



Vigas reticuladas en base a perfiles conformados en frío con nudos soldados. Análisis de eficiencia.

Trusses based on cold-formed sections with welded nodes. Efficiency analysis.

Presentación: 25/09/2024

Aprobación: 09/12/2024

Publicación: 16/12/2024

Ruffo, Héctor M

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Argentina.

hruffo@frsf.utn.edu.ar

Ferreras, María Emilia

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Argentina

meferreras@frsf.utn.edu.ar

Avendaño, Lucas

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Argentina.

lavendano@frsf.utn.edu.ar

Erck, Pablo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Argentina.

perck@frsf.utn.edu.ar

Resumen

La utilización de vigas reticuladas diseñadas con perfiles conformados en frío de sección C se ha popularizado en el país en construcciones de galpones de pequeña envergadura. En estudios anteriores se ha evaluado, mediante elementos finitos y ensayos de vigas a escala real, el comportamiento de la conexión de barras diagonales soldadas al labio rigidizador del cordón. En este trabajo se evalúa la eficiencia en el uso del material de estos reticulados, en comparación con otros también habituales en base al mismo tipo de perfiles. Se analiza en primera instancia la capacidad teórica de la tipología de celosías en estudio y se

la compara con soluciones de nudos rígidos mediante el uso de chapas de nudo y con vigas de diagonales ángulo soldadas de forma directa al cordón. Finalmente, se analizan nuevos modelos de elementos finitos de vigas teóricas para evaluar la incidencia de la excentricidad geométrica que se presenta en los nudos en el plano de la cercha.

Palabras clave: reticulados, conformado, nudos soldados

Abstract

The use of trusses designed with cold-formed C-section profiles has become popular in the country in small-scale warehouse constructions. In previous studies, the behavior of the connection of diagonal bars welded to the stiffening lip of the chord has been evaluated by means of finite elements and full-scale beam tests. In this work, the efficiency in the use of the material of these trusses is evaluated, compared to other common ones based on the same type of profiles. First, the theoretical capacity of the truss typology under study is analyzed and compared with rigid node solutions using gusset plates and with diagonal angle beams welded directly to the chord. Finally, new finite element models of theoretical beams are analyzed to evaluate the incidence of the geometric eccentricity that occurs in the nodes in the plane of the truss.

Keywords: trusses, cold formed, welded joints.

Introducción

El diseño y uso de vigas reticuladas compuestas por perfiles conformados en frío es muy habitual, resolviéndose con diferentes tipologías de nudos. El presente trabajo pretende analizar la eficiencia en el uso del material de este tipo de vigas con las diagonales soldadas al labio rigidizador del cordón y compararla con soluciones más tradicionales en lo referente a la ejecución de los nudos soldados.

Descripción del sistema constructivo

Las ventajas que presenta el uso de perfiles conformados en frío como componentes de vigas reticuladas, vuelve su uso una alternativa atractiva para vigas de mediano porte. Algunas de las ventajas para destacar se detallan a continuación:

- Son perfiles livianos y de bajo costo.
- Están protegidos frente a la corrosión por un galvanizado en origen.
- Son de alta disponibilidad en el mercado y de variadas dimensiones, espesores y forma, lo que permite adoptar las secciones más adecuadas para las solicitaciones actuantes.
- El mismo proceso de conformado integra, en caso de que se requiera, la ejecución de perforaciones mediante control numérico para generar conexiones abulonadas entre elementos.
- Al ser espesores finos se puede recurrir al uso de uniones atornilladas de tipo auto-roscantes o autoproforantes.

En el mundo se han desarrollado y analizado diferentes soluciones para las conexiones entre barras, con el objetivo de evitar elementos auxiliares en el nudo. Esto permite conformar un reticulado con barras rectas, sin cartelas o chapas nodales. La mayoría de esas soluciones son en base a conexiones atornilladas o abulonadas (Bondok & Salmi., 2017) (Zagórska et al., 2020) (Dizdar, et al., 2019) que generan un desvío de la hipótesis de encuentro de las barras en un nudo ideal, presentándose excentricidades que generan momentos flectores y esfuerzos de corte en las barras.

La solución que se estudia en el Cecovi (Centro de investigación para la construcción y la vivienda, UTN, FRSF), radica en soldar de forma directa las diagonales del reticulado a los cordones mediante soldaduras de filete conectando las alas de los perfiles diagonales con el extremo de los labios rigidizadores de ambos cordones como se observa en la Fig. 1. Es una solución de uso bastante habitual en el mercado.

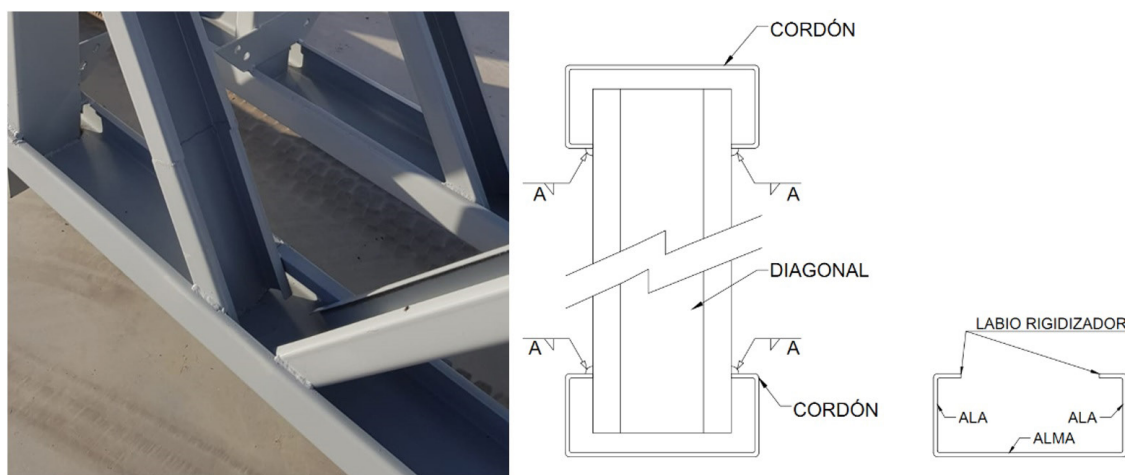


Fig. 1: Detalle de conexión de diagonales a cordón

Con esta solución de nudo, la fabricación se simplifica dado que no se requieren elementos auxiliares de unión, y por ende se logran mejores rendimientos de mano de obra. Además, no es necesario aplicar protección superficial si se utilizan perfiles conformados a partir de acero galvanizado.

Marco teórico

La tipología evaluada tiene origen en la aplicación práctica y, a conocimiento de los autores, no se encuentran antecedentes que expliquen claramente el comportamiento de los nudos con estas características y el impacto que tiene la solución del nudo en la capacidad y rigidez del elemento estructural completo.

Trabajos desarrollados recientemente (Avendaño et al., 2023) utilizan modelos de elementos finitos con el fin de evaluar y comprender el comportamiento de este tipo de nudos. Para la calibración de los modelos se realizaron análisis de nudos aislados mediante elementos finitos considerando la no linealidad material y geométrica. Luego se utilizaron ensayos en escala real, para validar los resultados obtenidos. Entre las conclusiones más relevantes de la investigación mencionada, se destaca la importancia que tiene el papel de la soldadura en la conexión, dado que permite lograr una conexión rígida entre el labio y las diagonales,

haciendo trabajar al labio rigidizador como una placa empotrada en ambos extremos, aumentando así su capacidad de tomar carga. En consecuencia, la dimensión del cateto de soldadura no es una variable despreciable en el análisis.

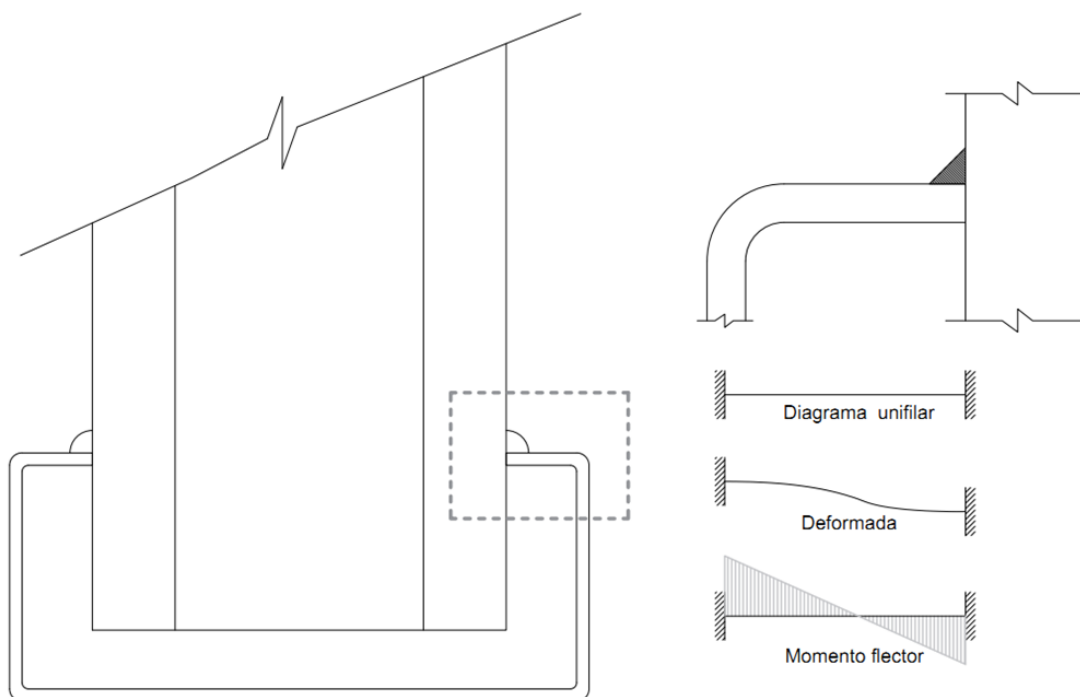


Fig. 2: Deformación del labio rigidizador producto del empotramiento

Los resultados en cuanto a capacidad de los nudos no fueron alentadores dado que la resistencia última de la conexión, debido a la plastificación temprana del labio rigidizador, resulta mucho menor que la capacidad seccional de la diagonal.

Posteriormente, trabajaron en el análisis numérico y experimental sobre vigas de 4.50m de luz, (Avendaño et al., 2024) observándose una capacidad de carga de la viga limitada por la falla de los nudos por plastificación. A modo de introducción y completando el marco teórico actual, se resume en el apartado siguiente, el trabajo referenciado previamente.

Resultados de análisis numéricos y experimentales previos

Para obtener una representación precisa del comportamiento de este tipo de vigas, se analizó un prototipo con geometría similar a las utilizadas en la práctica cotidiana. Este análisis forma parte de una publicación presentada en las 28° Jornada Argentina de Ingeniería Estructural (Avendaño et al., 2024). Las dimensiones del prototipo estudiado se muestran en la Fig. 3.

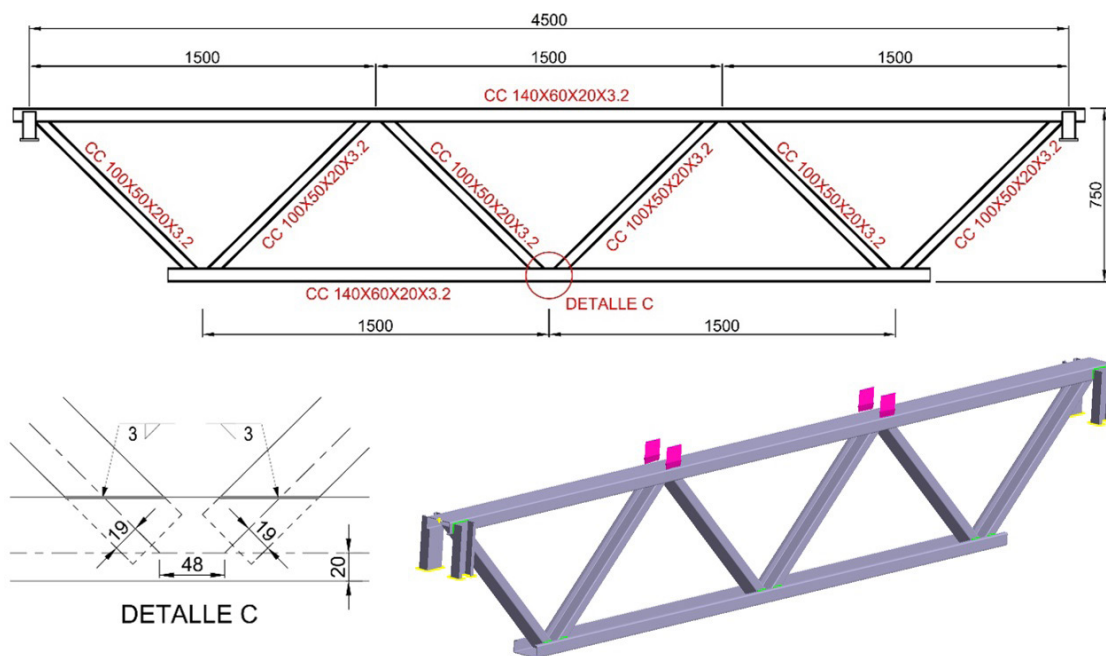


Fig. 3: Geometría de vigas para ensayos y modelos de elementos finitos.

El análisis computacional se llevó a cabo utilizando el software SimSolid de Altair. La geometría de los elementos fue importada mediante un archivo CAD 3D en formato .stp. Posteriormente se generaron las uniones soldadas, los escalones de cargas, las condiciones de contorno y el modelo constitutivo dentro del mismo software. Se definieron los vínculos para el modelo con el objeto de replicar el comportamiento de una viga isostática. Para definir las calidades del acero y de las soldaduras, se empleó un modelo elastoplástico perfecto, con un límite de fluencia caracterizado por la tensión obtenida a partir de ensayos de tracción realizado sobre flejes del mismo material, clasificados como ZAR250 según certificados. De los resultados se obtuvo una tensión de fluencia mínima $F_y = 350$ MPa y una tensión de rotura mínima $F_u = 430$ MPa.

Con el fin de validar los resultados del análisis computacional, se realizó un ensayo a escala real en el laboratorio de grandes estructuras de la UTN FRSF. Conociendo la incidencia de la dimensión de los cordones de soldadura en el comportamiento del nudo y, por ende, en su capacidad, se efectuó un control detallado de la dimensión de estos durante la fabricación. Para obtener valores extrapolables a la realidad, se definió un cordón de 3mm. Sin embargo, debido al material galvanizado, fue casi imposible realizar una soldadura de calidad con las dimensiones previstas. El galvanizado, al quemarse, emite vapores que generan porosidad en el material de aporte fundido, lo que resulta en soldaduras que no superan una inspección visual según los parámetros de aceptación establecidos en el reglamento Cirsoc 304., 2007.

Para mejorar la calidad de la soldadura, se decidió incrementar el tamaño de los cordones, lo que resultó en dimensiones finales dispersas. A pesar de emplear procedimientos estándares (no calificados para material galvanizado) y soldadores calificados, la calidad final de las soldaduras no fue óptima.



Fig. 4: Fotografía de vigas probetas y detalle soldadura de nudos

En la Fig. 5 se resumen los resultados obtenidos mediante los modelos de elementos finitos para soldaduras de 3 y 5 mm de cateto, así como los resultados de los ensayos experimentales realizados sobre las dos probetas.

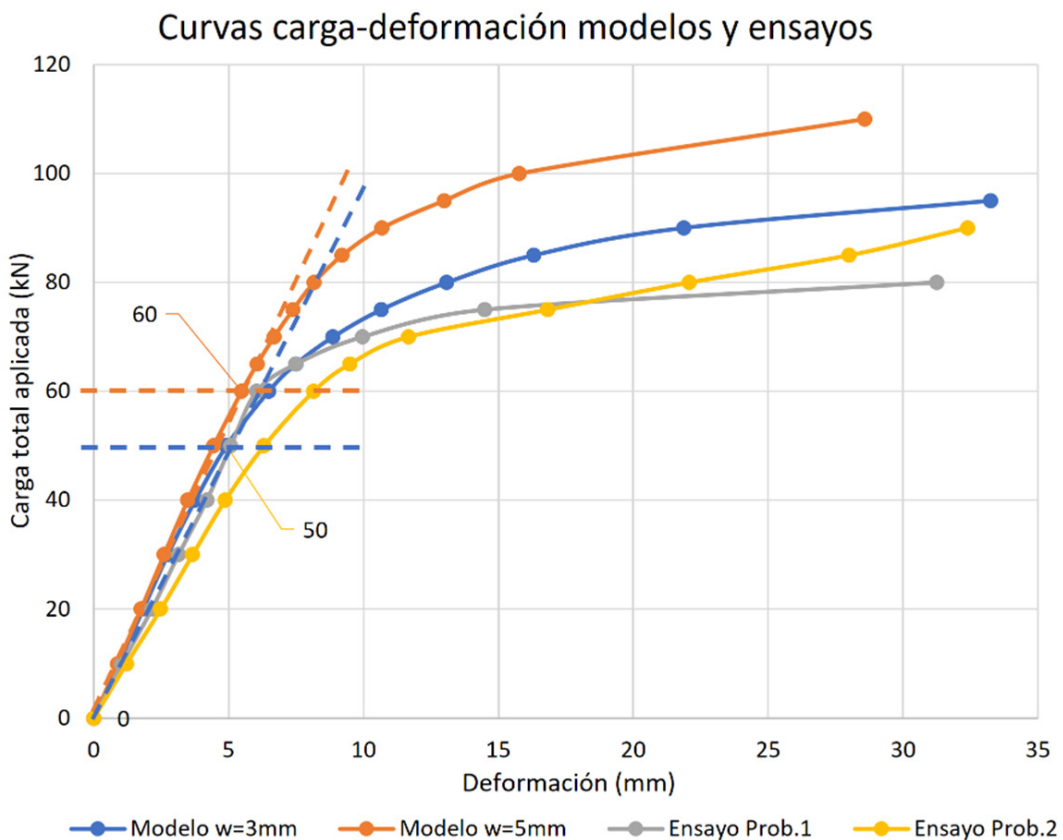


Fig. 5: Resultados ensayos vs modelos. Curvas carga-deformación.

Las dos curvas obtenidas del ensayo se encuentran levemente por debajo de las determinadas mediante los modelos de elementos finitos, mostrando un comportamiento muy similar en términos de capacidad, aunque resultan un poco más flexibles, si se observa la pendiente de la gráfica en la zona elástica. Ambas vigas ensayadas presentaron resultados similares, con un comportamiento lineal hasta valores comprendidos entre 50 kN y 60 kN de carga total. Por lo tanto, se adopta un promedio de 55 kN como carga última para esta configuración de vigas y cargas.

Entre las observaciones realizadas, se destaca que las soldaduras no fallan hasta alcanzar grandes deformaciones y superar la etapa de comportamiento lineal, a pesar de las deficiencias mencionadas en su ejecución. Otro aspecto fundamental es la alta incidencia de las excentricidades en el nudo, esto se observa en las deformaciones y problemas de las soldaduras en el nudo típico (Fig. 6), en comparación con el apoyo superior que no presenta problemas de excentricidad. Además, las soldaduras inician un proceso de falla frágil en los extremos, influenciadas por el trabajo de los cordones a flexión debido a las excentricidades.



Fig. 6: Efecto de las excentricidades de barras y deformación del labio rigidizador.

Se observa una significativa reducción de capacidad en la viga al evaluar detalladamente la conexión de los nudos, la cual está gobernada por la plastificación temprana debido a la alta concentración de esfuerzos de corte y flexión, provocados por las excentricidades entre las barras y la flexión generada localmente por la conexión mediante los labios rigidizadores del cordón.

Entre las conclusiones resumidas se destaca que la capacidad resultante es del orden de un 40 a 50% de la obtenida mediante un modelo que no contemple la conexión a través del labio rigidizador. Esto evidencia una pérdida de eficiencia notable en el aprovechamiento del material.

Por lo tanto, como continuación del trabajo comentado en los párrafos anteriores (Avendaño et al., 2024), se realiza el estudio de otras soluciones que evitan la conexión mediante el labio rigidizador y, en lo posible, eliminen la excentricidad de los nudos, para evitar la baja capacidad a corte del cordón de perfil C. Se considera como hipótesis que, mejorando el detalle de conexión de los nudos, es posible alcanzar el 100% de la capacidad de la viga, la cual estaría gobernada por la capacidad a compresión del cordón.

Desarrollo y resultados

Introducción

De acuerdo con las conclusiones resumidas en el punto anterior, como resultado de los análisis numéricos y ensayos realizados para las celosías con la conexión de diagonales a través del labio rigidizador de los cordones, se observa que no es posible alcanzar la capacidad resistente de los elementos individuales. Como ejemplo, la capacidad a compresión del cordón para la configuración ensayada (Avendaño et al., 2024) es de aproximadamente 140 kN, lo que representa el mismo valor de carga última total. Sin embargo, la carga máxima soportada por la viga según el ensayo es del orden de los 60 kN. Esta limitación está relacionada con la ineficiencia en la transmisión de esfuerzos de las diagonales al cordón y a la excentricidad que se presenta entre ejes de barras respecto del nudo teórico, inevitable por problemas geométricos constructivos.

Utilizando este mismo tipo de cordones con otras soluciones de conexiones soldadas en nudos, es posible transmitir los esfuerzos axiales de las diagonales directamente a las almas del perfil C del cordón y lograr una unión más rígida. Se analizan mediante modelos de elementos finitos dos soluciones, con el objetivo de comparar la eficiencia global respecto de la viga ensayada. La primera mantiene la idea de los componentes de perfiles conformados sección C, pero incorpora chapas de nudos para realizar la conexión de las diagonales a los cordones. La segunda, utiliza una conexión directa de las diagonales con perfiles L al cordón. En ambos casos se mantiene la excentricidad en el nudo considerada en la viga ensayada (Fig. 7).

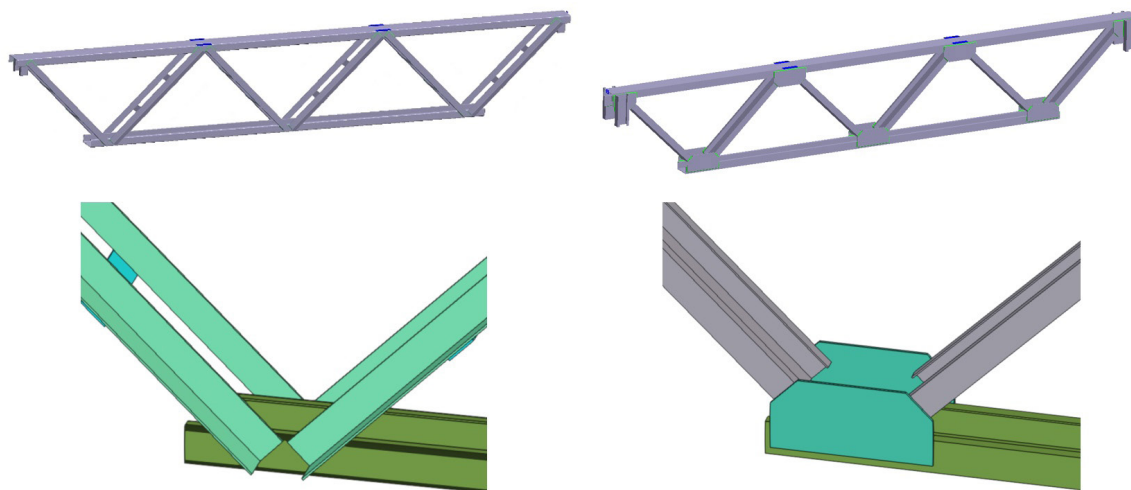


Fig. 7: Detalles de nudos para diagonales con y sin chapa nodal.

Estas dos soluciones alternativas para la conexión son factibles y habituales desde el punto de vista práctico. Mediante el análisis de las mismas se podrá determinar la incidencia que posee la conexión por el labio rigidizador al eliminarla y generar una transferencia de los esfuerzos normales de las diagonales de forma más adecuada a los cordones.

Con el objetivo de analizar la incidencia de la excentricidad global, se modela una tercera solución que mantiene la conexión por medio de los labios rigidizadores pero que elimina

la excentricidad entre ejes de barras en el nudo. Para ello se recurre a un planteo teórico utilizando diagonales de sección rectangular hueca, lo que permite mejorar la alineación de los ejes baricéntricos y de esta forma evitar los desvíos respecto del nudo teórico como se observa en la Fig. 8.

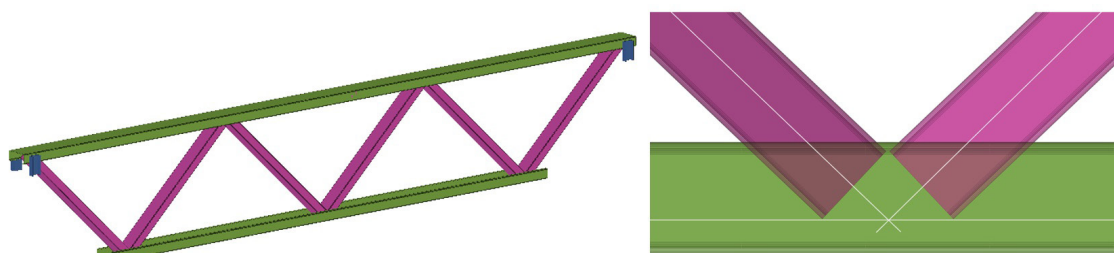


Fig. 8: Solución con diagonales de tubos rectangulares sin excentricidad en nudos.

Solución con perfiles C y chapa de nudo. Capacidad de carga

Además de no utilizar el labio rigidizador como elemento de conexión, el uso de una chapa de nudo para la unión de las diagonales con el cordón, permite plantear una geometría ideal. Es una solución más laboriosa dado que requiere incorporar elementos auxiliares, pero, sin embargo, es posible evitar las excentricidades geométricas que producen momentos y cortes locales en los cordones, mejorando el comportamiento global de la celosía.

Para realizar la comparativa se modela la misma viga ensayada, pero se incorporan dos chapas nodales de 3,2mm de espesor con soldadura en todo el perímetro en contacto con el cordón. Se mantiene la excentricidad original con el objetivo de evaluar principalmente la diferencia de comportamiento con la solución de conexión a través del labio rigidizador del cordón. La sección transversal de las diagonales se modifica llevando la altura del perfil C a 140mm, pero se reduce el espesor para mantener el área de las barras y así su rigidez. De esta forma, se evalúan los mismos escalones de carga que los analizados para la viga ensayada, manteniendo las características del acero utilizado para los anteriores modelos. Se obtienen los resultados mostrados en la curva carga-deformación de la Fig. 9. En la misma se observa un comportamiento lineal y de elevada rigidez.

Solución con perfiles L sin chapa de nudo. Capacidad de carga

Esta solución, también muy aplicada en el medio, evita el uso de chapas nodales, simplificando la fabricación. Tiene la desventaja de que no es sencillo evitar las excentricidades en nudos por cuestiones geométricas, como si es posible con el uso de chapa nodal, y que las diagonales deben ser presilladas para optimizar su capacidad y poder considerarlas como una barra compuesta.

El modelo que se utiliza para comparar el comportamiento es geoméricamente igual al de la viga ensayada, pero en lugar de diagonales de perfiles C100x3,2 se utilizan dos perfiles L 51x3,2 que tienen un área similar ($6,42 \text{ cm}^2$ vs $7,01 \text{ cm}^2$) por lo que no se esperan diferencias importantes en el comportamiento debido al cambio en la rigidez por corte de la celosía. La curva carga deformación resultante se muestra en la Fig. 9. En la misma se observa un comportamiento similar a la solución con chapa nodal, pero con algo menos de rigidez.

Solución con tubulares sin excentricidad en el nudo. Capacidad de carga

Como se mencionó, esta no es una solución práctica habitual, pero su estudio permitirá tener una mejor aproximación a la incidencia que tiene en la capacidad de carga de estas cerchas, la excentricidad del nudo, manteniendo la conexión a través del labio rigidizador. Para anular la excentricidad se disponen como diagonales perfiles tubulares de 100mm x 50mm. El espesor se define en 2.47mm para mantener el área de la sección transversal igual a las diagonales de las vigas ensayadas y no modificar rigideces. El ancho del tubo se define en 50mm para que la longitud de soldadura de la diagonal al labio rigidizador sea la misma que la viga estudiada. La curva carga deformación se presenta en la Fig. 9 en comparativa con la de los modelos de chapa nodal y diagonales L. Se observa un comportamiento muy similar al de la viga ensayada con catetos de soldadura de 5mm.

Análisis de resultados y comparativa

En la siguiente gráfica se comparan las curvas obtenidas para los dos casos planteados con nudos rígidos, el caso con diagonales tubulares sin excentricidad global y los dos casos (soldaduras de 3 y 5mm de cateto) analizados para las vigas conectadas por el labio rigidizador.

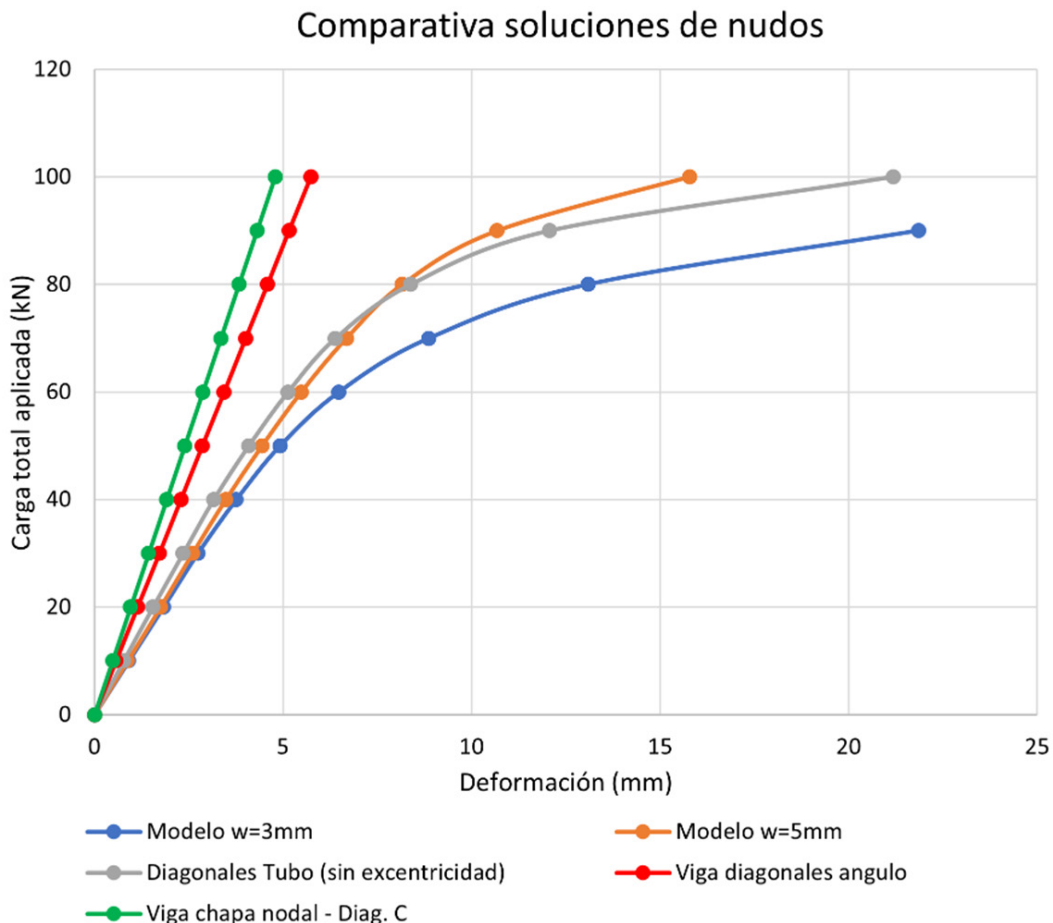


Fig. 9: Comparativa de resultados reticulado nudo rígido vs vigas en estudio

Las soluciones de nudo rígido (sin conexión a través del labio rigidizador) tienen un comportamiento lineal hasta su máxima capacidad de carga que está gobernada por la compresión del cordón en el caso de la viga con chapas nodales, y la interacción de corte y flexión en el caso de la viga con diagonales L.

Las tensiones presentes en el nudo son mucho menores al disponer de la cartela de conexión como se observa en la Fig. 10.

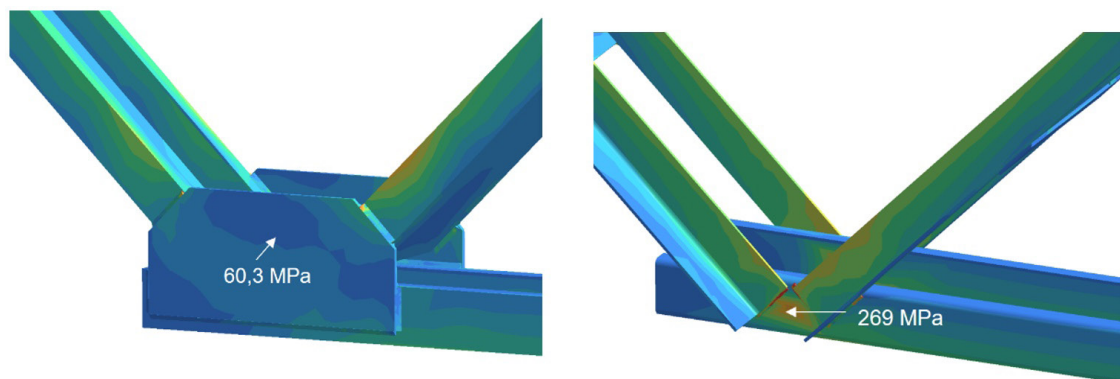


Fig. 10: Tensiones Von Mises con cartela y sin cartela para carga de 90kN

En la Tabla 1 se presenta un análisis de eficiencia en cuanto al uso del material para cada tipo de celosía. La comparativa tiene en cuenta el incremento de la cantidad de acero debido a las chapas nodales y al mayor peso de diagonales L y presillas respectivamente.

| Tipo Viga | Carga Máxima (kN) ¹ | ELU | Peso acero (kg) ² | Eficiencia (1/2) |
|---------------|--------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------|
| Cartela nodal | 143 | Comp. cordón. | 120 | 1,19 |
| Diagonales L | 130 | Corte + flexión cordón | 105 | 1,24 |
| Viga ensayada | 55 | Nudo / Labio Rig. | 100 | 0,55 |

Tabla 1: Análisis de eficiencia de vigas estudiadas.

Para el caso de la viga sin excentricidad con diagonales de sección tubular, se observa una curva carga deformación más tendida que los casos de soluciones con nudos rígidos y muy similares a las curvas originales como puede verse en la Fig. 9. En la Fig. 11 se observa la distribución de tensiones obtenidas en el nudo y la deformada, que muestra que ya no hay deformaciones por la excentricidad en el cordón y que la misma se limita al contexto de los labios rigidizadores.

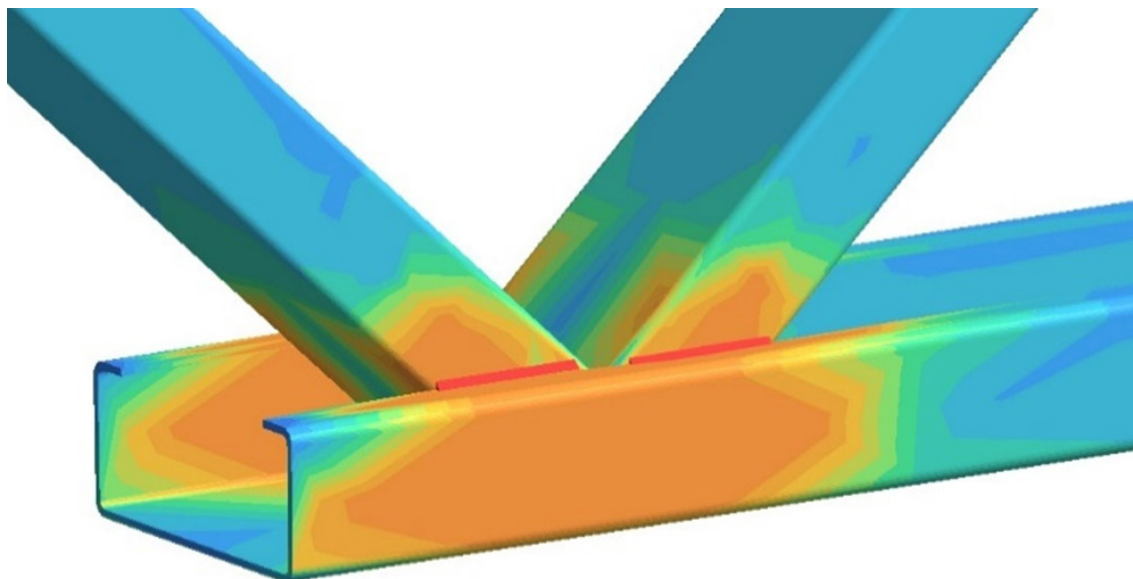


Fig. 11: Tensiones y deformada del nudo solución con tubos sin excentricidad

Conclusiones

La solución de vigas reticuladas con perfiles conformados en frío mediante nudos soldados se ha hecho cada vez más popular en Argentina por facilidad de construcción y disponibilidad del material. La problemática de resolver de forma adecuada los detalles de encuentro y transferencia de esfuerzos entre diagonales y cordones, es una cuestión que no parece muy elaborada en la práctica diaria cuando se utiliza esta tipología de celosías.

De hecho, la solución analizada durante el proyecto de investigación presentado requiere de excentricidades en los nudos y utiliza un sistema de transferencias de esfuerzos de las diagonales al cordón muy poco eficiente en cuanto a resistencia, aunque con una afectación menor en la rigidez del conjunto.

Si bien en trabajos anteriores (Avendaño et al., 2024) se presenta claramente que la capacidad de la viga ensayada no puede alcanzar los valores de resistencia última de diseño posible por los elementos que componen la viga, en este trabajo se demuestra que, adoptando otro tipo de soluciones para la ejecución de los nudos, es posible optimizar el uso del material, aumentando la capacidad de carga de la viga reticulada sin que la conexión en el nudo gobierne el diseño.

Desde el punto de vista de la resistencia, el problema de la excentricidad en el cordón tiene dos tratamientos diferentes. La solución con chapa de nudo tiene la ventaja que permite evitar la excentricidad en el nudo y, además, en caso de que la hubiera (como en el modelo planteado), la sección transversal en la zona de mayor corte está reforzada por las propias cartelas. Sin chapa nodal, la presencia de excentricidad, por proyecto o accidental, obliga al propio cordón a resistir todo el corte localmente entre los nudos de encuentro de las diagonales y el eje del cordón, generando un estado límite

último determinante en el caso de cordones de sección C conformados, por interacción corte-flexión.

En los casos analizados, ambos con excentricidad igual a la de la viga ensayada se observa, para la misma carga total aplicada, como los valores de tensiones en el nudo con cartela son muy inferiores a los presentes en la solución con diagonales L (Fig. 10), al tener mayor área y módulo resistente a flexión. Además, al aumentar la inercia de la sección en esta zona, la viga es levemente más rígida tal como se puede apreciar por la diferencia de pendiente entre las dos curvas en la Fig. 9.

En base a esta comparativa se concluye que se puede desarrollar la capacidad máxima de la viga analizada, si se utilizan chapas de nudo, siendo la limitante en este caso la capacidad a compresión del cordón superior (Carga máxima 143 kN).

En el caso de la viga con diagonales L sin cartela nodal, la resistencia máxima estará gobernada por la capacidad a cortante del cordón debido a la presencia de la excentricidad (Carga máxima aproximada 130 kN). En el otro extremo, la viga ensayada (Avendaño et al., 2024) está condicionada por la capacidad de transferencia de cargas de las diagonales a través del labio rigidizador del cordón, siendo la misma de aproximadamente 55 kN.

La solución de viga ensayada tiene una eficiencia (capacidad de carga / peso de acero) del 46% respecto de la solución con chapa de nudo y del 44% respecto de la solución con perfiles L. Desde un punto de vista práctico, esto implica que puede usarse aproximadamente la mitad de acero con una viga con chapa nodal o con diagonales L, respecto de la solución ensayada con diagonales soldadas al labio rigidizador del cordón.

El análisis de la viga con diagonales de sección tubular y sin excentricidades, permite concluir que el principal problema de la conexión analizada es la transferencia de esfuerzos a través del labio rigidizador y en segundo lugar la excentricidad que se genera debido a necesidades constructivas con una incidencia mucho menor. Al eliminar la excentricidad la capacidad última de la viga se ubica en aproximadamente 70 kN utilizando el criterio de pérdida de linealidad en la curva carga – deformación. Esto es un incremento importante respecto de los 55 kN de capacidad que se obtienen con la excentricidad del nudo. Sin embargo, mejorando la conexión con una transferencia más directa como es el caso de las diagonales L soldadas a las alas del cordón C, la capacidad se logra aumentar hasta 130 kN, sin eliminar la excentricidad global. Por lo tanto, se logra un incremento mucho mayor resolviendo la transferencia de esfuerzos sin utilizar el labio rigidizador que eliminando la excentricidad del nudo. Esto da cuenta de la alta importancia relativa de resolver el nudo de forma que la transferencia de esfuerzos se directa y clara.

Se concluye que, partiendo de la capacidad que se puede lograr de una viga con las mismas secciones generando una adecuada transferencia de esfuerzos en los nudos, si se resuelve la unión con la conexión a través del labio rigidizador, dicha capacidad se reduce aproximadamente un 46% aunque se logre realizar la conexión sin excentricidades en el plano de la celosía. Si además se incorporan excentricidades, que son necesarias por cuestiones constructivas, la pérdida de capacidad alcanza un 58% aproximadamente, respecto de la una viga ideal. Esta comparativa se presenta en la Tabla 2 de forma resumida.

| Tipo Viga | Carga Máxima (kN) ¹ | ELU | % capacidad |
|--------------------------------------|--------------------------------|--|-------------|
| Diagonales L | 130 | Comp. cordón. | 100 |
| Conexión por labio sin excentricidad | 70 | Plastificación por flexión en nudo | 54 |
| Conexión por labio con excentricidad | 55 | Plastificación flexión + corte en nudo | 42 |

Tabla 2: Comparativa de capacidad de carga.

Es importante destacar que si bien en el trabajo no se presenta un análisis de costos que combine el uso del material con el costo de mano de obra insumido en cada solución, una diferencia en el uso de material del 50% es un valor muy elevado que implica otros costos indirectos muy relevantes, relacionados principalmente con la sustentabilidad del medio ambiente. Mayor consumo de material implica un incremento notable en la huella de carbono que se genera para llevar adelante el mismo proyecto.

Las soluciones tradicionales evaluadas resultan más eficientes en el aprovechamiento de material, permitiendo un incremento de la capacidad de carga de casi el 100% respecto de la viga con nudos soldados a través de los labios rigidizadores de los cordones.

Colaboradores: Gelfuso, Julian (Cecovi); Sosa, Maira (Cecovi); Ing. Raúl Puga (Cecovi)

Agradecimientos

A Cinter SRL por la donación de las vigas y probetas de nudos para los ensayos.

Referencias bibliográficas

Altair. (s.f.). *Structural analysis for rapid design iterations*. Altair Simsolid. <https://altair.com/simsolid>

Avendaño L., Erck P., & Ruffo H. (2024). *Capacidad de carga de vigas reticuladas en base a perfiles conformados en frío con nudos soldados. Análisis numérico y experimental*. 28° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, Asociación de Ingenieros Estructurales.

Avendaño L., Erck P., & Ruffo H. (2023). Nudos soldados en vigas reticuladas con perfiles conformados en frío. Análisis y comportamiento. *Revista IE*. Nº67, 28, 166715111.

Bondok D. H., & Salmi, H. A. (2017). Failure capacities of cold-formed steel roof trusses end-connections. *Thin-Walled Structures*, 121, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.026>

CIRSOC 304 (2007) *Reglamento argentino para la soldadura de estructuras de acero*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

Dizdar, C., Baran, E., & Topkaya, C. (2019). Strength and stiffness of floor trusses fabricated from cold-formed steel lipped channels. *Engineering Structures*, 181, 437–457. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.041>

Zagórowska, M. G., Elzbieta, U. G., & Deniziak, P. (2020). Experimental investigation of joint with positive eccentricity in CFS truss. *Thin-Walled Structures*, 157, 106998. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106998>

Contribución de los Autores

| Nombres y Apellidos del autor | Colaboración Académica | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Héctor M. Ruffo | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | x |
| María Emilia Ferreras | | | x | x | x | x | | x | | x | | x | x | |
| Lucas Avendaño | | | x | x | x | x | | x | x | x | x | | | |
| Pablo Erck | | | x | x | x | x | | x | x | x | x | | | |

1-Administración del proyecto, 2-Adquisición de fondos, 3-Análisis formal, 4-Conceptualización, 5-Curaduría de datos, 6-Escritura - revisión y edición, 7-Investigación, 8-Metodología, 9-Recursos, 10-Redacción - borrador original, 11-Software, 12-Supervisión, 13-Validación, 14-Visualización.