

CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS RETICULADAS EN BASE A PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO CON NUDOS SOLDADOS. ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL.

Ruffo, Héctor M; Ing. Civil; Cecovi UTN-FRSF (hruffo@frsf.utn.edu.ar)
Avendaño, Lucas; Ing. Civil; Cecovi UTN-FRSF (lavendano@frsf.utn.edu.ar)
Erck, Pablo; Ing. Civil; Cecovi UTN-FRSF (perck@frsf.utn.edu.ar)

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación llevado adelante en el CECOVI dentro de la Facultad Regional Santa Fe, de la Universidad Tecnológica Nacional.

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. El presente trabajo pretende analizar en detalle la conexión entre barras, en los casos en que las diagonales se sueldan al labio rigidizador del cordón conformando una solución compleja de evaluar por medios tradicionales de análisis. A su vez, la solución no utiliza medios auxiliares de conexión como chapas de nudo, generando excentricidades en el encuentro entre las barras. El estudio se realiza mediante métodos numéricos con análisis no lineales y se comparan los resultados con ensayos de nudos y vigas en escala real en el laboratorio de grandes estructuras.

ABSTRACT

This work is part of a research project carried out at CECOVI within the Santa Fe Regional Faculty of the National Technological University.

The use of truss beams designed with cold-formed C-section profiles has become popular in the country in small scale warehouse constructions. This work aims to analyze in detail the connection between bars, in cases where the diagonals are welded to the stiffening lip of the chord, forming a complex solution to evaluate by traditional means of analysis. At the same time, the solution does not use auxiliary connection means such as gussets plates, generating eccentricities at the meeting between the bars. The study is carried out using numerical methods with non-linear analysis and the results are compared with tests of full-scale nodes and beams in the laboratory of large structures.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación llevado adelante en el CECOVI dentro de la Facultad Regional Santa Fe, de la Universidad Tecnológica Nacional.

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. El presente trabajo pretende analizar el comportamiento general de este tipo de vigas (resistencia y rigidez), en los casos en que las diagonales se sueldan al labio rigidizador del cordón conformando una solución compleja de evaluar por medios tradicionales de análisis. A su vez, la solución no utiliza medios auxiliares de conexión como chapas de nudo, generando excentricidades en el encuentro entre las barras.

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 autorroscantes o autopercutoras.

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 elementos auxiliares como cartelas o chapas de nudo. La mayoría de esas soluciones son en base a conexiones atornilladas o abulonadas [1][2][3] que derivan en un desvío de la hipótesis de encuentro de las barras en un nudo ideal, apareciendo excentricidades que generan momentos flectores y esfuerzos de corte en las barras.

La solución que se estudia en el marco del proyecto de investigación mencionado 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 los cordones como se observa en la siguiente figura. Es una solución de uso bastante habitual en el mercado.

Organiza:

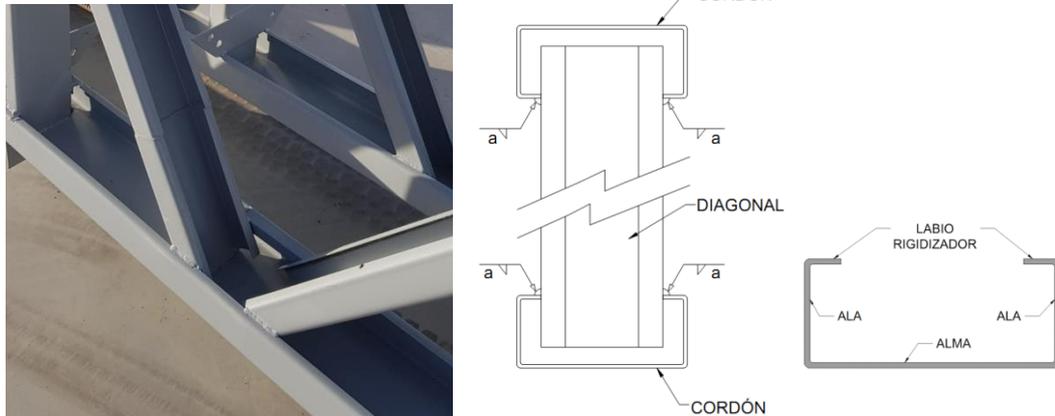


Figura 1. Detalle de conexión de diagonales a cordón

Esta forma de conexión facilita la fabricación, no requiere elementos auxiliares de unión, se logran altos rendimientos de mano de obra y no es necesario aplicar protección superficial si se utilizan perfiles con material galvanizado.

Marco teórico

La tipología evaluada tiene origen en la aplicación práctica, y 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.

Para lograr el encuentro de las barras en los nudos teóricos como intersecciones de sus ejes baricéntricos, normalmente se debe recurrir al uso de elementos auxiliares de conexión, como son chapas o cartelas de nudo. Esto hace más complejo el proceso de fabricación. La solución que se evalúa en este trabajo es más simple de fabricar y no requiere de inversiones importantes para su ejecución.

El análisis se basa en el uso de modelos de elementos finitos para evaluar y comprender el comportamiento de este tipo de nudos. Para la calibración de los modelos se realizó un análisis de nudos aislados mediante elementos finitos y ensayos en escala real, cuyos resultados fueron presentados en [5] y se resumen brevemente en el apartado siguiente. Posteriormente se presentará el análisis mediante modelos de elementos finitos de vigas completas y la comparativa con los ensayos de las mismas. Los ensayos de carga a escala real se realizaron en el laboratorio de estructuras de la UTN – FRSF (Cecovi).

Resumen de resultados de la primera etapa del proyecto

Para comprender el comportamiento de este tipo de conexiones entre diagonales y cordones mediante la soldadura por el labio rigidizador del cordón, se trabajó en el modelado de elementos finitos con no linealidad material y geométrica de casos de nudos que pudieran ensayarse de forma aislada, y de esta forma comparar los resultados con los obtenidos de los modelos. Dentro de las variables de análisis se

Organiza:

incorpora el cateto de soldadura.

Mediante este procedimiento se logra calibrar el modelo de manera adecuada en base a los resultados de los ensayos de probetas en forma de T como se muestran en la figura siguiente

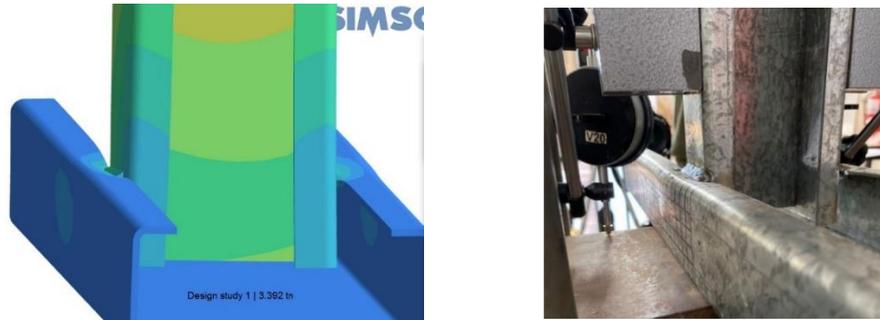


Figura 2. Comparativa de deformación del labio entre modelo y ensayo

Entre las conclusiones más relevantes de la primera etapa se destaca la importancia que tiene el papel de la soldadura en la conexión, dado que permite lograr un empotramiento, haciendo trabajar al labio rigidizador como una placa empotrada en ambos extremos, aumentando así su capacidad de tomar carga. Por lo tanto, la dimensión del cateto de soldadura no es una variable despreciable en el análisis.

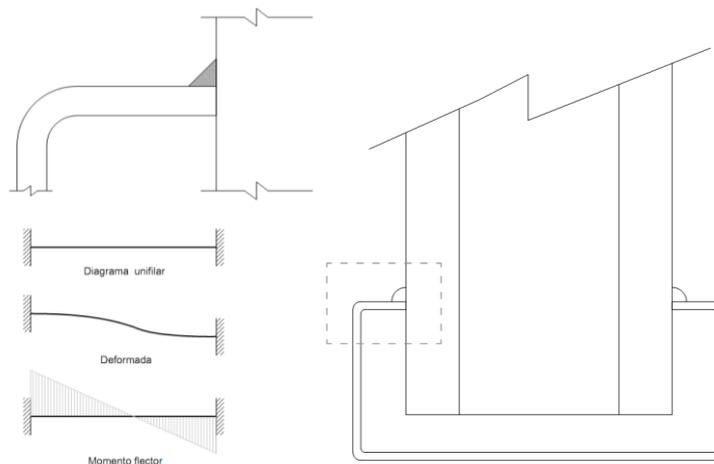


Figura 3. Deformación del labio rigidizador producto del empotramiento

A pesar de lo anterior, los resultados en cuanto a capacidad de los nudos no fueron alentadores dado que la capacidad última de la conexión debido a la plastificación temprana del labio rigidizador, resulta mucho menor que la capacidad seccional del montante o diagonal.

A partir de estos análisis y resultados observados, se procede con el modelado de vigas completas y la comparativa de resultados con ensayos de las mismas en escala real, cuyos primeros resultados son los que se presentan en este trabajo.

Organiza:

DEFINICIÓN DE VIGAS PARA EL ANÁLISIS

El laboratorio de ensayos de la FRSF, cuenta con un pórtico de carga de 50tn de capacidad y una losa reactiva con múltiples posibilidades de configuración de ensayos. Por lo tanto, la capacidad disponible no genera una limitación dado que se requieren cargas relativamente bajas.

Considerando que las acciones en el nudo están relacionadas con los esfuerzos normales en las diagonales, no se considera necesario ensayar una viga de luces importantes. Se opta por lo tanto por plantear una viga de 4,50m de luz, con cargas puntuales aplicadas a los tercios de la luz y con una geometría similar a las utilizadas en la práctica cotidiana (Figura 4)

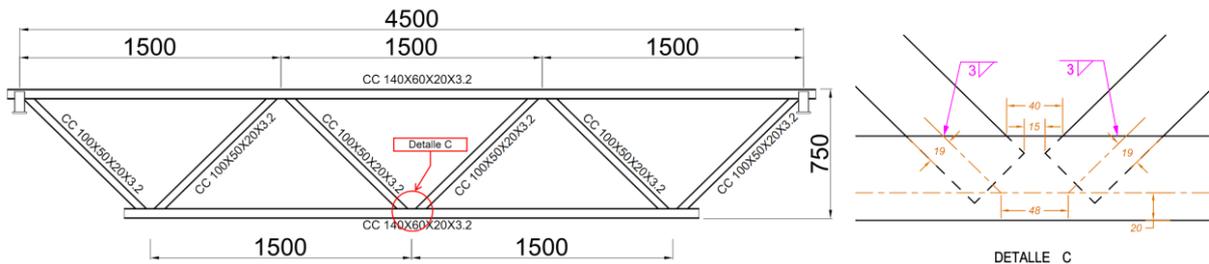


Figura 4. Geometría de vigas para ensayos y modelos de elementos finitos.

En base a secciones de disponibilidad habitual en el mercado se utilizan secciones C140x60x3,2 para los cordones y secciones C100x50x3,2 para las diagonales. El espesor de 3,2mm se selecciona para evitar problemas de estados límites relacionados con el pandeo local.

Las esbelteces entre nudos de los cordones son valores razonables y fuera del plano se decide contener lateralmente el cordón superior al centro de la luz para que no gobierne como estado límite del cordón.

MODELADO EN ELEMENTOS FINITOS

El estudio analítico de la viga, se realizó el programa de elementos finitos SIMSOLID. Los resultados obtenidos en comparativa con los ensayos iniciales demostraron ser efectivos. El análisis se realizó con la versión 2022.3.1 de Altair SimSolid [4]

Descripción de los modelos.

Se modela la viga detallada previamente (Figura 4). Los elementos que conforman la geometría fueron importados mediante un archivo CAD 3D tipo .stp y luego se generaron las uniones soldadas, los escalones de cargas, las condiciones de contorno y el modelo constitutivo a analizar desde el mismo programa.

Para garantizar compatibilidad de resultados entre el ensayo y los modelos, se ensayaron cuatro probetas a tracción del material usado para la fabricación de las vigas, definido como ZAR250 según certificados, y se determinaron los valores

Organiza:

específicos, obteniéndose una tensión de fluencia mínima $F_y=350$ MPa y de rotura mínima $F_u=430$ MPa. Valores utilizados para definir los materiales dentro del modelo. Se menciona como aspecto relevante la importante diferencia entre los valores mínimos normativos y los obtenidos por ensayo (F_y 40% mayor). Para el módulo de elasticidad se utiliza $E=210$ GPa y coeficiente de Poisson $\mu=0,30$.

Para el caso de las conexiones de los elementos, se realizaron dos modelos, correspondientes a soldaduras de 3mm y 5mm de cateto. Se considera para el material de aporte una tensión de rotura $F_E=480$ MPa.

Los vínculos para el modelo se definieron con el fin de lograr un comportamiento similar una viga isostática. Para el modelo constitutivo del acero y soldadura, se utilizó un modelo elastoplástico perfecto con límite de fluencia caracterizado por la tensión obtenida en el ensayo a tracción de los flejes.

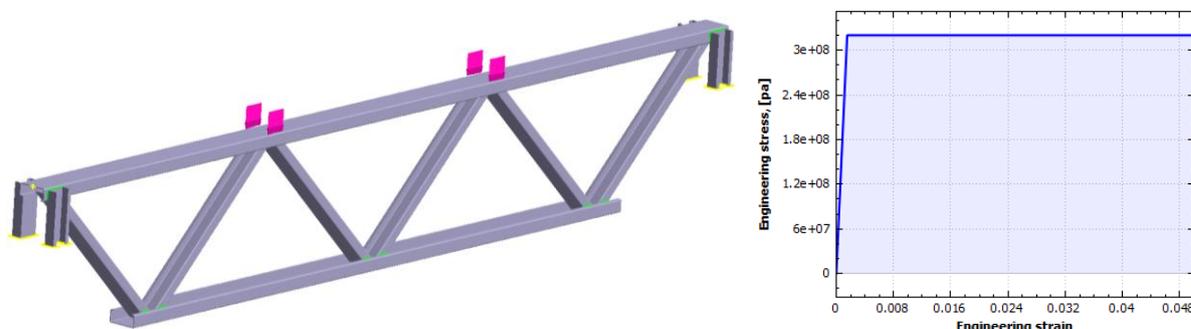


Figura 5. Modelo de viga en SimSolid y curva bilineal tensión-deformación acero.

Las cargas se introducen por unidad de superficie siguiendo el esquema previsto para el ensayo, considerando como punto de contacto los laterales del perfil C. Posteriormente, se generó un análisis por cada escalón de carga a evaluar, de 10kN a 100kN. Dichas cargas definidas se distribuyen de forma equitativa en las zonas de contacto.

Resultados de los modelos

Se realizaron los cálculos correspondientes a cada modelo (Soldaduras de 3mm y 5mm) y a cada escalón de carga (De 10kN a 100kN), obteniendo los resultados correspondientes y realizando el análisis de la curva carga-deformación considerando los desplazamientos verticales en el punto medio de la luz, en el centro del perfil.

La viga posee un comportamiento elástico general hasta alcanzar el escalón de carga de 60kN en el modelo de soldaduras 5mm y 50kN en el modelo de soldaduras de 3mm. Se percibe en el modelo, que las soldaduras son las primeras en plastificar, extendiéndose poco a poco hacia el perfil.

Organiza:

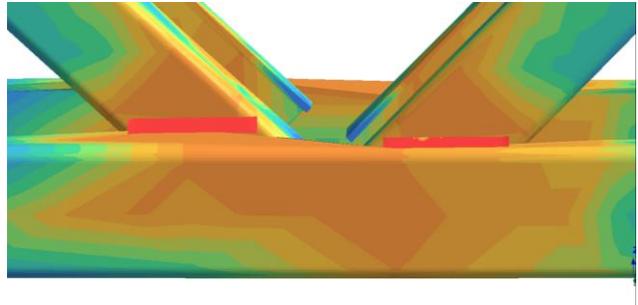
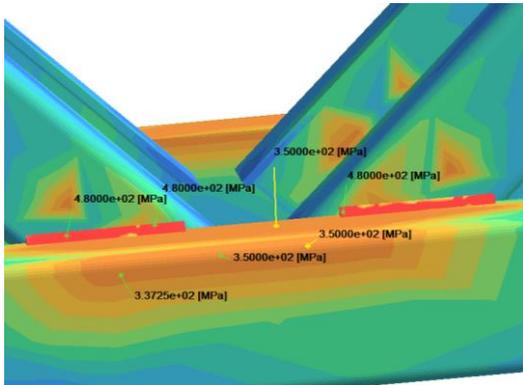


Figura 6. Tensiones en nudos (izq.). Deformada de nudo para 90 kN (der.)

Los nudos extremos inferiores reciben las mayores solicitaciones. Al poseer un nudo donde concurre una barra traccionada y otra comprimida, se genera un alabeo en el labio del perfil C. (Figura 6, multiplicación de escala x2).

La curva carga deformación obtenida para ambos modelos son las siguientes. En la misma figura se determinan los límites del comportamiento elástico como límite de carga último de la viga.

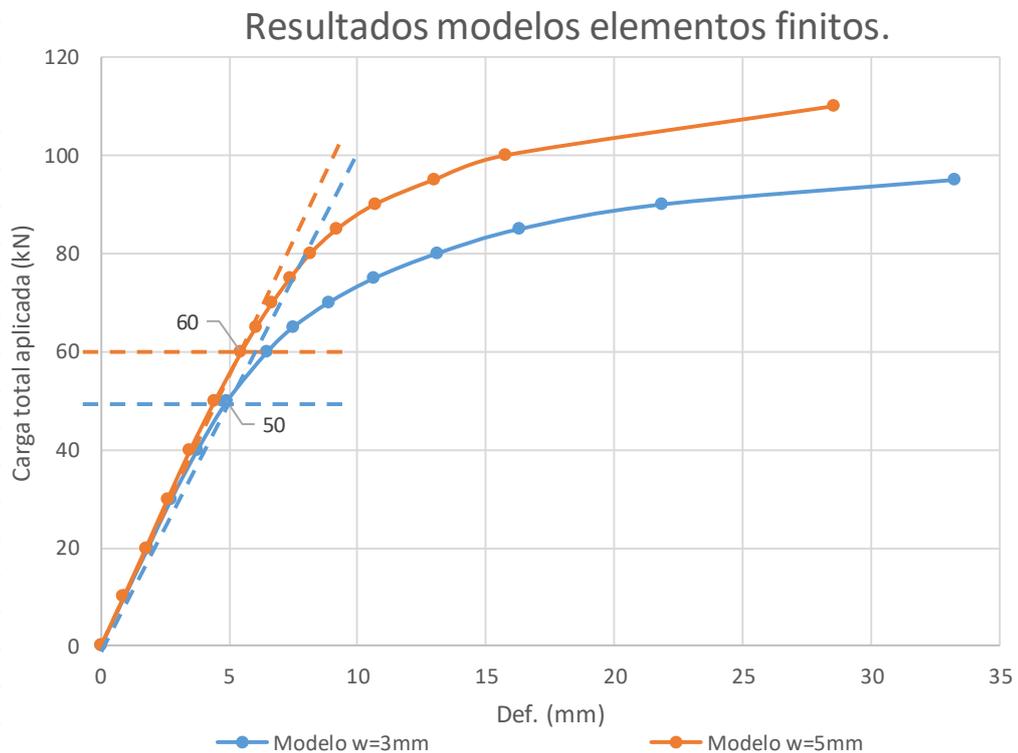


Figura 7. Curva carga-deformación modelos SimSolid.

Organiza:

ENSAYO DE VIGAS Y COMPARATIVA CON RESULTADOS DE MODELOS

Análisis ELU.

Para la evaluación de los diferentes estados límites de las barras y asegurar que el colapso no se produce antes de alcanzar los valores de capacidad de carga obtenidos mediante el modelado de elementos finitos por la plastificación y excesiva deformación del nudo, se realiza un modelo de elementos finitos de barras con el que se obtienen las solicitaciones y se realizan las verificaciones normativas correspondientes. Se realizan varios modelos con diferentes hipótesis de nudos para hacer un análisis de sensibilidad sobre los resultados dado que ninguno refleja fielmente la realidad fabricada. Los modelos contemplan las excentricidades en los nudos y se plantean modelos con la conexión de diagonales a cordón articuladas y empotradas, teniendo presente que ninguno de las dos hipótesis son las reales.

Para el caso ideal de excentricidades nulas entre barras, el estado que limita la capacidad de carga resulta ser el pandeo en el plano del cordón comprimido. La carga total máxima que soporta para el material ensayado es 143 kN, valor que resulta aproximadamente 3 veces superior a la carga límite determinada mediante el modelo de SimSolid por plastificación de los nudos.

Considerando las excentricidades en el cordón tal y como están planteadas en el modelo de SimSolid y en las probetas de ensayo (Figura 4, detalle C), la capacidad de carga total de la viga se reduce a 90 kN debido al estado límite último de interacción de corte y flexión en el primer nudo del cordón inferior. Esto implica una reducción respecto de la capacidad teórica del modelo sin excentricidades del 37%. Sin embargo, el valor resultante sigue siendo superior al esperado por plastificación de estos mismos nudos debido al tipo de conexión adoptado que se determinó en base a los modelos entre 50 y 60 kN según sea el cateto de soldadura realizado. Por lo tanto, la capacidad debido a dicho ELU es aún entre un 50 y un 80% superior al esperado en el ensayo debido a la plastificación del nudo y desarrollo de grandes deformaciones plásticas de la viga.

Cateto Soldadura (mm)	ELU plastificación (SimSolid) (kN)	ELU cordón (Q+M nudo) (kN)
3	50	90
5	60	90

Tabla 1 – ELU esperados por plastificación de nudos vs. ELU barras

Se destaca que la presencia de cualquier excentricidad en los nudos, para soluciones sin chapas nodales, el cortante que se produce puede condicionar de forma importante la resistencia del reticulado con este tipo de cordones que tiene poca sección resistente a corte.

En la figura siguiente se pueden observar las solicitaciones de momento flector y corte en el cordón debido a estas excentricidades. La imagen de la izquierda corresponde a un modelo teórico de diagonales articuladas en la conexión al cordón y la de la derecha para el caso extremo de considerar un empotramiento entre diagonales y

Organiza:

cordón. Si bien ninguna de las situaciones es la real, como es de esperarse el valor resultante del corte en el cordón es prácticamente el mismo (V3).

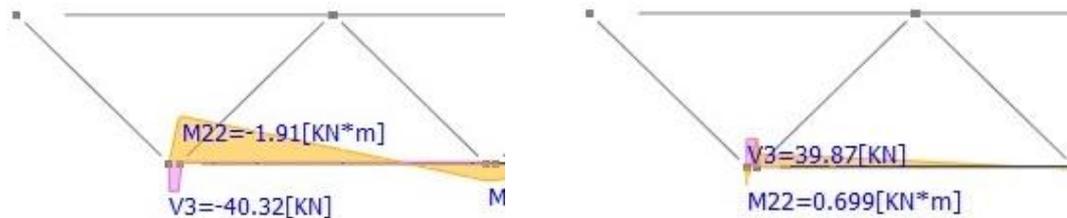


Figura 8. Esfuerzos de flexión y corte en nudo con excentricidad.

Procedimiento de ensayo y equipamiento

En la figura siguiente se muestra como se ha definido la disposición de la viga y aplicación de las cargas mediante el uso del pórtico de carga antes descrito, en el laboratorio de grandes estructuras.

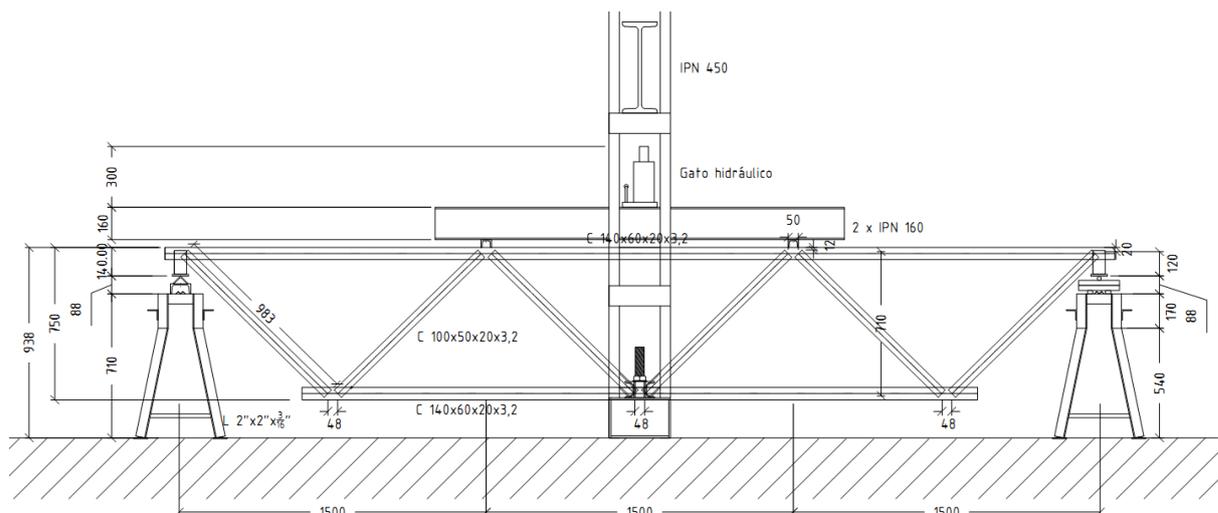


Figura 9. Planteo y disposición de elementos para ensayos

Mediante la reacción del gato hidráulico sobre los dos perfiles IPN160 se aplican las cargas puntuales en los nudos. El apoyo de la viga sobre los caballetes se realiza por contacto directo en un extremo y sobre rodillo en el otro para permitir el desplazamiento horizontal. En ambos casos la superficie de contacto es una línea para permitir el giro.

El ensayo se plantea mediante una serie de escalones de carga predefinidos en función de los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos. Para cada escalón de carga se toma la medida de deformación de la viga en el nudo inferior central mediante 2 comparadores centesimales marca Mitutoyo. Además, se realiza una medición adicional mediante nivel óptico, sobre una regla dispuesta en el centro del cordón superior.

Organiza:

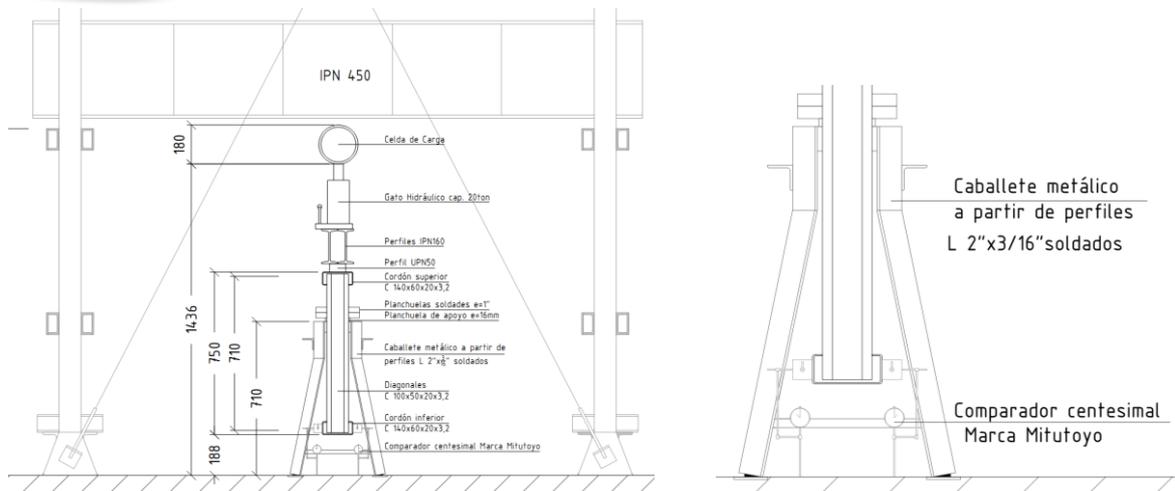


Figura 10. Sección transversal ensayo. Ubicación dispositivos de medición.

Fabricación de vigas, relevamiento de probetas. Inspección de soldaduras

Conociendo la incidencia de la dimensión de los catetos de soldadura en el comportamiento del nudo y, por ende, en su capacidad, se realiza durante la fabricación, un control detallado de la dimensión de estos. Con el objetivo de obtener valores extrapolables a la realidad, se define un cateto de 3mm. Debido al material galvanizado resultó casi imposible realizar una buena soldadura con la dimensión prevista. El galvanizado al quemarse emite vapores que generan porosidad en el material de aporte fundido y en general, son soldaduras que no superan una inspección visual con los parámetros de aceptación que define el reglamento [6].

Se opta por incrementar los catetos para obtener una mejor soldadura, obteniendo resultados muy dispersos en las dimensiones finales. Pese a realizarse con procedimientos estándares (no calificados para material galvanizado) y con soldadores calificados, el resultado en cuanto a calidad final no es bueno.

En función de lo anterior se realiza un relevamiento detallado de cada nudo, midiendo en 3 secciones por cada cordón. El promedio ponderado resultante para la dimensión de los catetos es de 4,2mm para la probeta 1 y 4,4mm para la probeta 2. Si bien estas

medidas no necesariamente reflejan el comportamiento esperado por la dispersión de las dimensiones tomadas, brinda una idea aproximada para comparar con los modelos de elementos finitos realizados con catetos de 3 y 5mm.



Figura 11. Fotografía de vigas probetas y detalle soldadura de nudos

Resultados de ensayos y comparativa con resultados de modelos

A continuación, se presentan los resultados del ensayo promediando las mediciones realizadas para cada una de las dos probetas. En la misma gráfica se presentan los resultados obtenidos de los modelos realizados en elementos finitos para soldaduras de 3 y 5mm de cateto.

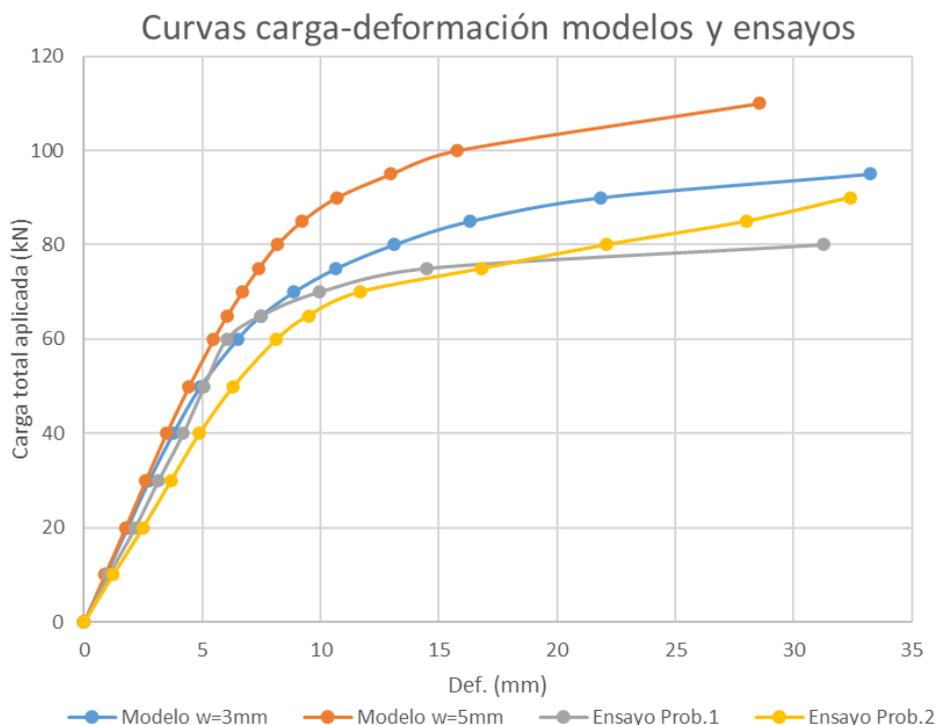


Figura 12. Resultados ensayos vs modelos.

Organiza:

Para ambas vigas se observan resultados similares, con un comportamiento lineal hasta aproximadamente los 50kN de carga total. Una particularidad observada en el caso de la viga 2, es como comienza a tomar carga nuevamente a partir de una deformación superior a los 20mm y claramente en estado de plastificación. Esto se debe a que la diagonal toma contacto con el alma del cordón y genera un leve incremento en la capacidad de tomar momento, mejorando la capacidad de carga. Claramente es un estado de colapso total y no se puede considerar como un criterio de diseño.

Entre las observaciones realizadas se destaca que la soldadura no falla hasta obtenidas grandes deformaciones y superada la etapa de comportamiento lineal, pese a las deficiencias mencionadas en la ejecución de las mismas. Otro de los aspectos fundamentales es la alta incidencia que tienen las excentricidades en el nudo. Esto se observa como comparativa entre las deformaciones y problemas con las soldaduras que tiene el nudo 1 inferior y el estado del nudo 1 superior que no tiene problemas de excentricidad. Por otro lado, las soldaduras fallan primero en los extremos, claramente influenciadas por un trabajo de los cordones a flexión debido a las excentricidades mencionadas.



Figura 13. Efecto de las excentricidades de barras en nudos.

Las dos curvas obtenidas del ensayo están levemente por debajo de las determinadas mediante los modelos de elementos finitos, pero con un comportamiento muy similar en cuanto a capacidad, aunque resultan algo más flexibles si se observa la pendiente de la gráfica en la zona elástica. Tal como se hizo con las curvas de los modelos, se procede a determinar la capacidad de carga en base al criterio de pérdida de linealidad de la curva, dado que como se constata en el ensayo, ya se presentan deformaciones permanentes en ese momento.

Organiza:

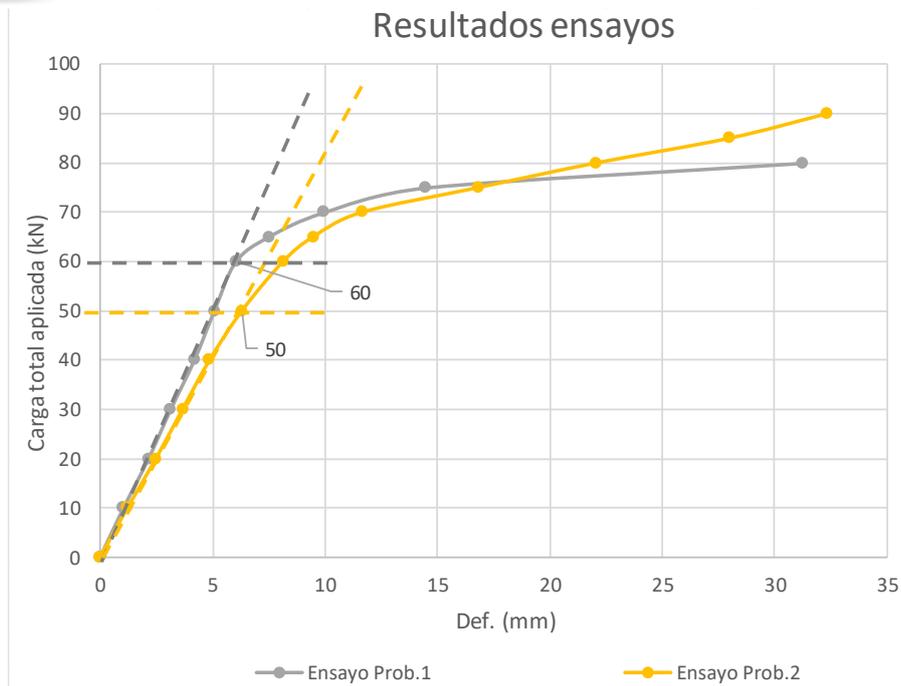


Figura 14. Evaluación capacidad de carga curvas carga deformación ensayos.

En función de lo analizado en la *Figura 14. Evaluación capacidad de carga curvas carga deformación ensayos*. Figura 14, se adopta el promedio resultante de 55 kN como carga última para esta configuración de vigas y cargas.

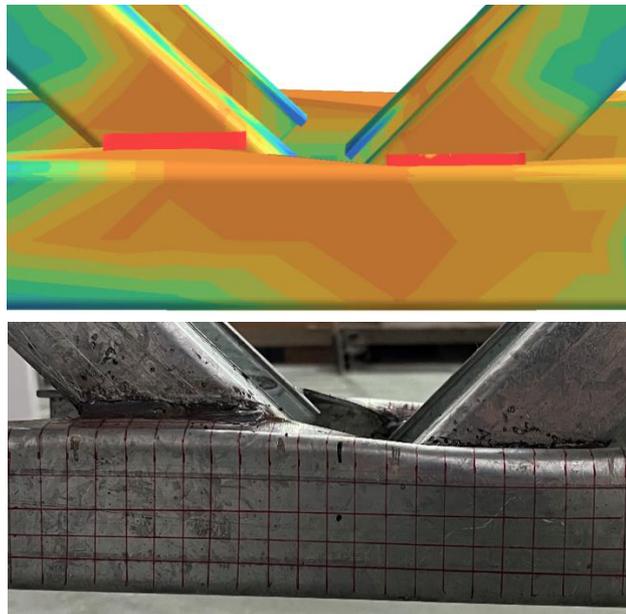


Figura 15. Comparativa deformada nudo modelo vs ensayo.

Organiza:

INCIDENCIA DEL ESPESOR DEL CORDÓN EN CAPACIDAD DE CARGA

Hasta aquí el análisis realizado se basa en cordones con perfiles C de 3,2mm de espesor, con el objetivo de evitar que otros estados límites gobiernen el diseño (pandeo local, corte y flexión por excentricidades, etc.). Independientemente de lo anterior, en este apartado se presenta la comparativa de resultados entre modelos con cordones de 2; 2,5 y 3,2mm de espesor. La comparativa se realiza sin analizar otros estados límites y se centra exclusivamente en el comportamiento del nudo al reducir el espesor de la sección. Las diagonales se mantienen con misma sección y espesor. A continuación se muestran las curvas obtenidas para catetos de 3mm.

Capacidad espesores de cordones. $w=3\text{mm}$

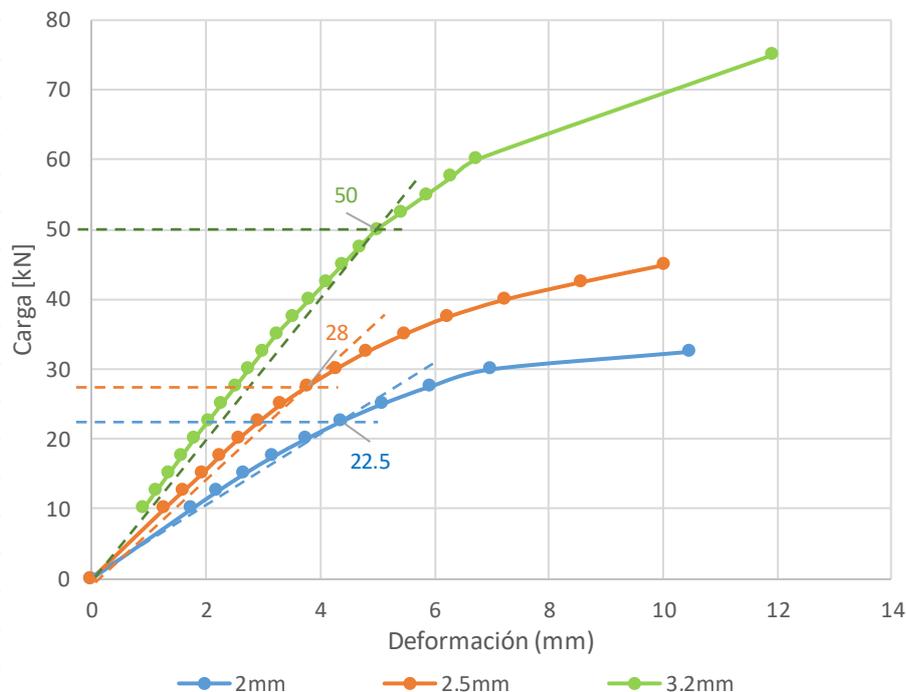


Figura 16. Curvas carga-deformación con cordones de diferentes espesores.

En una celosía ideal, la merma de resistencia al reducir el área de los cordones, manteniendo prácticamente las esbelteces del mismo (la forma seccional es igual pero sólo se achican espesores), resultaría proporcional a la reducción del área realizada. En este caso, la capacidad para los cordones de 2mm deberían resultar 0,625 veces la resistencia respecto del caso con 3.2mm de espesor en cordones (2,0/3,2), resultando $0,625 \times 50\text{kN} = 31,3\text{ kN}$. La diferencia observada con los 22,5 kN obtenidos del análisis del modelo corresponde a la disminución de capacidad del nudo debido al menor espesor del labio rigidizador. La capacidad flexional del labio rigidizador se reduce con el cuadrado del espesor y esto se refleja en la diferencia de capacidades obtenida.

Además de la merma notable en capacidad de viga al reducir el espesor de los

Organiza:

cordones debido al comportamiento del nudo en estudio, no se debe dejar de lado los estados límites de pandeo local que no se verifican en estos ejemplos para mantener las comparaciones sobre una sola variable. Para la misma dimensión de cordón (C140) por ejemplo, la tensión crítica de pandeo local en el caso de 3,2mm de espesor resulta cercana a F_y , sin embargo, para la misma dimensión, pero con espesor de 2mm ($\lambda_w \approx 70$), la tensión crítica está muy por debajo y puede reducir aún más la capacidad a compresión.

COMPARATIVA CAPACIDAD DE CARGA CON EJEMPLO ARTÍCULO REVISTA

Con el fin de comparar la capacidad de la diagonal obtenida de los modelos y ensayos, se continúa con el análisis del pórtico tipo de una nave industrial presentado anteriormente en la publicación de la revista IE [5].

Resumen del caso y solicitaciones

El pórtico en cuestión consta de 15 m de luz entre ejes, altura libre de 6 m y una separación entre los mismos de 4 m. Se adopta una altura de 100 cm para la viga reticulada, como así también para las columnas.

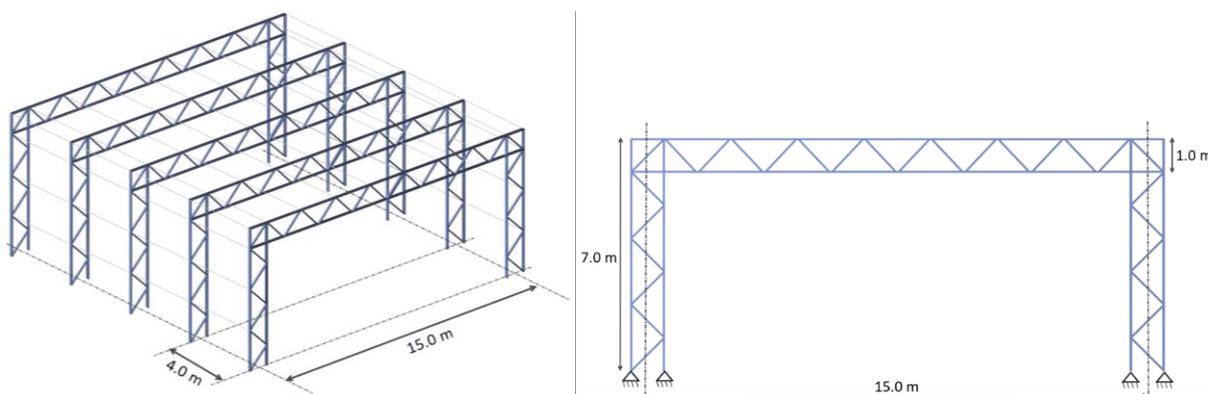


Figura 17. Dimensiones de nave tipo.

El material utilizado es ZAR 250 ($F_y = 250$ MPa) y las secciones son las siguientes:

- Cordones: C 140x60x20x3,2
- Diagonales: C 100x50x20x3,2

Las cargas aplicadas se resumen en la siguiente tabla:

Cargas permanentes (D)	Sobrecarga de cubierta (Lr)	Cargas de viento (W)*	
		Cubierta (q_v)	Paredes (q_h)
0,10 kN/m ²	0,58 kN/m ²	-1,06 kN/m ²	0,75 kN/m ²

Tabla 2 – Cargas aplicadas

*Las cargas de viento se obtuvieron con una velocidad básica de 51 m/s (Santa Fe) y categoría de exposición "B", considerando el edificio.

Organiza:

Esfuerzos internos y verificación normativa de los elementos

El análisis estructural del pórtico se realiza mediante un modelo de barras en el software RAM Elements v23. Se modela un reticulado ideal con todas sus diagonales articuladas en los extremos y convergiendo a un nudo, ignorando posibles excentricidades constructivas. Las columnas se consideran empotradas en su base.

El diseño de los miembros se realiza mediante la Norma AISI-01, base del Reglamento Argentino de Elementos Estructurales de Acero de Sección Abierta Conformados en Frío CIRSOC 303-09 [7].

En la Figura 18 se visualiza la diagonal más solicitada donde el esfuerzo normal de compresión es de 50,12 kN y se encuentra en una relación de esfuerzos de 0,53 para la combinación de carga 0,9D + 1,5W.

Con este planteo y resultados obtenidos, se podría concluir que el diseño de las diagonales es satisfactorio y la capacidad a compresión de la barra, considerando el pandeo flexional y el pandeo local, no es un estado límite determinante.

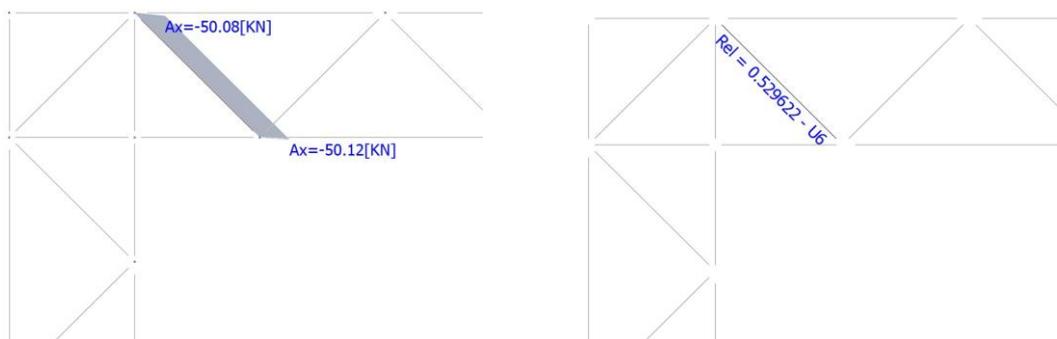


Figura 18. Diagonal más solicitada a compresión. Axil y ratio de esfuerzos.

Capacidad de carga de la viga en función de los resultados de ensayo

Con el objeto de comparar la capacidad de la diagonal según el análisis realizado mediante ensayos y modelos de elementos finitos, con la capacidad requerida en el ejemplo del pórtico tipo, es necesario ajustar la capacidad determinada según la tensión de fluencia teórica del material. Por lo tanto, se corrige en función de la relación entre las tensiones de fluencia del material teórico y del material ensayado. Previamente se adopta como carga última el promedio de los valores de la Tabla 1, que es de 55 kN. Como este valor se refiere a la carga total, el esfuerzo en la diagonal se obtiene mediante descomposición de fuerzas. Encontrándose las diagonales a 45°, la capacidad real de la diagonal es de 38,90 kN [$55\text{kN} / (2 \times \cos 45^\circ)$]

El cálculo para obtener la capacidad teórica es:

- Tensión de fluencia del material ensayado (F_{yr}): 350 MPa
- Tensión de fluencia del material teórico (F_{yt}): 250 MPa

Organiza:

$$\text{Capacidad teórica} = \text{Capacidad real} \times \frac{F_{yt}}{F_{yr}}$$

$$\text{Capacidad teórica} = 38,90 \text{ kN} \times \frac{250 \text{ MPa}}{350 \text{ MPa}} = 38,90 \text{ kN} \times 0,714$$

$$\text{Capacidad teórica} = 27,77 \text{ kN}$$

Comparando esta capacidad teórica con la capacidad requerida del pórtico tipo, se obtiene una relación de esfuerzos de 1,80, altamente superior a la relación de esfuerzos obtenida del ejemplo, la cual es de 0,53 si se realiza un análisis típico de un modelo de barras (reticulado ideal).

Con el objeto de ampliar la comparativa, se adicionan las excentricidades de la viga real al modelo de barras del pórtico tipo. De esta forma, se determina la capacidad del cordón tanto a corte como a flexión. En la siguiente tabla se resumen estos valores en forma de relación de esfuerzos.

Capacidad a compresión diagonal	Capacidad teórica diagonal	Capacidad a corte cordón	Capacidad a flexión cordón	Interacción flexión y corte cordón
0,53	1,80	0,83	0,49	0,97

Tabla 3 – Comparativa de relación de esfuerzos

De esta tabla se puede observar que, debido a la ejecución de este detalle constructivo, con las diagonales soldadas al labio rigidizador con excentricidad en los nudos, se pierde 3,4 veces (1,80/0,53) de la capacidad de carga que puede tomar la diagonal a compresión, lo que se traduce en un elevado desaprovechamiento del material.

Por otra parte, obviando la conexión al labio rigidizador y manteniendo solo la excentricidad en el nudo, la capacidad a corte en el cordón pasa a ser el estado límite de la viga. Aunque en este caso el cordón verifica, ante cualquier incremento de excentricidad aumentará la flexión en el mismo y la relación de esfuerzos superaría la unidad, debido a la interacción con el esfuerzo de corte.

Para una mejor comprensión, se ajustan los valores de la Tabla 3 adoptando 1 como capacidad teórica relativa de la viga.

Capacidad a compresión diagonal	Capacidad teórica diagonal	Capacidad a corte cordón	Capacidad a flexión cordón	Interacción flexión y corte cordón
0,29	1,00	0,45	0,27	0,53

Tabla 4 – Comparativa de relación de esfuerzos en función de capacidad teórica

Por efecto de la plastificación del labio rigidizador, como se demuestra anteriormente, la capacidad de la viga de tomar carga es muy inferior. Tanto que se desaprovecha, aproximadamente, 2 veces la capacidad del cordón (1/0,53) y 3,4 veces la capacidad de la diagonal a compresión (1/0,29).

Organiza:

CONCLUSIONES

La solución de vigas reticuladas con perfiles conformados en frío en Argentina se ha hecho cada vez más popular 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 este tipo de vigas.

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 y con una afectación menor en la rigidez del conjunto.

De los ensayos y modelos analizados se puede concluir:

- El labio rigidizador del cordón trabaja a flexión para transferir el esfuerzo de la diagonal, con un mecanismo similar al de una viga bi empotrada.
- La dimensión del cateto de soldadura para la conexión tiene implicancias en la capacidad final de la viga porque al aumentar su tamaño mejora el comportamiento a flexión de los labios rigidizadores.
- Las soldaduras realizadas al fabricar las probetas de ensayos con perfiles galvanizados no superan la inspección visual normativa a pesar de realizar catetos de mayor dimensión que la especificada en planos (porosidad).
- La capacidad de las vigas ensayadas está gobernada por la plastificación temprana que se genera en los nudos debido a la alta concentración de esfuerzos de corte y flexión producidas por las excentricidades entre barras y la flexión generada localmente por la conexión mediante los labios rigidizadores del cordón.
- Comparando la capacidad resultante con la obtenida mediante un modelo que no contemple la conexión a través del labio rigidizador, la misma es de aproximadamente el 50%. Esto evidencia una pérdida de eficiencia notable en el aprovechamiento del material.
- Los resultados de los modelos de elementos finitos reflejan un comportamiento similar a los obtenidos mediante ensayos, pero presentan algo más de capacidad de carga. Es decir que no son resultados conservadores y debe contemplarse adecuadamente al momento de su uso.

El análisis realizado y los resultados obtenidos permiten tener una clara idea del funcionamiento de este tipo de nudos. Sin embargo, queda claro que no es una solución eficiente y además resulta prácticamente imposible lograr una ejecución adecuada con los estándares de calidad mínimos exigidos para estructuras de obras civiles. Por todo esto, no se considera apropiado el uso de esta solución de nudos para este tipo de vigas y se recomienda no aplicarla.

Organiza:

Referencias bibliográficas

- [1] D.H. Bondok, H.A. Salim (2017). *Failure capacities of cold-formed steel roof trusses end-connections*. *Thin-Walled Structures* 121 (2017) 57–66
- [2] Malgorzata Gordziej Zagórska, Elzbieta Urbanska Galewska, Patryk Deniziak (2020). *Experimental investigation of joint with positive eccentricity in CFS truss*. *Thin-Walled Structures*. Volume 157, diciembre 2020, 106998.
- [3] Çagan Dizdar, Eray Baran, Cem Topkaya (2019). *Strength and stiffness of floor trusses fabricated from cold-formed steel lipped channels*. *Engineering Structures* 181 (2019) 437–457.
- [4] *Structural analysis for rapid design iterations | Altair Simsolid*. (s.f.). Default. <https://altair.com/simsolid>
- [5] Avendaño L., Erck P., Ruffo H. (2023). *Nudos soldados en vigas reticuladas con perfiles conformados en frío. Análisis y comportamiento*. *Revista IE N°67*, diciembre 2023, ISSN 16671511 (año 27). Página 28
- [6] CIRSOC 304 (2007) *Reglamento argentino para la soldadura de estructuras de acero*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial
- [7] CIRSOC 303 (2009) *Reglamento argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial

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.

Organiza: