

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA UNIÓN CUBIERTA - MAMPOSTERÍA

María I. Montanaro^a, Sabrina Bisogno Eyler^a, David E. Díaz Maimone^a

^aÁrea de Estructuras, Departamento de Ingeniería civil y agrimensura, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Del Valle 5737, Olavarría, Buenos
Aires, Argentina, <https://www.fio.unicen.edu.ar>

Palabras clave: unión cubierta – mampostería, mecánica computacional, elementos finitos

Resumen. En el centro de la provincia de Buenos Aires, en los últimos años se han producido voladuras de techos de viviendas completos durante temporales. Un denominador común es la falla en la unión de la correa a la mampostería. Para determinar las causas de estas fallas se analizaron las velocidades del viento, la vulnerabilidad de las viviendas y los detalles constructivos.

La reglamentación vigente para la verificación es, en el caso de las correas de techo de madera, el CIRSOC 601 “Reglamento argentino de estructuras de madera” y en el de las correas de perfiles C de chapa doblada, el CIRSOC 303 “Reglamento argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío”. En ambas especificaciones, la verificación de la unión entre la correa y la mampostería no contiene detalles de cómo efectuar el cálculo y sólo establecen que el proyectista debe asegurar la transmisión de los esfuerzos a los apoyos.

La unión de la correa a la mampostería en la práctica se materializa de diferentes formas. En el presente trabajo se modelan y analizan tres tipologías de unión, en concordancia con las formas constructivas relevadas en la zona. La simulación para determinar la capacidad resistente de cada uno de esos tipos de unión se realiza en un programa de elementos finitos, utilizando parámetros recolectados de la bibliografía. Se evalúa y compara el rendimiento de cada una de ellas frente a las cargas de viento y se plantean futuras líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos.

Keywords: roof joint – masonry, computational mechanics, finite element

Abstract. In the center of the province of Buenos Aires, in recent years roofs of entire houses have been blown up during storms. A common denominator is the failure of the purlin to masonry bond. To determine the causes of these failures, the wind speeds, the vulnerability of the houses and the construction details were analyzed.

The current regulation for verification is, in the case of wooden roof purlins, CIRSOC 601 "Argentine Regulation of Wooden Structures" and in the case of C-profile purlins of bent sheet metal, CIRSOC 303 "Argentine regulation of cold-formed open-section steel structural elements. In both specifications, the verification of the connection between the purlin and the masonry does not contain details of how to carry out the calculation and only establish that the designer must ensure the transmission of efforts to the supports.

The attachment of the purlin to the masonry in practice is embodied in different ways. In the present work, three types of union are modeled and analyzed, in accordance with the construction surveyed in the area. The simulation to determine the resistant capacity of each of these types of joints is carried out in a finite element program, using parameters collected from the bibliography. The performance of each of them against wind loads is evaluated and compared, and future lines of research are proposed based on the results obtained.

1. INTRODUCCIÓN

En el centro de la provincia de Buenos Aires, los temporales han producido voladuras de techos completos de viviendas en los últimos años. Un relevamiento de los mismos se puede hallar en Bisogno Eyler y Montanaro (2021) y Bisogno Eyler y Montanaro (2022). Se ha concluido que la principal falla se ha producido en la unión correa mampostería, aun cuando las velocidades de viento registradas fueron altas, pero menores a las establecidas en el reglamento CIRSOC 102/2005. Con el fin de cuantificar la resistencia de las diferentes uniones se han realizado simulaciones en un programa de elementos finitos (FEM) que se detallan en el punto 4. Luego, en el punto 5 se analiza la magnitud de la sollicitación en los apoyos debida a las cargas de viento en dos condiciones de exposición. Estas reacciones son comparadas con las resistencias obtenidas en las simulaciones numéricas.

2. REGLAMENTACIÓN VIGENTE

Los lineamientos para la verificación de correas de techo se encuentran para el caso de las correas de madera en el CIRSOC 601 “REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE MADERA” y para correas de perfiles C de chapa doblada en el Reglamento CIRSOC 303 “REGLAMENTO ARGENTINO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO DE SECCIÓN ABIERTA CONFORMADOS EN FRÍO”. Se analiza las recomendaciones que especifican ambos reglamentos para la unión correa-mampostería.

El punto E.6 del CIRSOC 303 abarca los lineamientos para los apoyos. Sólo menciona que se deben tomar los recaudos necesarios para transferir las reacciones de apoyo, pero no proporciona pautas para el cálculo.

El Reglamento CIRSOC 601 “REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE MADERA” en el punto “3.6. TENSIONES TRANSMITIDAS EN LOS APOYOS” hace referencia principalmente a las tensiones generadas en la madera y no a la unión con otros materiales.

Se observa que en ambas reglamentaciones no hay metodología de cálculo a aplicar ni recomendaciones constructivas. El cálculo de cuánto es la resistencia de la unión es la incógnita a resolver.

3. DETALLES CONSTRUCTIVOS

Se analiza un techo en un primer piso de un complejo de departamentos ubicado en la ciudad de Olavarría. Se analiza la unión de los perfiles con las paredes de mampostería en un techo en el que las correas tienen tres apoyos. El primer extremo (Figura 1) es el apoyo correspondiente a la línea municipal. En la Figura 2 se observa cómo fue materializado el apoyo sobre una pared interna y en la Figura 3, el apoyo en la medianera.



Figura 1: Materialización del apoyo en la pared sobre la línea municipal de un complejo de departamentos



Figura 2: Materialización del apoyo en la pared interna de un complejo de departamentos



Figura 3: Materialización del apoyo en la pared medianera de un complejo de departamentos

4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El presente trabajo se divide en dos etapas. La primera tiene el objetivo de corroborar la correcta realización de los modelos de la unión entre perfiles y mortero, y su adherencia. Se comparan las simulaciones numéricas con los datos experimentales de la de la publicación de (Majdi, Hsu and Punurai, 2014). Además, permite obtener los parámetros que se van a utilizar en la segunda etapa, que corresponde a la elaboración de modelos de apoyos de los perfiles de correas que se han amurado en diferente grado mediante morteros de cemento.

4.1 Primera etapa de simulación numérica

(Majdi, Hsu and Punurai, 2014) realizaron ensayos experimentales de correas de chapa doblada embebidas en hormigón. Se ajustaron los parámetros del modelo para lograr simular el comportamiento experimental.

Se listan en la Tabla 1 las propiedades mecánicas adoptadas para el acero y para el mortero.

	Acero	Mortero
Módulo de elasticidad E (MPa)	199950	17452
Coefficiente de Poisson ν	0,3	0,2
σ_f (MPa)	310	-
f'_c (MPa)	-	13

Tabla 1: Propiedades mecánicas

En la primera etapa, se simulan dos perfiles acanalados con la sección transversal mostrada en la Figura 4, embebidos en mortero en ambos extremos.



Figura 4: Sección transversal modelada en la primera etapa

Se muestra en la Figura 5 el modelo obtenido en software.

Con respecto a las condiciones de borde, se aplica un empotramiento en un extremo y un desplazamiento constante de 0.254 mm/min, que corresponde a la velocidad del ensayo. A su vez, se impone que la estructura sólo se puede desplazar longitudinalmente, con el objetivo de ahorrar tiempo computacional. El tiempo total de simulación es de 1200 segundos.

Para la interacción entre elementos se adopta un coeficiente de fricción de 0.14.

Para el mallado de la mezcla se utilizaron elementos de tipo C3D10 y C3D8R para el perfil.

Para la adherencia, se opta por una superficie cohesiva y se adopta un comportamiento bilineal de contacto-desplazamiento para pequeños deslizamientos (ver Figura 6). El criterio de inicio de falla es el de Tensión normal máxima (Maximum nominal stress).

$$MAX \left\{ \frac{\langle \sigma_N \rangle}{N_{max}}, \frac{\sigma_s}{S_{max}}, \frac{\sigma_t}{T_{max}} \right\} = 1 \quad (1)$$

σ_n : tensión nominal en el modo normal puro
 σ_s : tensión nominal en la primera dirección de corte
 σ_n : tensión nominal en la segunda dirección de corte

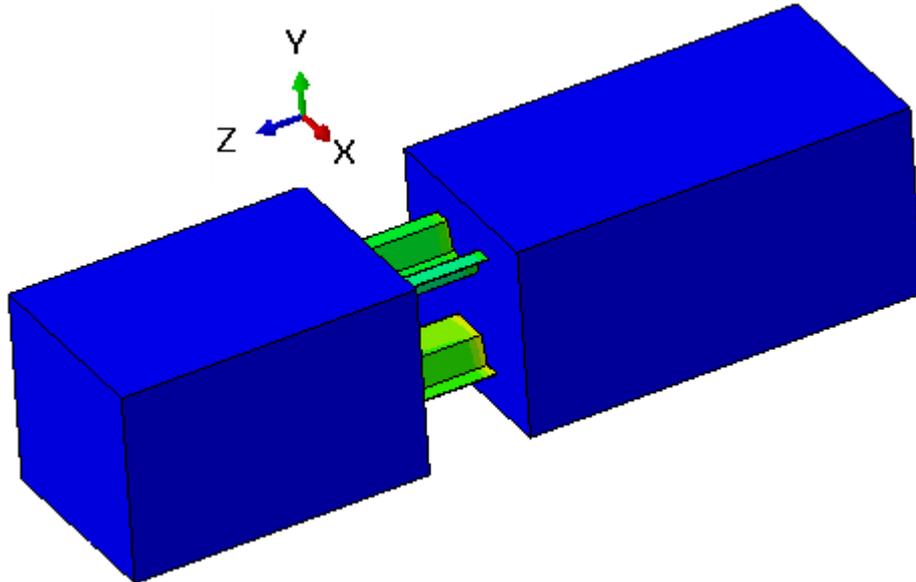


Figura 5: Modelo simulado en la primera etapa

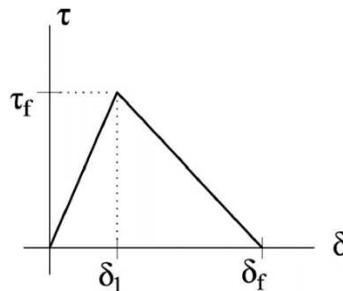


Figura 6: Relación de adherencia-deslizamiento local asumida para acero conformado en frío en concreto.

Los parámetros que mejor se ajustan al modelo experimental se resumen en la Tabla 2

Propiedades de la superficie cohesiva	
τ_f (MPa)	1.23
δ_1 (mm)	0.2769
δ_f (mm)	18
K	4.44

Tabla 2: Propiedades de la superficie cohesiva

Se obtiene la curva fuerza - desplazamiento mostrada en la Figura 7. En la misma se observa la buena correlación entre los resultados experimentales y los numéricos.

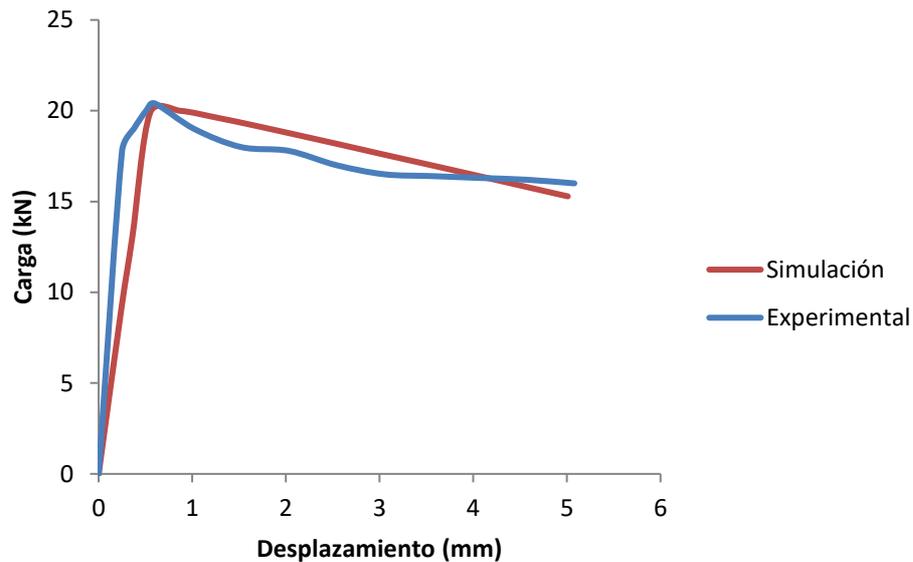


Figura 7: Curva fuerza – desplazamiento

4.2 Segunda etapa de simulación numérica

Se simulan las tres situaciones posibles. En primera instancia se modela un perfil C100 que está poco amurado con la mezcla (Caso 1), luego un perfil que está embebido en la mitad de su altura (Caso 2) y por último un perfil que está amurado hasta el borde inferior del ala superior (Caso 3). Los tres modelos se muestran en la Figura 8 junto con sus dimensiones.

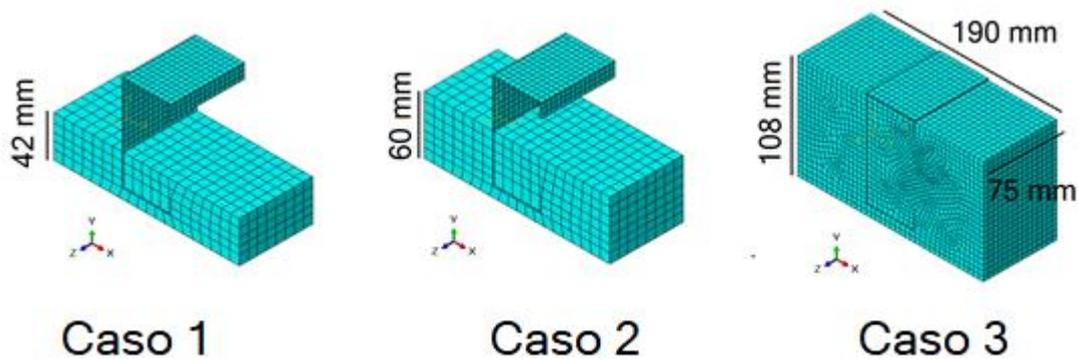


Figura 8: Modelos de los tres apoyos de la correa en el complejo de departamentos de Olavarría

Para todos los modelos se optó por un mallado con elementos de tipo C3D8R. En cuanto a las condiciones de borde, se aplica un empotramiento en la base de la mezcla, una simetría en Z para que el apoyo sea del doble del elemento simulado y poder así ahorrar costos computacionales, y por último una carga aplicada a partir de un deslizamiento constante en el ala superior en el sentido positivo “y”.

En este análisis, es necesario contemplar la posibilidad de que la mezcla se rompa también. Para ello, se definen las siguientes propiedades mecánicas listadas en Tabla 3 (Lubliner, J.).

Propiedades mecánicas en la mezcla	
Ángulo de dilatación	40
Excentricidad	0.1
f_b/f_c	1.16
K	0.667
Parámetro de viscosidad	0

Tabla 3: Propiedades de la mezcla.

Las simulaciones de los tres apoyos arrojan los resultados de carga en función del tiempo mostrados en la Figura 9.

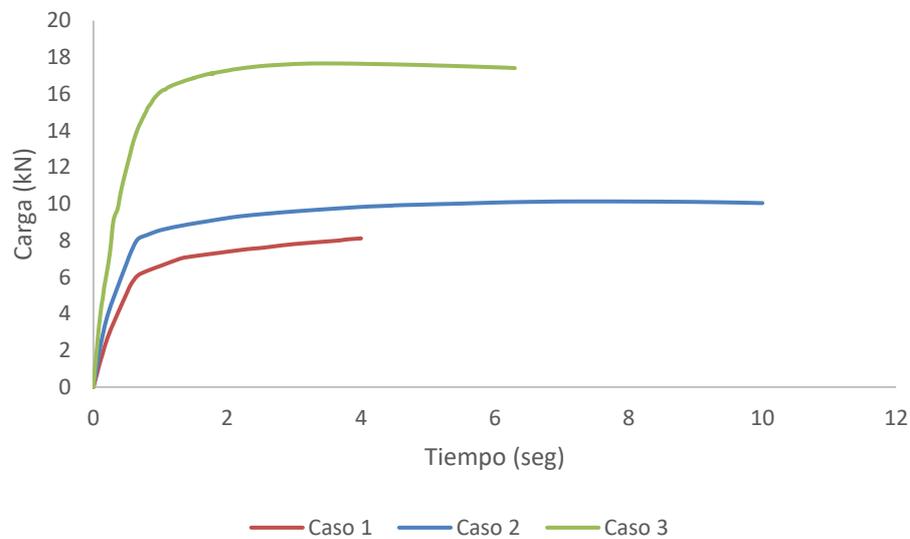


Figura 9: Curva Carga-Tiempo de los tres tipos de apoyos.

En la Figura 9 se observa que el apoyo del perfil Caso 1 llega a una carga de 6.07 kN, para el Caso 2 es de 8.05 kN y para el Caso 3 de 15.93 kN.

Se observa que a medida que más se amura el perfil con mortero, la resistencia es mayor.

5. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA CORREA SOLICITADA A CARGA DE VIENTO

Si se considera el edificio del complejo de departamentos de dos plantas ubicado en la ciudad de Olavarría, en el que las correas de techo apoyan en las tres paredes mencionadas anteriormente, se puede plantear el modelo de correa de la Figura 10.

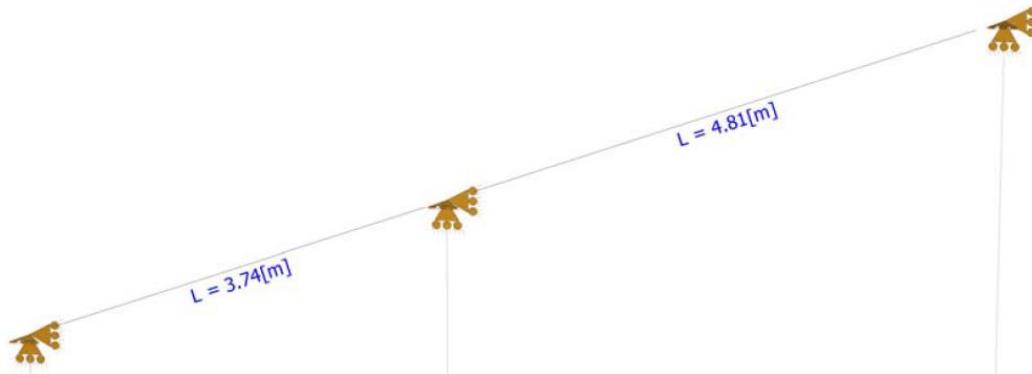


Figura 10: Modelo de correa con tres apoyos

El apoyo A corresponde a la línea municipal y es el que fue modelado como “Caso 1”. El apoyo central B está amurado hasta la mitad de la altura del perfil (Caso 2), en el apoyo C sobre la pared medianera el perfil está amurado en toda su altura (Caso 3).

Se calcula la carga de viento para el centro de la provincia de Buenos Aires, categoría II, exposición B, velocidad básica del viento 51 m/s, edificio parcialmente cerrado (el techo estaba siendo construido antes de que se colocaran las aberturas).

De acuerdo al CIRSOC 102 y la combinación de carga más desfavorable para viento de succión (CIRSOC 301), la viga queda cargada como muestra la Figura 11.

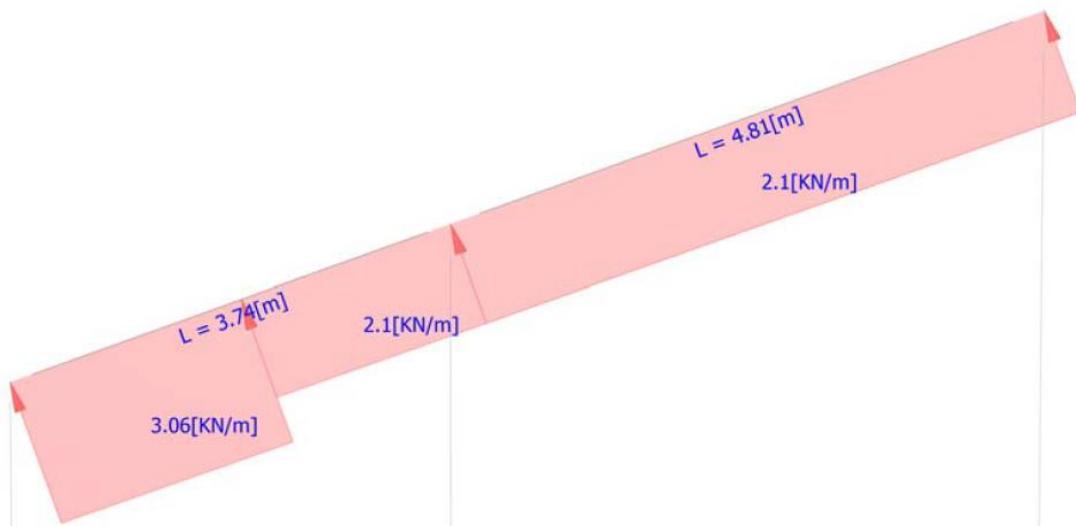


Figura 11: Combinación de cargas 1.5 Viento (exposición B) + 0.9 peso propio

Si se resuelve la viga estáticamente, el apoyo que tendrá una reacción de mayor magnitud será el central. En el edificio de referencia, ese apoyo está materializado por el perfil C conformado en frío apoyado en la mampostería y ligado mediante mortero hasta la mitad de la altura del perfil (ver Figura 2).

Se componen las fuerzas (Figura 12), y resultan: reacción de apoyo central: 11.9 kN, reacción en apoyo de la línea municipal: 3.85 kN.

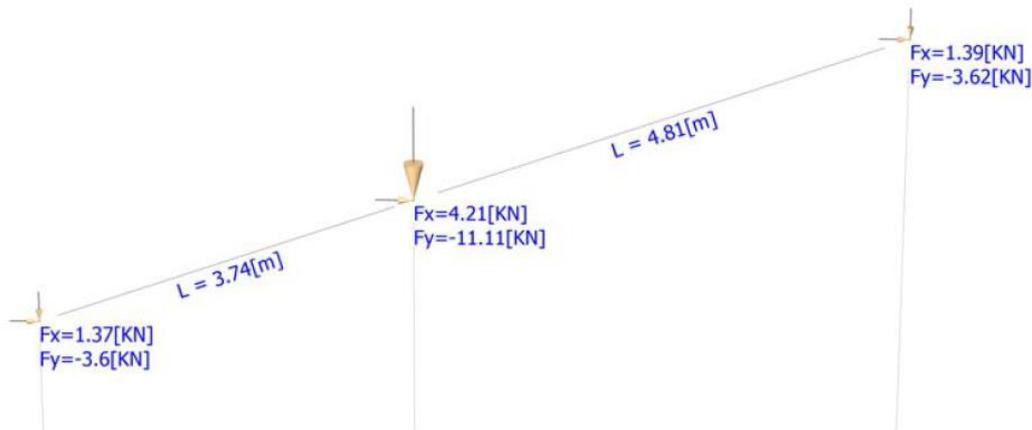


Figura 12: Reacciones en los apoyos

Si se cambia ahora la categoría de exposición a C, se obtienen cargas de viento mayores (Figura 13). Se aplican sobre la viga y se calcula la reacción en el apoyo central.

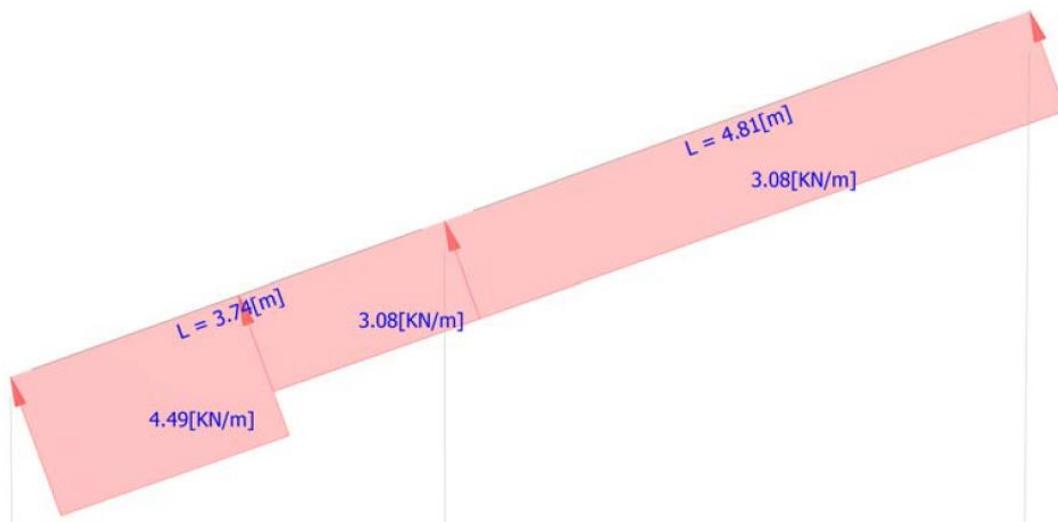


Figura 13: Combinación de cargas 1.5 Viento (exposición C) + 0.9 peso propio

La reacción en el apoyo central resulta de 17.5 kN (Figura 14). En el apoyo de la línea municipal, que es el que tiene una cantidad de mortero menor, la reacción es 5.65 kN.

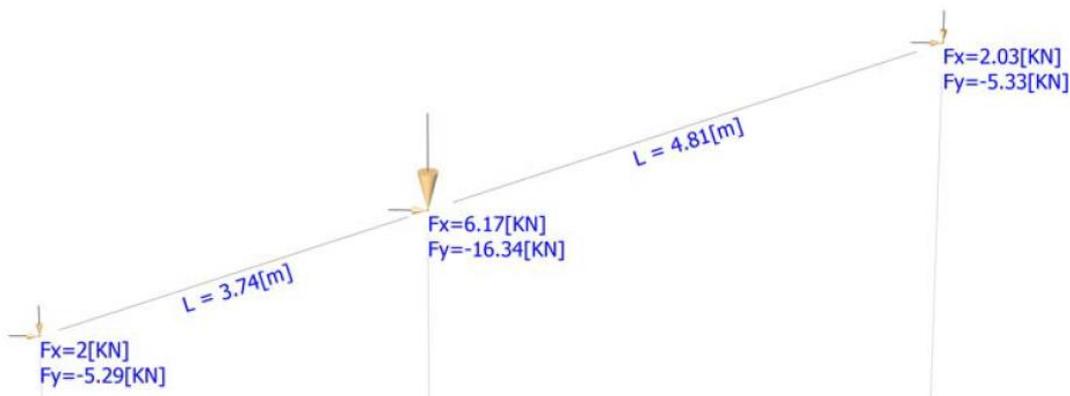


Figura 14: Reacciones en los apoyos

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A modo de resumen se ponen en Tabla 4 los resultados obtenidos para las reacciones que generan la rotura del apoyo obtenidas en el punto 5 según FEM y, además, el valor de las resistencias requeridas en los apoyos según las cargas de viento obtenidas en el punto 5.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Resistencia FEM (kN)	6.07	8.05	15.93
Resistencia requerida en el apoyo - Exposición B (kN)	3.85	11.9	3.85
Resistencia requerida en el apoyo - Exposición C (kN)	5.65	17.5	5.65

Tabla 4: Resumen de resultados.

Se observa que los casos más comprometidos, es decir, donde se supera la capacidad del apoyo, se presenta en la zona del medio y para ambas categorías de exposición.

Al fallar uno de los apoyos, los demás colaboran tomando más carga como resultado de la redistribución de esfuerzos. Esto puede poner en situación de riesgo los apoyos que antes no estaban comprometidos.

7. CONCLUSIONES

Se realizaron modelos en elementos finitos de tres apoyos de correas embebidas en una mezcla, basados en un caso relevado en un complejo de departamentos de la ciudad de Olavarría. Se logró ajustar los parámetros a los datos experimentales de bibliografía. Se obtuvieron resultados de resistencias para cada uno de los tres casos. Las mismas fueron comparadas con las resistencias requeridas obtenidas del análisis de las cargas de viento reglamentarias para la misma zona.

Del presente trabajo se obtuvo como conclusión que el apoyo central tal como fue materializado es insuficiente para las solicitaciones requeridas de acuerdo a la reglamentación vigente. Si el apoyo central falla comprometerá la estabilidad global de la correa.

Se continuará trabajando en el estudio de nuevas formas de refuerzo de apoyos existentes.

REFERENCIAS

Bisogno Eyler, S.; Montanaro, M.I., Análisis de daños en cubiertas por acción del viento en Olavarría. *Actas Congreso Argentino y Latinoamericano de Ingeniería 2021: CADI CLADI CAEDI*, 2021. ISBN 978-987-88-1872-6

Bisogno Eyler, S.; Montanaro, M.I. Revisión de aspectos estructurales de las uniones cubierta – mampostería. *XXVII Jornadas argentinas de Ingeniería estructural*, 2022.

CIRSOC 102 (2015). Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones. INTI-CIRSOC.

CIRSOC 303 (2009) “Reglamento argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío”. INTI-CIRSOC.

CIRSOC 601(2016). “Reglamento argentino de estructuras de madera”. INTI-CIRSOC.

Majdi, Y., Hsu, C. T. T. and Punurai, S. ‘Local bond-slip behavior between cold-formed metal and concrete’, *Engineering Structures*, 2014. 69, pp. 271–284. doi: 0.1016/j.engstruct.2014.03.025.

Lubliner, J. *A plastic-damage model for concrete*. 1989 International Journal of Solids and structures, vol 25 pg. 299-326.