

NUDOS SOLDADOS EN VIGAS RETICULADAS CON PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO. ANÁLISIS Y COMPORTAMIENTO.

Lucas Avendaño; Pablo Erck; Héctor Ruffo (Ingenieros Civiles)
Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional
lavendano@frsf.utn.edu.ar, perck@frsf.utn.edu.ar, hruffo@frsf.utn.edu.ar

1. 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 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.

1.1. Breve 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 coste por fabricarse de manera automática a partir de bobinas de acero.
- Se fabrican a partir de chapa galvanizada, lo que permite ahorrar en el proceso de protección superficial contra la corrosión.
- 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 autopercorantes.

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 en las barras y reduciendo la rigidez del conjunto. Las soluciones abulonadas requieren de una inversión en equipamiento tecnológico muy alto.

Por lo anterior, hay un nicho del mercado de las construcciones de acero en Argentina, que realizan este tipo de vigas mediante la ejecución de uniones soldadas en lugar de abulonadas.

La solución habitualmente utilizada, 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.

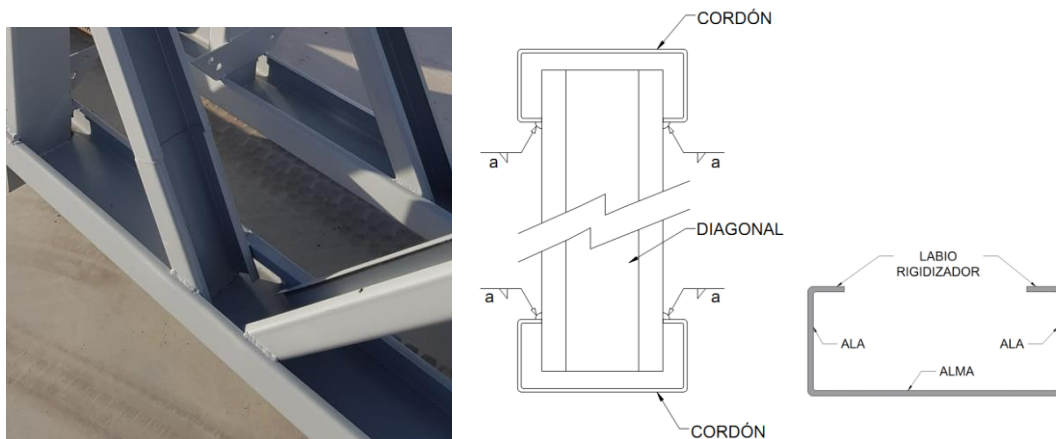


Fig.1 Detalle de conexión de diagonales a cordón en solución de vigas reticuladas soldadas

Esta solución da como resultado una fabricación sencilla, sin elementos auxiliares de conexión, de alto rendimiento de mano de obra y sin necesidad de aplicar protección superficial si se utilizan perfiles con material galvanizado.



Fig.2 Ejemplo de viga reticulada soldada en base a perfiles conformados en frío galvanizados.

1.2. Marco teórico del proyecto.

La solución a evaluar tiene origen en la aplicación práctica, dado que mejora la productividad de la fabricación de este tipo de celosías. Sin embargo, no se encuentran antecedentes que expliquen claramente el comportamiento de los nudos con estas características y el impacto que tiene esta solución 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, en general 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 de importancia para su ejecución.

El resultado del proyecto tendría un impacto relevante para confirmar la validez del sistema o para informar sus falencias y generar recomendaciones acerca de la reducción de las capacidades teóricas de estas vigas.

El análisis se basa principalmente en utilizar modelos de elementos finitos de forma sistemática para diferentes soluciones y realizar las correspondientes comparativas de resultados.

El presente estudio forma parte de una primera etapa de un proyecto más amplio que se complementará con ensayos de carga a escala real en el laboratorio de estructuras de la UTN – FRSF.

1.3. Objetivo de la primera etapa.

Se presenta la problemática inicial mediante un caso práctico tipo, con el objetivo de evaluar las posibles limitaciones de uso del sistema. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos, que incluyen una calibración de modelos mediante ensayos de carga en probetas en escala real dentro del laboratorio de grandes estructuras de la UTN - FRSF.

Luego se intentará hacer una aproximación de las capacidades de carga de las diagonales de un reticulado de este tipo, contemplando el comportamiento del nudo soldado, con la conexión al labio rigidizador y las excentricidades generadas por cuestiones constructivas.

En la actualidad se ha difundido mucho el uso de este tipo de soluciones estructurales, siendo habitual para salvar luces de entre 10 y 20m con alturas útiles interiores de entre 4 y 6m. En el ejemplo que se presenta en el punto siguiente, se obtienen las solicitaciones en las componentes del reticulado para hipótesis de carga mínimas reglamentarias y se verifican los elementos de manera independiente para ELU (cordones y diagonales), sin contemplar el comportamiento de la conexión al labio rigidizador. Posteriormente se compara la capacidad última de una diagonal determinada de forma independiente, con la capacidad aproximada, obtenida mediante métodos numéricos y validadas por ensayos, del sistema de conexión diagonal-labio rigidizador-cordón.

El objetivo principal de esta primera etapa del proyecto es comprender el funcionamiento del nudo en cuanto a la transferencia de esfuerzos entre barras. Además, se pretende tener una primera impresión sobre el impacto que el nudo tendría en la determinación de la capacidad máxima de diseño de las diagonales.



Fig.3 Galpón con pórticos reticulados en base al sistema descrito.

2. Ejemplo práctico típico de la problemática

2.1. Introducción

Se plantea el análisis y verificación de un pórtico de la nave que se describe a continuación, mediante la metodología de análisis habitual al abordar el diseño de una nave industrial resuelta con esta tipología estructural. Tanto la determinación de esfuerzos como la verificación normativa

de los elementos se realiza mediante el uso de un software comercial de elementos finitos de barras.

2.2. Descripción de la estructura a analizar

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.

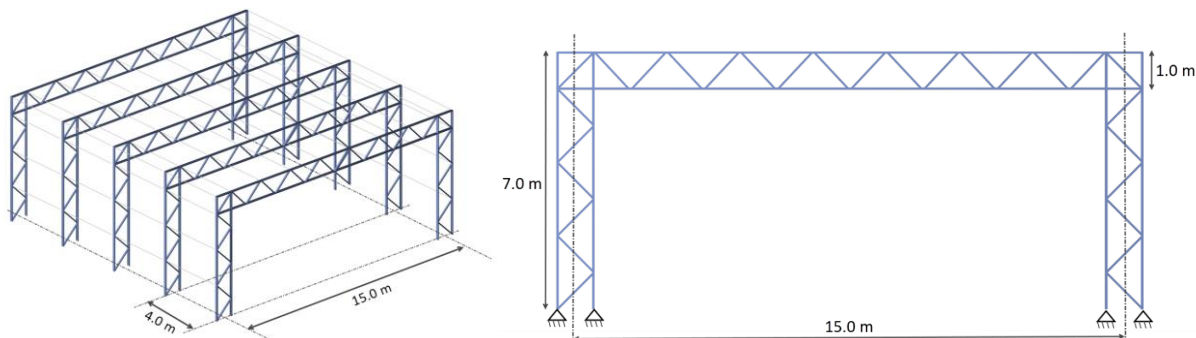


Fig.4: Dimensiones de nave tipo.

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

Cordones: C 140x60x20x3.2	Diagonales: C 100x50x20x3.2

2.3. Análisis estructural

2.3.1. Hipótesis y combinaciones de carga

Cargas Permanentes (CM):

Se considera el peso de una cubierta liviana compuesta por correas de perfil C galvanizado y chapa sinusoidal.

$$- CM = 0,10 \frac{kN}{m^2}$$

Sobrecarga de Cubierta (Lr):

Según el Reglamento Argentino CIRSOC 101-2005 ^[4], artículo 4.9.1. la sobrecarga de diseño mínima para cubiertas, considerando una cubierta plana y 60 m² de superficie de influencia, resulta:

$$L_r = 0,96 \times R_1 \times R_2 \quad L_r = 0,96 \times 0,6 \times 1,0 = 0,58 \frac{kN}{m^2}$$

Acción del Viento (W):

Se adopta el método simplificado ya que se tiene una altura de cumbrera menor a 10 m, por lo tanto, se encuentra dentro del campo de aplicación del método.

- Ubicación: Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina
- Topografía: Plana
- Terreno: Urbano
- Altura de cumbrera: 7m
- Velocidad Básica: 51 m/s (*Figura B*)
- Factor de direccionalidad: 0,85
- Categoría de edificio II (*Tabla A-1*)
- Factor de importancia: 1,00 (*Tabla 1*)
- Categoría de exposición: B (*5.6.1*)
- Edificio cerrado

Succión de viento en cubierta: $q_v: -1240 \frac{N}{m^2} \times 0,853 = -1058 \frac{N}{m^2} = -1,06 \frac{kN}{m^2}$

Presión de viento en paredes: $q_h: 871,6 \frac{N}{m^2} \times 0,90 = 784 \frac{N}{m^2} = 0,748 \frac{kN}{m^2}$

Se adopta una distribución de presión neta en paredes del 60% en la cara a barlovento y 40% en sotavento.

Las diferentes cargas se aplican en los nudos del reticulado simulando el apoyo de las correas. Para el diseño se consideran las siguientes combinaciones de carga que establece el Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios CIRSOC 301-05.^[5]

Combinaciones de carga para ELU:

- | | |
|-------------------------------|------|
| ▪ 1,4D | (U1) |
| ▪ 1.2D + 1,6L + f1 Lr | (U2) |
| ▪ 1,2D + 1,6Lr + (f1L ó 0,8W) | (U3) |
| ▪ 1,2D + 1,5W + f1 L + f1 Lr | (U4) |
| ▪ 1,2D + f1 L + f1 Lr | (U5) |
| ▪ 0,9D + 1,5W | (U6) |
| ▪ 1,2D + 1,6L + f1 Lr + 0,8W | (U7) |

2.3.2. Determinación de esfuerzos internos

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. Cada cordón de las columnas se encuentra articulado en su extremo inferior a la fundación, generando un empotramiento producto de la separación entre cordones.

2.3.3. Verificación normativa de los elementos

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.

Como resultado del análisis se obtiene que todos los elementos del pórtico verifican los estados límites últimos para todas las combinaciones de diseño.

En la siguiente imagen 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 estos resultados se puede 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 problema.

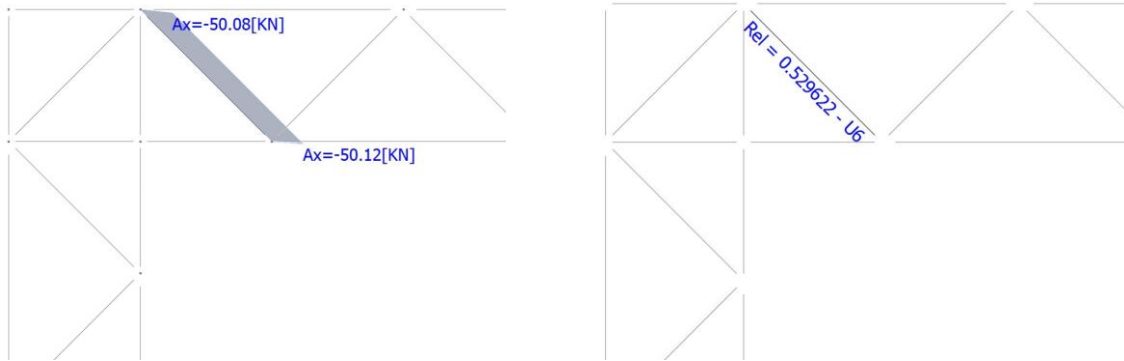


Fig.5: Diagonal más solicitada a compresión.

2.4. Análisis de comportamiento del nudo

Una vez realizado el cálculo estructural y diseño normativo de los elementos que conforman el pórtico, aplicando todas las cargas reglamentarias y cumpliendo con la norma, el siguiente paso es estudiar y verificar la resistencia de la conexión en los nudos.

Para poner en discusión una primera limitación a la capacidad resistente y siguiendo un procedimiento simplificado de diseño, se analizan las diagonales más solicitadas de la viga reticulada, las cuales son las que se encuentran más cercanas a la columna.

Nu = -50,12 kN

En primer lugar, se realiza un cálculo manual siguiendo las ecuaciones de resistencia de materiales.

Considerando que la carga se distribuye al cordón únicamente por las alas soldadas se tiene:

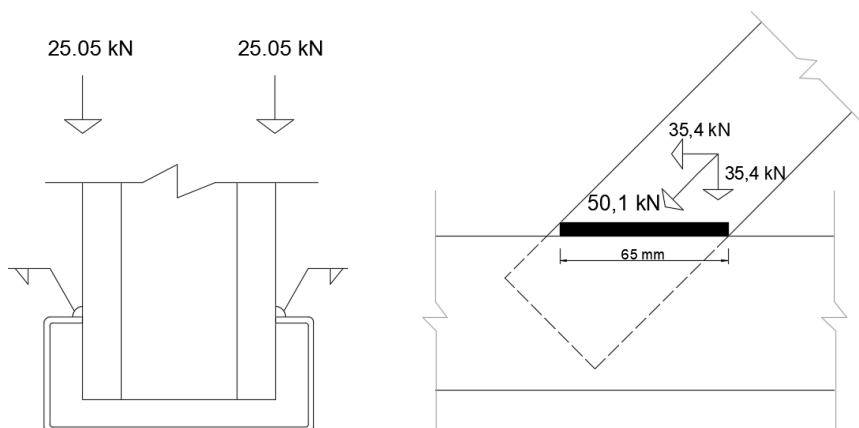


Fig.6: Esquema de transferencia de esfuerzos de diagonal a cordón.

El labio rigidizador del cordón puede considerarse en voladizo, empotrado al ala y tiene continuidad longitudinal. Definiendo las líneas de rotura se puede determinar la capacidad del labio y compararla con el momento último resultante que puede definirse como:

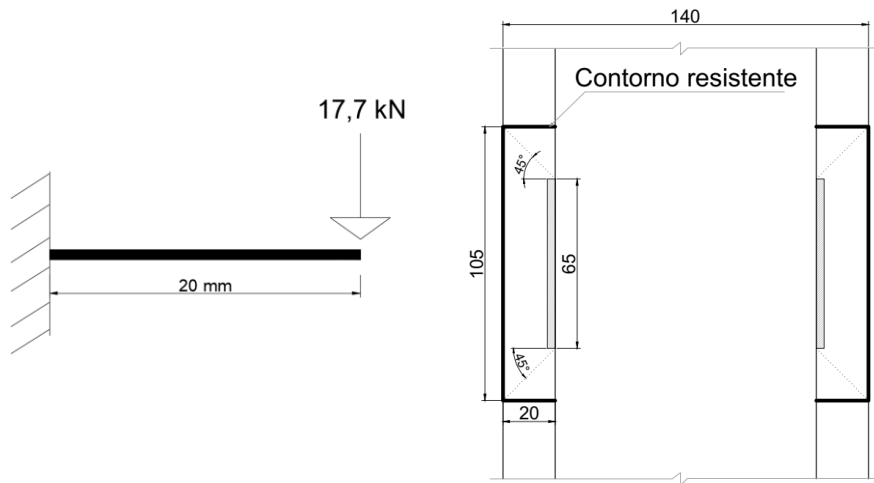


Fig.7: Esquema simplificado de sistema resistente de labio rigidizador.

$$M_n = \frac{17,7 \times 0,02}{0,9} = 0,393 \text{ kNm}$$

El módulo plástico que se puede desarrollar a partir de las líneas de rotura definidas es de $0,37 \text{ cm}^3$

$$\sigma = \frac{0,393 \text{ kNm}}{0,37 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 1062162 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1062 \text{ MPa}$$

Se observa que la tensión resultante supera ampliamente el valor de tensión última de diseño del material dado por F_y .

Considerando válida la hipótesis de líneas de rotura planteadas, se obtiene que la capacidad última de la diagonal, para un $F_y = 250 \text{ MPa}$, resulta $9,26 \text{ kN}$. Este valor es apenas un 18.5% del esfuerzo de diseño requerido (relación de esfuerzos 5.42) y por lo tanto el estado último de resistencia gobernante es la capacidad de la conexión.

3. Estudio del comportamiento de un nudo prototipo

3.1. Introducción

En la bibliografía especializada, no hay antecedentes del comportamiento real que presentan las conexiones soldadas de esta tipología. Con el objetivo de obtener resultados concretos y de fácil interpretación, se procede con el análisis de un nudo más simple. Esto permite realizar una comparativa entre ensayos de carga a escala real y los modelos de elementos finitos, de forma de calibrar de manera apropiada estos últimos. Se pretende obtener conclusiones acerca del funcionamiento de la conexión y de su capacidad resistente.

Se analiza un nudo soldado simple, que contiene las condiciones a estudiar, y puede materializarse fácilmente para ensayarlo mediante una prensa de carga. Es por esto, que la tipología adoptada es en forma de T, como se observa en el esquema de la figura siguiente:

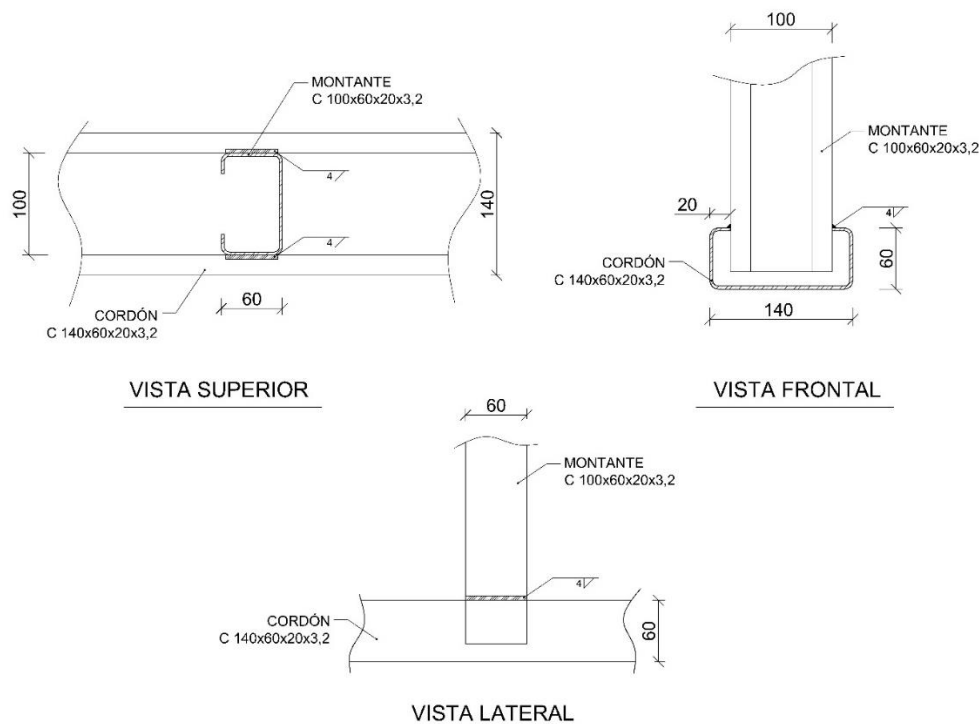


Fig.8: Nudo prototipo.

El material de las probetas fue previamente ensayado a tracción para definir la tensión de fluencia real, obteniéndose un valor de 320 MPa que es el que se utiliza en los modelos para que sean representativos de la probeta.

3.2. Modelado mediante elementos finitos

3.2.1. IDEA Statica

IDEA StatiCa realiza un análisis de elementos finitos basado en componentes CBFEM. Las tensiones equivalentes de Von Mises y las deformaciones plásticas se calculan en cada punto de los elementos tipo placa. Se utiliza una licencia educativa del programa en su versión 22.1.

Cabe destacar que el software está dedicado a la evaluación de conexiones de miembros laminados en caliente que no se ven afectados significativamente por el pandeo. Para miembros de paredes delgadas, sólo es adecuado el análisis geoméricamente no lineal con imperfecciones. Por lo tanto, el diseño de estos miembros es muy específico y el programa no fue validado para este uso.

Para más información puede consultarse la base teórica donde se describe y se respalda el funcionamiento del software.^[6]

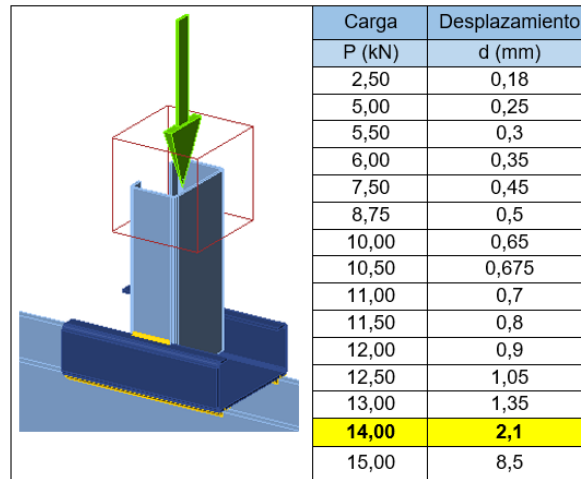


Figura 9: Modelo prototipo Idea Statica. Tabla carga deformación.

Se obtiene una carga última de aproximadamente 14,0 kN.

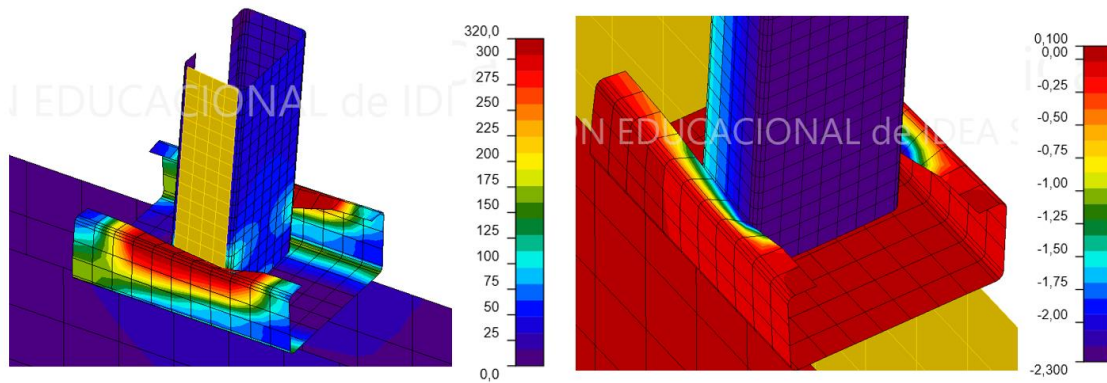
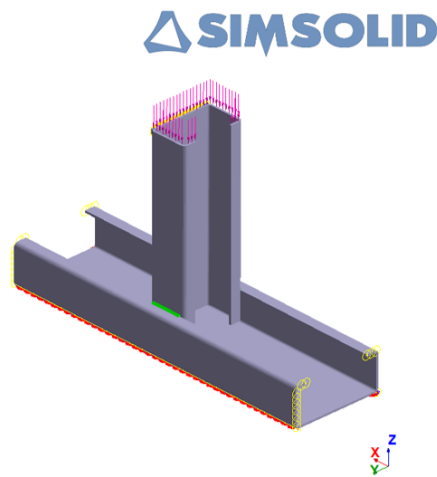


Fig. 10: Tensiones de Von Mises en MPa (izquierda) y deformaciones en mm (derecha) para 14 kN.

3.2.2. Sim Solid

El programa “SimSolid”, de la firma Altair, basa su motor computacional en aplicaciones innovadoras de la teoría de las aproximaciones externas. Las cuales son una generalización del método de elementos finitos (FEM). La geometría del nudo prototipo se introduce en formato CAD 3D, por lo tanto, los elementos en estudio se representan como sólidos. Las soldaduras se modelan con cateto de 3mm. En ^[7] se presenta más información sobre el software.



Carga	Desplazamiento
P (kN)	d (mm)
1,73	0,04
3,36	0,08
4,93	0,12
6,49	0,16
8,04	0,21
9,59	0,26
11,14	0,32
12,69	0,37
14,24	0,43
15,78	0,51
17,31	0,58
18,84	0,7
20,36	0,81
21,87	0,91
23,38	1,07
24,89	1,26
26,40	1,49
27,91	1,78
29,42	2,5
30,93	4,01

Figura 11: Modelo prototipo Sim Solid. Tabla carga deformación.

Se obtiene una carga última de aproximadamente 23,4 kN.

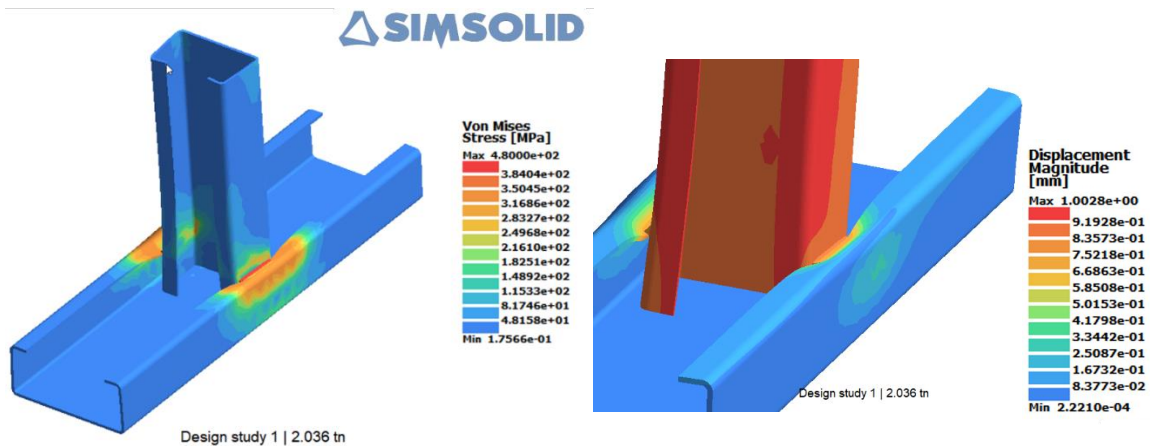


Fig. 12: Tensiones de Von Mises (Mpa) y deformaciones (mm) para 20 kN.

3.3. Ensayo carga-deformación del prototipo y comparación de resultados

El ensayo se llevó a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe.

Se utilizan tres probetas fabricadas a partir de la misma información para la realización del ensayo. Al analizar las probetas una vez fabricadas, se observan diferencias en los catetos de soldadura respecto de lo especificado. Este dato se releva y se registra para cada probeta dado que se considera puede incidir en los resultados del ensayo. La variación de los catetos es habitual sobre todo cuando se trata de dimensiones de filetes mínimas como en este caso.

Cada probeta es cargada axialmente sobre el montante y para diferentes escalones de carga se obtienen las deformaciones mediante comparadores situados en las dos alas del montante, por ende, cada uno representa la deformación del labio rigidizador del cordón. El ensayo finaliza cuando el conjunto deja de tomar carga. Los resultados para las tres probetas ensayadas y los obtenidos de los modelos de elementos finitos, se muestran en la siguiente gráfica carga-deformación.

RESULTADOS PROBETAS - SIMSOLID - IDEA STATICA

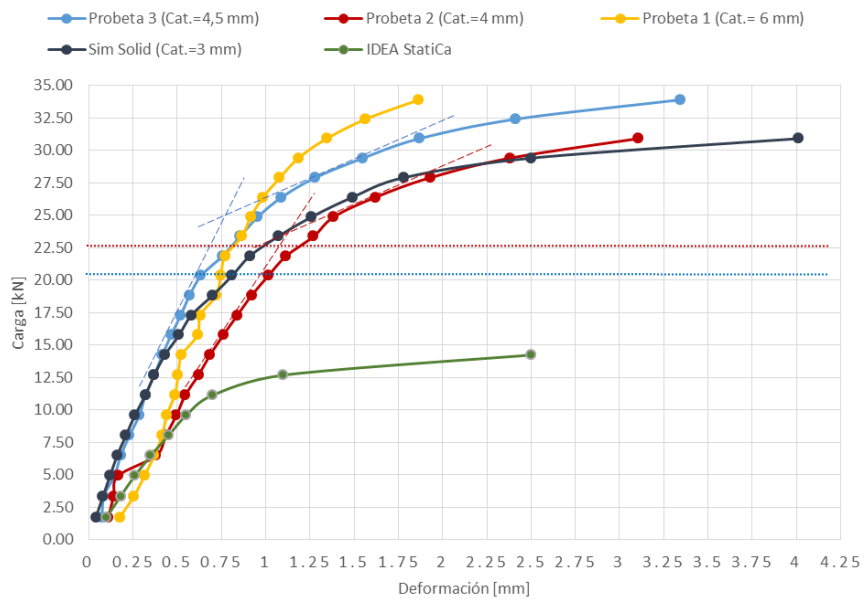


Fig. 13: Comparativa de resultados entre modelos computaciones y probetas ensayadas.

Como resultado del ensayo se obtiene, promediando entre probetas, una capacidad de carga última entre 20 y 22,50 kN, usando como referencia la pérdida de linealidad entre carga y deformación.

Por otra parte, se evidencia la similitud cualitativa y cuantitativa entre los resultados obtenidos del software Sim Solid y los ensayos de las probetas como puede observarse en la figura 12. Los resultados obtenidos corroboran el funcionamiento del software Sim Solid, permitiendo continuar con su utilización para el desarrollo de este proyecto.

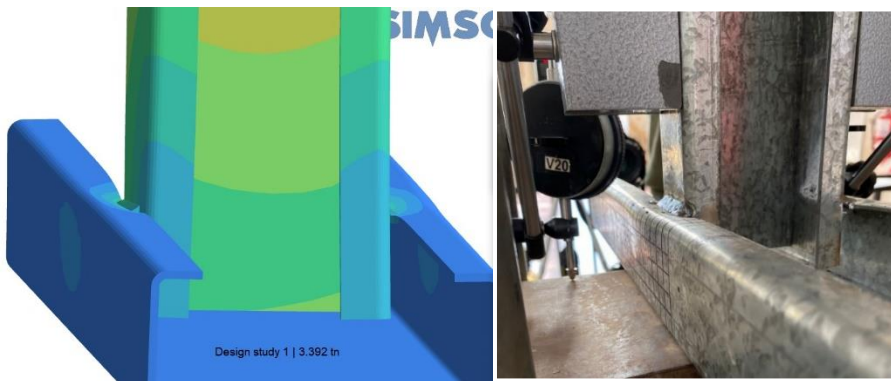


Fig. 14: Comparativa de la deformación del labio rigidizador entre modelo y ensayo.

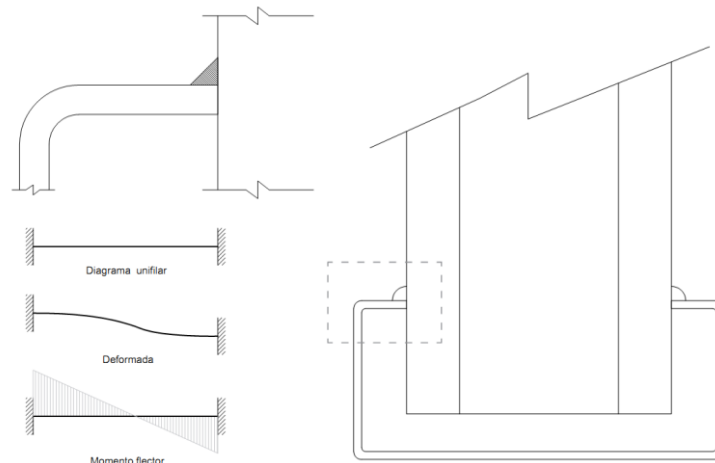


Fig. 15: Deformación del labio rigidizador producto del empotramiento de la soldadura.

4. Conclusiones y próximas etapas del proyecto

La comparación entre la capacidad última de la diagonal calculada manualmente de forma simplificada, con la obtenida del ensayo y el modelo, resulta en una diferencia de aproximadamente 3 veces. Esto pone de manifiesto la complejidad del funcionamiento de la conexión, en la que el fenómeno de plastificación de toda la sección transversal aporta mayor capacidad al nudo.

El cordón de soldadura entre el labio rigidizador y el montante, juega un papel muy importante ya que permite lograr un empotramiento, haciendo trabajar al labio rigidizador como una placa empotrada en ambos extremos, aumentando así su capacidad de tomar carga. Se considera que el espesor del cateto de soldadura no es una variable despreciable en el análisis

Extrapolando la carga ultima obtenida del ensayo, corregida en base a la tensión de fluencia teórica, para el caso de la diagonal del ejemplo presentado, **se obtiene un valor de capacidad última del nudo de aproximadamente 24.23 kN** de esfuerzo normal en la diagonal. Esto implica **un 48.4% de la capacidad necesaria**. Este resultado reduciría el coeficiente de seguridad en las construcciones materializadas con esta tipología. En futuras etapas del proyecto se pretender evaluar el efecto que esta plastificación de los nudos genera en una viga reticulada completa.

Próximas etapas

En base a la validación de resultados de los modelos de SimSolid mediante los ensayos de carga realizados en las probetas tipo T, se procederá a realizar modelos de vigas reticuladas completas para su análisis no lineal. Se espera un mejor comportamiento del conjunto que de forma individual, pero parece poco probable que se pueda alcanzar la capacidad de las diagonales con este tipo de conexión. Una vez calibrados los modelos se realizarán ensayos de carga, de las mismas vigas modeladas, para validación de los resultados.

En base al estudio de los resultados obtenidos, se pretende realizar una serie de recomendaciones de diseño que permitan estimar la máxima capacidad de esfuerzo normal de las diagonales, limitado por el diseño de la conexión, para utilizar en el diseño de este tipo de vigas.

También se analizará la incidencia que tiene el espesor de las secciones, utilizando el resto de los espesores comerciales que son 2,0 y 2,5 mm. Además, estudiar otras tipologías donde se agrega un cordón de soldadura entre el alma de la diagonal y el alma del cordón.

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] CIRSOC 102 (2005) *Acción del viento sobre las construcciones*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial
- [5] CIRSOC 301 (2005) *Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial
- [6] IDEA StatiCa Connection – *Structural design of steel connections*. (s.f.). IDEA StatiCa - Structural Design Software for Steel and Concrete | IDEA StatiCa. <https://www.ideastatica.com/support-center/general-theoretical-background>
- [7] *Structural analysis for rapid design iterations* | Altair Simsolid. (s.f.). Default. <https://altair.com/simsolid>