m/s^2)	89,17
Tiempo de impacto (s)	0,07
Coefficiente de impacto	9

Tabla 2. Resultados obtenidos del cálculo teórico.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del modelo numérico muestran que en el escenario de impacto mínimo estudiado las tensiones superan los límites de fluencia (según criterio de Von Mises) y de rotura (criterio de tensiones principales) del material de las arandelas del medio de unión.

En la Figura 10 se muestran los estados tensionales obtenidos del análisis numérico en el medio de unión y sus componentes: barra roscada, tuerca y arandela.

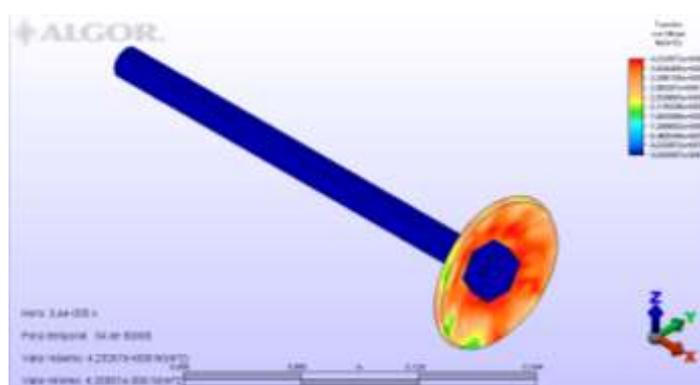


Figura 10. Tensiones en el medio de unión según criterio de Von Mises, en N/m^2 .

En las Figuras 11 y 12 se muestran los estados tensionales y de deformación de la arandela, según el criterio de Von Mises. Del análisis de los resultados numéricos obtenidos se puede afirmar que la arandela presenta zonas con deformaciones cuyo valor máximo es 1,31 % (0,013 mm/mm), lo cual indica que el material se encuentra en fluencia, según el diagrama tensión-deformación de la Figura 9. Del análisis de tensiones obtenidas numéricamente, cuyo valor máximo es $4,18 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (418 MPa) se puede afirmar que la arandela presenta zonas

con tensiones que alcanzan la fluencia del material, según el diagrama de tensión-deformación de la Figura 9.

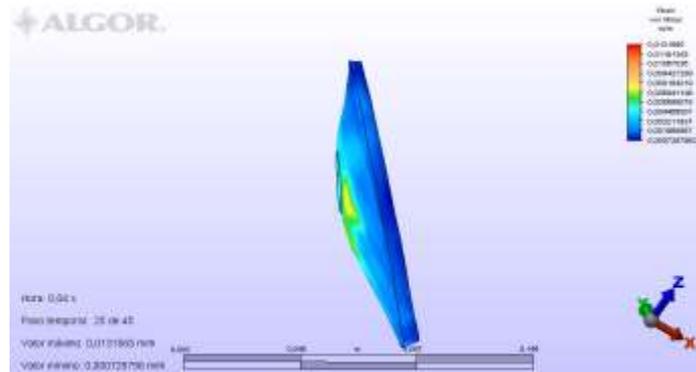


Figura 11. Deformaciones según criterio de Von Mises en mm/mm. El material de la arandela se encuentra en fluencia.

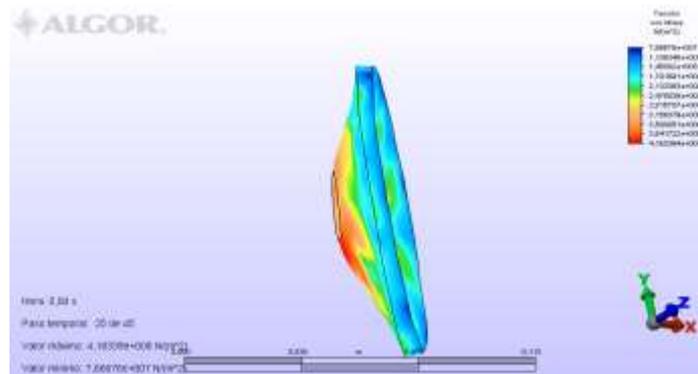


Figura 12. Tensiones según criterio de Von Mises en N/m^2 . El material de la arandela se encuentra en fluencia.

En las Figuras 13 a 15 se muestran los estados tensionales del tensor de tensiones en las tres direcciones x , y , z , (tensiones máximas), observándose que hay sectores de la arandela que alcanzan y superan los valores de tensiones límites mostrados en la Figura 9, en concordancia con el ensayo experimental.

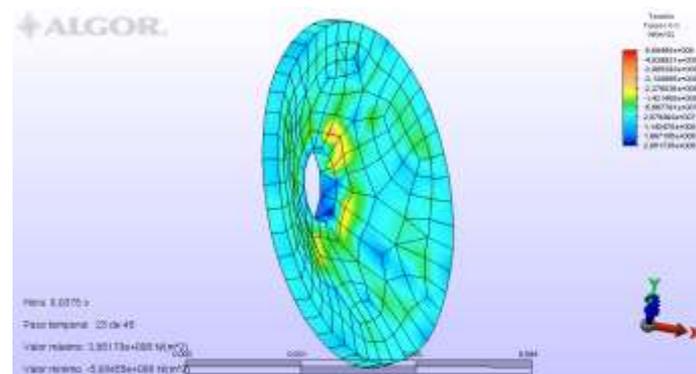


Figura 13. Tensiones σ_{xx} en N/m^2 . Valor máximo: $5,69 \cdot 10^8 N/m^2$ (569 MPa). Se supera el valor de tensión de rotura.

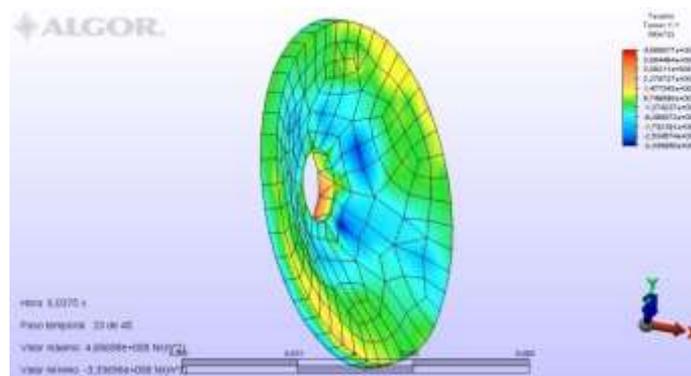


Figura 14. Tensiones σ_{yy} en N/m^2 . Valor máximo: $4,69 \cdot 10^8 N/m^2$ (469 MPa).
Se supera el valor de la tensión de fluencia.

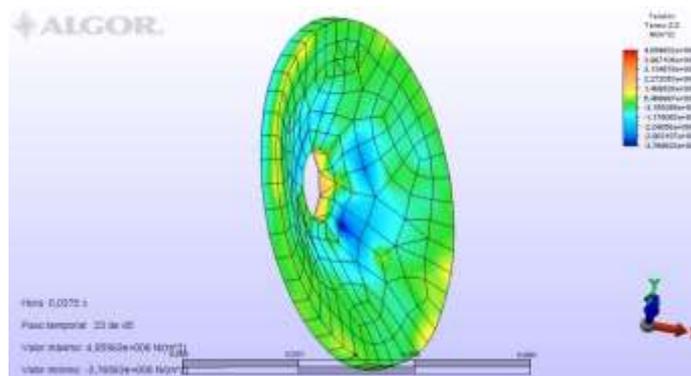


Figura 15. Tensiones σ_{zz} en N/m^2 . Valor máximo: $4,86 \cdot 10^8$ (486 MPa).
Se alcanza el valor de tensión de rotura.

El análisis de distribución de tensiones obtenidas mediante la resolución del modelo numérico permite afirmar que la zona de mayores esfuerzos en la arandela se corresponde con la zona de contacto con la tuerca. Esto está de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo experimental de las arandelas y con la información visual dada por la fotografía de las arandelas deformadas después del impacto y del colapso de la estructura, como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Estado de las arandelas pertenecientes al medio de unión después del impacto del móvil.
Fotografía aportada por la Municipalidad de Olavarría.

7 CONCLUSIONES

El ensayo experimental del medio de unión de las mismas características que el colocado en el limitador permitió determinar la carga de falla (estática) al arrancamiento, resultando un

valor de 53460 N. Lo observado en el ensayo permite afirmar que no existe evidencia de deformación ni en la tuerca ni en la barra roscada, por lo que toda la deformación registrada es atribuida a la arandela.

El escenario de impacto adoptado y simulado en este desarrollo permitió establecer que la capacidad del medio de unión (carga de falla de 53460 N) fue superada para las condiciones de mínima energía planteadas, lo que explica el colapso de la estructura del limitador.

Los resultados obtenidos, en las condiciones planteadas en el presente trabajo, de la simulación numérico-computacional determinan que una carga estática equivalente de impacto aproximadamente igual a 9 veces el peso del vehículo adoptado produce en las arandelas estados tensionales y de deformación que se encuentran en fluencia y en rotura. Por su parte, los estados tensionales de la barra roscada y de la tuerca son mucho menores a los límites de fluencia y rotura.

Este escenario de impacto, considerado como una situación de mínima energía necesaria para el colapso estructural, genera estados de tensiones y de deformaciones en la arandela que justifican el mecanismo y forma de falla del medio de unión colocado. Este comportamiento se caracteriza por el aplastamiento de la arandela, su fluencia y su posibilidad de atravesar el agujero de hormigón existente en la viga y en la columna, con la consecuente pérdida de equilibrio y caída de la viga.

REFERENCIAS

- Abdelkarim, O.I., El Gawady, M.A., *Performance of bridge piers under vehicle collision. Engineering Structures*, 140:337–52, 2017.
- Agrawal, A.K., *Bridge Vehicle Impact Assessment. New York State Department of Transportation*, University Transportation Research Center, 2011.
- Agrawal, A.K., Liu, G.Y., Alampalli S. Effects of truck impacts on bridge piers. *Advanced Materials Research: Trans. Tech. Publ.*, 13–25, 2013.
- Algor Software, *Finite Element Analysis*. 2007.
- Al-Thairy, H., Wang, Y. An assessment of the current Eurocode 1 design methods building structure steel columns under vehicle impact. *Journal Construction Steel Research*, 88:164–71, 2013.
- Buth, C.E., Williams, W.F., Brackin, M.S., Lord, D., Geedipally, S.R., Abu-Odeh, A.Y., *Analysis of large truck collisions with bridge piers: phase 1. Report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions*. Rep FHWA/TX-10/94973-1. Texas Transportation Inst, College Station, TX, 2010.
- Buth, C.E., Brackin, M.S., Williams, W.F., Fry, G.T. *Collision loads on bridge piers: phase 2. Report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions*. Rep FHWA/TX-11/9-4973-2, Texas Transportation Inst., College Station, TX, 2011.
- Chen, L., El-Tawil, S., Xiao, Y. Reduced models for simulating collisions between trucks and bridge piers. *Journal Bridge Engineering*, 21. 04016020, 2016.
- Do, T.V., Pham, T.M., Hao, H., Impact force profile and failure classification columns against vehicle impact. *Engineering Structures*, 183:443–458, 2019.
- Do, T.V., Pham, T.M., Hao, H., Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision. *Engineering Structures*, 156:243–59, 2018.
- Sharma, H., Hurlbaeus, S., Gardoni, P., Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact. *Int. Journal of Impact Engineering*, 43:52–62, 2012.