

CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL DE MODELOS NUMERICOS NO LINEALES DE NUDOS ABULONADOS, PARA RETICULADOS CON PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO

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)
Puga, Raúl; Ing. Civil; Cecovi UTN-FRSF (rpuga@frsf.utn.edu.ar)

Palabras clave: reticulados, perfiles conformados en frío, conexiones abulonadas

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.

Las conclusiones de proyectos de investigación anteriores sobre vigas reticuladas con perfiles conformados en frío y nudos soldados, sin el agregado de elementos auxiliares de conexión (cartelas, chapas de nudo, etc.) muestran una eficiencia muy baja del material utilizado y baja calidad de fabricación. Este trabajo pretende analizar en detalle una conexión abulonada entre barras y comparar los resultados con las soluciones soldadas analizadas en trabajos anteriores. La conexión propuesta también se plantea sin el uso de elementos auxiliares y buscando una transferencia de esfuerzos lo más directa posible. El estudio se realiza con el objetivo de calibrar los modelos numéricos con análisis no lineal, mediante resultados obtenidos en probetas de nudos en escala real ensayadas en el laboratorio. Los modelos calibrados se utilizarán para el análisis de vigas completas y futuros ensayos de carga a 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. Conclusions drawn from previous research projects on truss beams fabricated with cold-formed steel sections and welded joints, without the use of auxiliary connection elements (gusset plates, node plates, etc.), indicate very low material efficiency and poor fabrication quality.

The present study aims to perform a detailed analysis of a bolted connection between members and to compare the results with welded solutions investigated in previous studies. The proposed connection is also conceived without auxiliary elements, seeking the most direct possible load transfer.

The study is conducted with the objective of calibrating nonlinear numerical models using results obtained from full-scale joint specimens tested in the laboratory. The calibrated models will be used for the analysis of complete truss beams and for future full-scale load tests in the large-structures laboratory.

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. El proyecto, denominado “Análisis de conexiones abulonadas para nudos de vigas reticuladas en base a perfiles conformados en frío de delgado espesor”, tiene su origen en los resultados obtenidos de trabajos anteriores realizados por el mismo equipo de investigación, pero sobre vigas reticuladas, con perfiles conformados en frío y nudos soldados [12][13][14]

El uso de vigas reticuladas diseñadas con perfiles conformados en frío de sección C se ha extendido en el país en construcciones de galpones de pequeña envergadura. El presente trabajo se enfoca en posibles soluciones de nudos para estas vigas que se puedan ejecutar con uniones abulonadas y sin elementos auxiliares de conexión. El objetivo final, en una segunda etapa del proyecto en desarrollo, es interpretar mediante modelos numéricos, corroborados con ensayos a escala real, el comportamiento de celosías fabricadas con este tipo de soluciones. En esta primera etapa se procede a analizar, de forma aislada, el comportamiento de un nudo tipo con el objeto de calibrar los modelos de elementos finitos que se implementarán mediante ensayos en laboratorio.

Antecedentes. Marco teórico.

El comportamiento estructural de las vigas reticuladas ha sido ampliamente estudiado desde los orígenes de la estática gráfica y la resistencia de materiales, basándose principalmente en el concepto de reticulado ideal. Este modelo supone que las barras concurren en nudos articulados sin rozamiento, que los elementos son rectos y coplanares, y que las cargas actúan únicamente en los nudos y dentro del mismo plano estructural. Bajo estas hipótesis, las barras trabajan esencialmente a tracción y compresión.

En la práctica, sin embargo, es frecuente que algunas de estas condiciones no se cumplan, particularmente la concurrencia de los ejes baricéntricos de las barras en un mismo nudo, con el objeto de simplificar la fabricación y el montaje. Estos desvíos generan efectos locales y solicitaciones adicionales que requieren un análisis específico por parte del ingeniero estructuralista. En estructuras de gran luz y elevada carga, mantener las hipótesis de reticulado ideal adquiere especial relevancia para lograr la mayor eficiencia posible de los elementos estructurales. La resolución de los encuentros mediante chapas o cartelas de nudo permite aproximar el comportamiento teórico, aunque complejiza la fabricación.

En un proyecto anterior llevado adelante en el Cecovi por este mismo equipo de investigación, se profundizó en el análisis del desvío de las hipótesis ideales, para el caso de vigas con nudos soldados y perfiles conformados en frío, con una solución de conexión de aplicación práctica habitual para secciones tipo C de este tipo de perfiles. La solución evaluada mejora, por su sencillez, la productividad de la fabricación de este tipo de celosías, pero se pierde mucha eficiencia por su pobre diseño.

Los resultados de dicho proyecto se reflejan en [12][13][14]. En particular, en [14] se resumen los aspectos relacionados con la eficiencia del sistema con la solución soldada de las diagonales a los cordones a través del extremo del labio rigidizador de

este último, en comparación con soluciones que se aproximan mucho mejor a las hipótesis ideales mediante el uso de elementos auxiliares. El resultado indica que, con la misma cantidad de acero, se pueden lograr vigas que prácticamente duplican la capacidad de carga si se utilizan soluciones que se ajusten lo mejor posible a las hipótesis ideales del nudo, evitando transferencias de esfuerzos indirectas y excentricidades en el encuentro de las barras. Por lo tanto, no se considera racional el uso de ese tipo de vigas por el sólo hecho de la simplicidad de fabricación y la eliminación de elementos auxiliares, dado que el uso eficiente de los materiales y todo lo que esto conlleva en lo relativo a los problemas de sustentabilidad, basada en la generación de huella de carbono de los procesos, se considera fundamental en la práctica de la ingeniería civil. Por supuesto también son relevantes los costos directos asociados al consumo ineficiente del acero.

A partir de las conclusiones anteriores y aprovechando las ventajas de una construcción industrializada mediante el uso de conexiones abulonadas, se plantea la necesidad de evaluar soluciones que mejoren la eficiencia del material y que también eviten el uso de elementos auxiliares de conexión. Por otro lado, estas soluciones evitan los problemas mencionados por Avendaño L., Erck P., & Ruffo H. (2024) [13] en lo referente a la complejidad de lograr soldaduras que cumplan los requerimientos normativos de calidad [10] al ejecutar las conexiones en elementos de delgado espesor y con protección galvanizada.

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 puede integrar la ejecución de perforaciones mediante control numérico para generar conexiones abulonadas entre elementos.
- Al ser espesores delgados 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 adicionales como cartelas o chapas de nudo. La mayoría de esas soluciones son en base a uniones atornilladas o abulonadas ([1] a [6]) que incorporan algunos desvíos de la hipótesis de encuentro de las barras en un nudo ideal.

El sistema constructivo a analizar debe permitir la unión entre los elementos componentes de la celosía mediante bulones de alta resistencia y sin medios auxiliares. Para ello se propone un cambio en la sección de los cordones de forma de lograr una transferencia más directa y eficiente de los esfuerzos entre las barras. Se

reemplazan los cordones de sección C de las vigas soldadas analizadas en el proyecto anterior, por cordones de sección omega como se observa en la imagen siguiente.

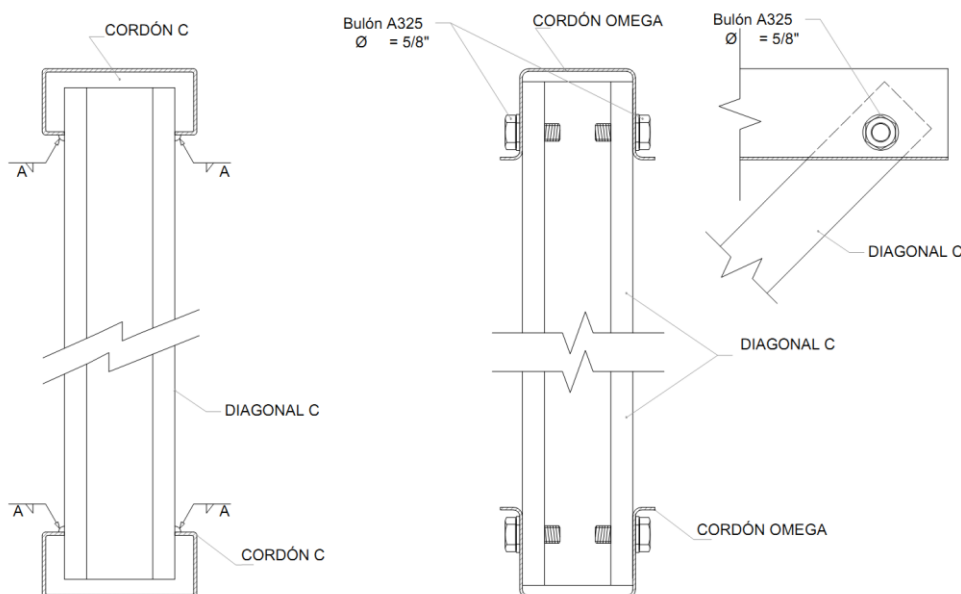


Figura 1. Conexión abulonada, comparativa con nudo soldado proyecto anterior

Esta forma de conexión, si bien implica una excentricidad en el encuentro de las barras, lo que generará esfuerzos adicionales (flexión y corte) y una reducción de la rigidez del conjunto, elimina los elementos auxiliares en el nudo. Además, permite pensar en un sistema industrializado de fácil fabricación en líneas de conformado automático, y armado mediante instalación de bulones que no requiere mano de obra especializada como es el caso de la soldadura. Además, la protección galvanizada no se deteriora como en el caso de la solución soldada.

Análisis por elementos finitos. Objetivo.

El objetivo final del proyecto en desarrollo es evaluar la capacidad y rigidez de vigas reticuladas basadas en perfiles conformados en frío galvanizados, mediante conexiones abulonadas sin piezas adicionales. Si bien hay formas bastante aproximadas de hacerlo, en este caso se propone como metodología realizar un modelo de elementos finitos de placas de una viga reticulada completa, incluyendo el modelado de las conexiones abulonadas mediante softwares especializados como el SimSolid [9]. Estos sistemas son relativamente nuevos y el usuario puede interactuar poco con la configuración del modelo, por lo que se considera apropiado realizar una validación y/o calibración mediante ensayos. Por lo tanto, se plantea la generación de modelos numéricos con dicho software y con Idea Statica [7] de un nudo aislado que conecta dos barras, para evaluar su comportamiento y compararlo con los resultados de un ensayo de carga del mismo nudo.

Este procedimiento permitirá ajustar los modelos no lineales de los softwares utilizados, con el objeto de optimizar la confiabilidad de los resultados aplicados a un modelo de viga reticulada completo. Esto es importante dado que un análisis no lineal de capacidad de carga de una viga modelada con elementos de placas y considerando las conexiones con elementos de contacto, demanda mucho tiempo de cómputo.

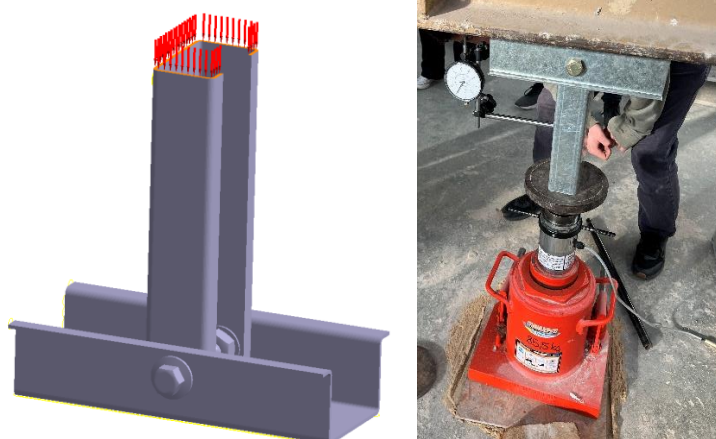


Figura 2. Modelo SimSolid y ensayo equivalente para validación de resultados

Otro de los objetivos de estos modelos simplificados es analizar, de forma rápida y preliminar, variantes de soluciones para el nudo, evaluando las excentricidades y todos los estados límites que pueden generarse en la conexión.

En apartados posteriores se detallan las características principales de los modelos y los resultados obtenidos.

CONFIGURACIÓN DE NUDOS. SECCIONES DE ELEMENTOS.

Como se mencionó, la solución del nudo soldado analizado en el proyecto anterior, con perfiles C como cordones, no aseguran una transferencia directa de las solicitaciones entre barras. Se presenta a continuación una breve síntesis de las premisas y referencias consideradas para definir las secciones transversales de cordones y diagonales que mejor se adapten a una conexión abulonada como la que se pretende evaluar.

Premisas de diseño

Si bien es conocida la pérdida de eficiencia de los reticulados al desviarse de las hipótesis ideales, quedó demostrado con el análisis de vigas soldadas que si, además, la transferencia de esfuerzos internos entre barras en el nudo es deficiente, esa merma en el rendimiento se incrementa notablemente. Se pretende plantear una solución que, sin incorporar chapas auxiliares en la conexión, logre una adecuada transferencia de esfuerzos y se aproxime lo mejor posible a las hipótesis del reticulado ideal. Las premisas de diseño para la conexión se pueden resumir en 3

- Clara y directa transferencia de esfuerzos entre elementos
- Unión sin medios auxiliares
- Uso de bulones A325

Con premisas similares, se han investigado varias soluciones de conexión con medios mecánicos como pasadores, remaches especiales o tornillos [3][4][5][6]. En todos los casos, se trata de conectar de forma directa las alas de las diagonales con las alas del cordón para conseguir una transmisión de esfuerzos a través de los elementos más rígidos de las barras. La sección C como cordón, parece ser la génesis de los

diferentes casos mencionados, a los que se les plantean intervenciones locales en los labios rigidizadores para evitar la interferencia con las diagonales como se puede ver en las imágenes de la figura siguiente

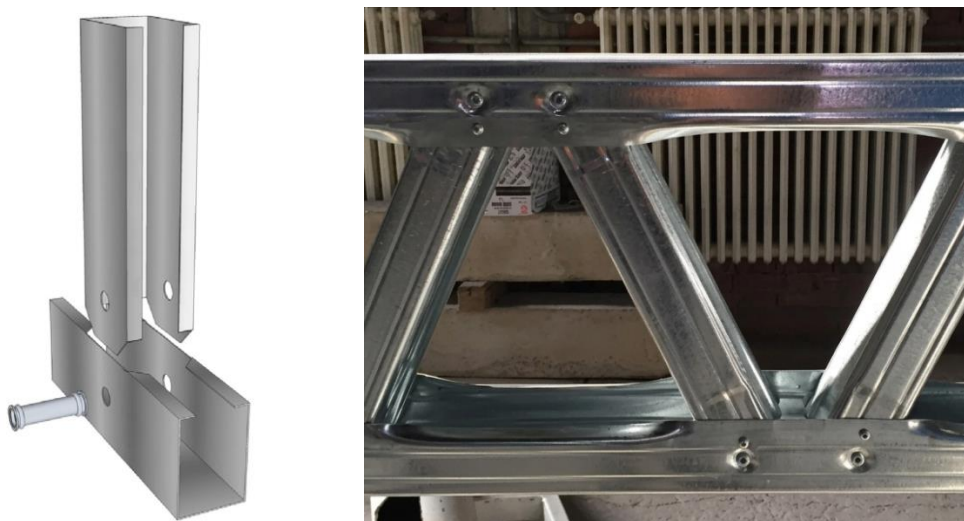


Figura 3. Ejemplos de soluciones observadas en los artículos de referencia. Izquierda [3], Derecha [4] .

Para el mercado local las secciones mostradas en la figura anterior como cordones no son estándares y el proyecto en desarrollo pretende lograr soluciones que sean de simple y rápida implementación en el mercado argentino. Entre las secciones que habitualmente se conforman en nuestro país, se encuentra la denominada galera u omega, similar a una sección C con los labios rigidizadores hacia afuera de las alas. Si bien no es una sección muy utilizada, existen fabricantes que disponen de una gama de dimensiones que podrían adaptarse para soluciones de este tipo.



Figura 4. Perfiles C y Omega de disponibilidad en el mercado local.

Con una geometría de este tipo para la sección transversal de los cordones, se puede plantear una conexión abulonada como la mostrada en la Figura 1. Claramente la conexión no es ideal porque no se conectan todos los elementos componentes de la diagonal, dejando sin conectar el alma. Sin embargo, dado que la capacidad de la diagonal en general estará gobernada por el diseño a compresión global o local, no se esperan grandes problemas debido al retraso de cortante. Por otro lado, es una unión que satisface la condición de utilizar dos bulones como mínimo y evita el uso de elementos adicionales que es otra de las premisas.

Definición de nudo. Uso como viga Pratt o Warren

Habiéndose definido la sección galera para cordones, resta analizar qué tipo de configuración de viga puede resultar más conveniente. Para esto se plantean dos posibilidades que son las más habituales para este tipo de celosías. Vigas tipo Pratt, con montantes verticales y diagonales o reticulado tipo Warren que sólo tiene elementos diagonales como alma. El análisis y comparativa entre el comportamiento de ambos casos, considerando las excentricidades que se generan por la solución constructiva, se presenta más adelante. Dicha comparativa es importante para seleccionar entre las dos posibilidades, el reticulado que, como conjunto, demuestre un mejor comportamiento en base a la solución de nudo adoptada.

ENSAYO PARA CALIBRACIÓN DE MODELOS

Los softwares utilizados para desarrollar los modelos [7][9], si bien tienen herramientas específicas para el desarrollo de uniones en estructuras de acero, no están específicamente diseñados para el análisis de perfiles conformados en frío. De hecho, los resultados obtenidos en [12], demostraron la imposibilidad de acercarse al comportamiento real de la conexión allí evaluada de parte del Idea Statica. Por ambos motivos, se procede de la misma forma en este caso, definiendo una probeta en T para representar la conexión entre un montante y el cordón.

Procedimiento de ensayo.

En la figura siguiente se muestra la probeta a analizar, conformada por un trozo de perfil omega como cordón y un tramo de perfil C como montante. La conexión se realiza entre las alas del perfil C y las alas del perfil omega mediante bulones A325 de 5/8" de diámetro. Las secciones son todas de 3.2mm de espesor y se utiliza material ZAR250 con galvanizado Z275.

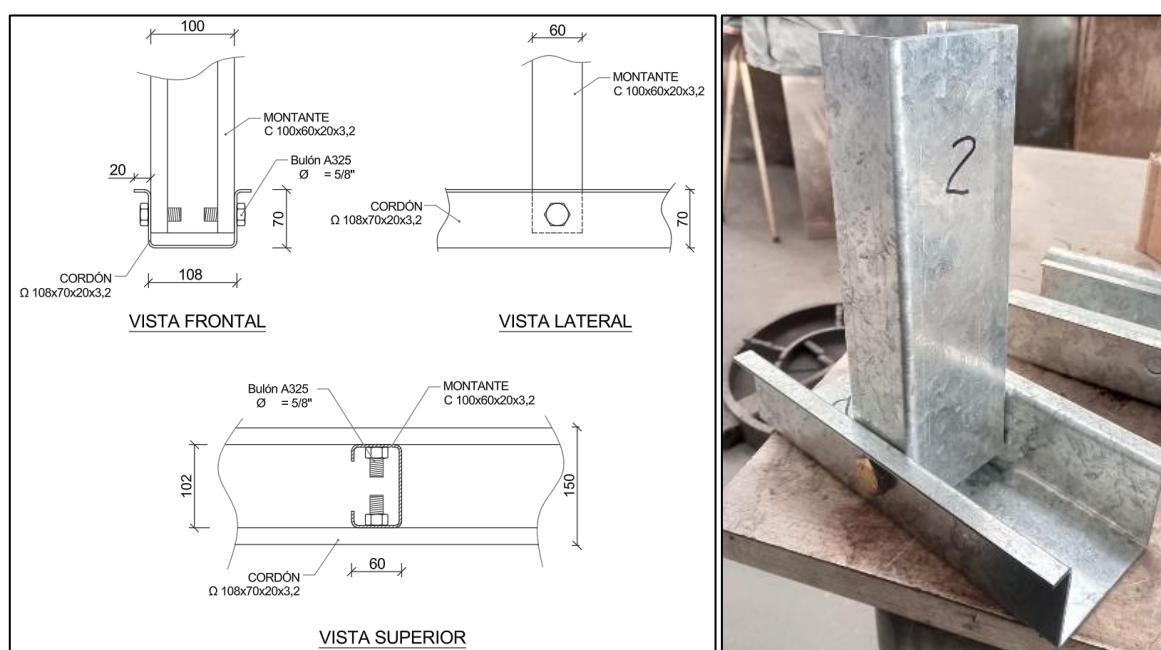


Figura 5. Esquema y fotografía de probetas

Dado que el objetivo no es obtener la capacidad de la conexión sino observar y analizar el comportamiento de esta a medida que se aumenta la sollicitación normal en el montante, por simplicidad de montaje en el pórtico de carga del laboratorio, se introduce compresión en la barra vertical, con un proceso cuasi-estático y escalonado. Para cada escalón de carga se toma la lectura de los comparadores que indican las deformaciones relativas que se están produciendo entre los componentes.

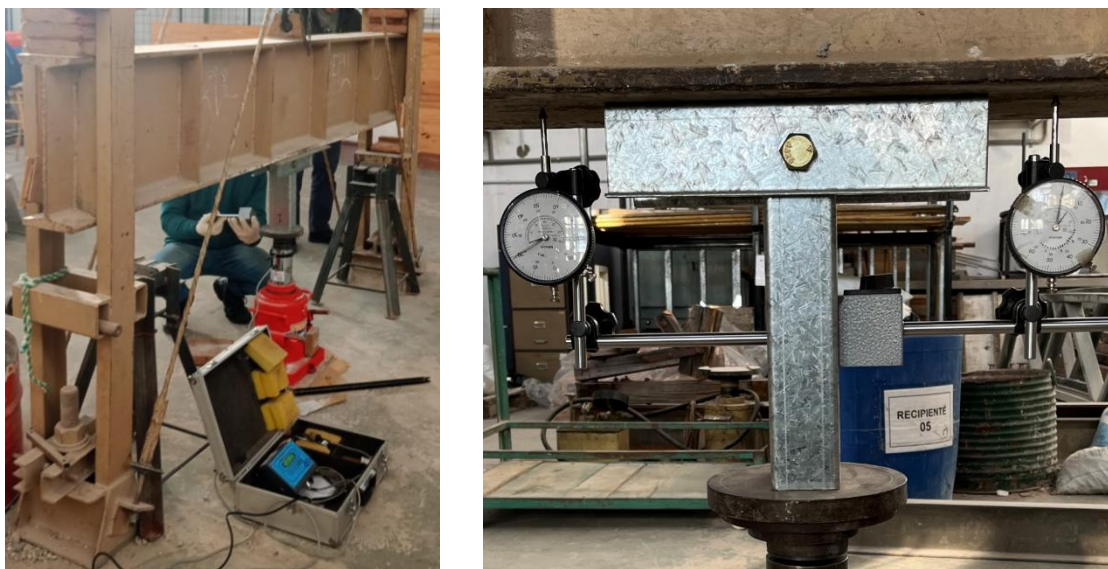


Figura 6. Montaje de probeta en pórtico de carga y disposición de comparadores.

El valor de los escalones de carga previstos se plantea en función del comportamiento mecánico esperado. En la etapa inicial de comportamiento lineal, se establecen escalones de carga de 20 kN. Al aproximarse a la fase de comportamiento no lineal, los escalones se reducen a 5 kN. Este cambio en la magnitud de los escalones de carga se debe a la necesidad de lograr una mejor aproximación de la curva carga-deformación en el rango inelástico. Con el objetivo de observar el comportamiento evaluando la posible incidencia de los detalles de armado, se introducen variaciones específicas en la preparación de las tres probetas ensayadas. En todos los casos, el apriete de los bulones es sin pretensar (snug tight):

- **Probeta 1:** se configura y ensaya con la disposición de nudo estándar, con una arandela del lado de la tuerca.
- **Probeta 2:** el armado es igual a la probeta 1, pero previo al inicio del registro formal de datos, se aplica un ciclo de precarga para inducir un acomodamiento inicial del sistema garantizando que el bulón esté en contacto con el borde del agujero al inicio del ensayo.
- **Probeta 3:** se utiliza doble arandela por cada bulón (una bajo la cabeza del bulón y otra bajo la tuerca).

Resultados de los ensayos

Los valores de desplazamientos medidos en ambos comparadores para cada escalón de carga se promedian y se vuelcan los resultados de cada probeta en un gráfico carga deformación que se muestra en la figura siguiente.

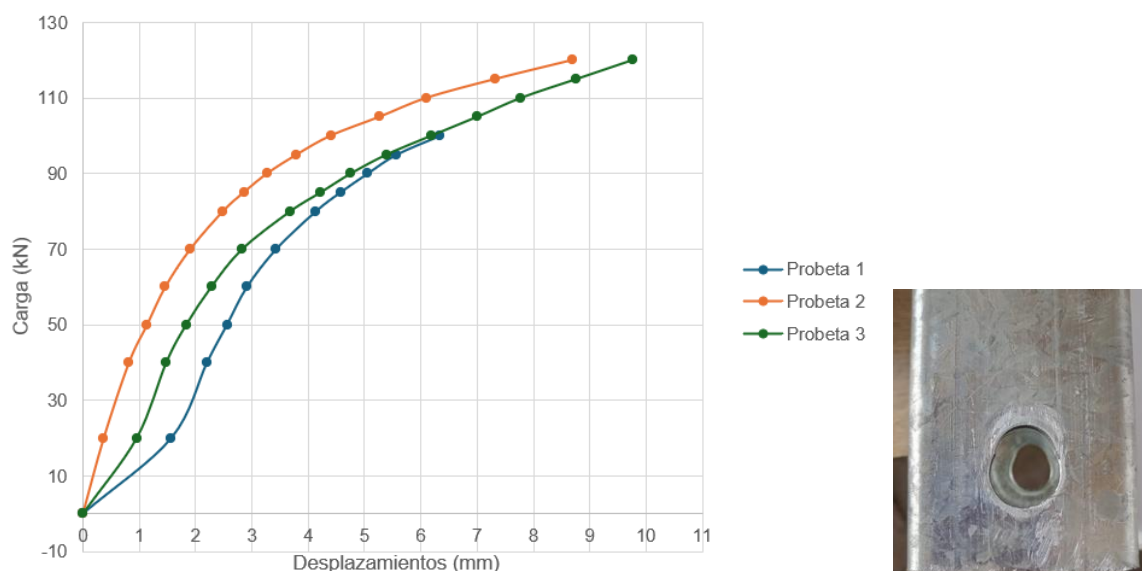


Figura 7. Ensayos probetas T - Curvas carga deformación – Aplastamiento.

En el caso de las probetas 2 y 3 se alcanza el estado en el cual el sistema prácticamente deja de tomar carga. El caso de la probeta 1, el ensayo se abortó al hacer contacto el montante con el radio de doblado del perfil omega, debido a un error en la fabricación de la probeta.

En términos de rigidez, la Probeta 2 presentó el comportamiento más eficiente, con desplazamientos finales en el orden de los 8,8 mm debido a que se partió de una conexión precargada. Por su parte, la Probeta 3 mostró una deformabilidad mayor, alcanzando los 9,2 mm de desplazamiento para la misma carga máxima. Se destaca que la normativa Cirsoc 303 [11] limita la capacidad por aplastamiento a una deformación del orden de los 6mm del agujero por una cuestión de servicio.

MODELADO EN ELEMENTOS FINITOS

Para garantizar compatibilidad de resultados entre el ensayo y los modelos, se ensayaron tres probetas a tracción del material usado para la fabricación de las piezas, definido como ZAR250 según certificados, y se determinaron los valores específicos, obteniéndose una tensión de fluencia mínima $F_y=331$ MPa y de rotura mínima $F_u=427$ MPa. Estos valores se usaron para definir los materiales de ambos modelos. Se menciona como aspecto relevante la importante diferencia entre los valores mínimos normativos y los obtenidos por ensayo (F_y 32% mayor). Para el módulo de elasticidad se utiliza $E=210$ GPa y coeficiente de Poisson $\mu=0,30$.

Para el análisis de los modelos en elementos finitos se considera un material elastoplástico con diagrama tensión-deformación bilineal del acero. Se asume que es elástico hasta alcanzar la tensión de fluencia f_{yd} y luego la tensión se incrementa con una pendiente de $\tan^{-1}(E/1000)$, definido según EN1993-1-5, Par. C.6, (2).

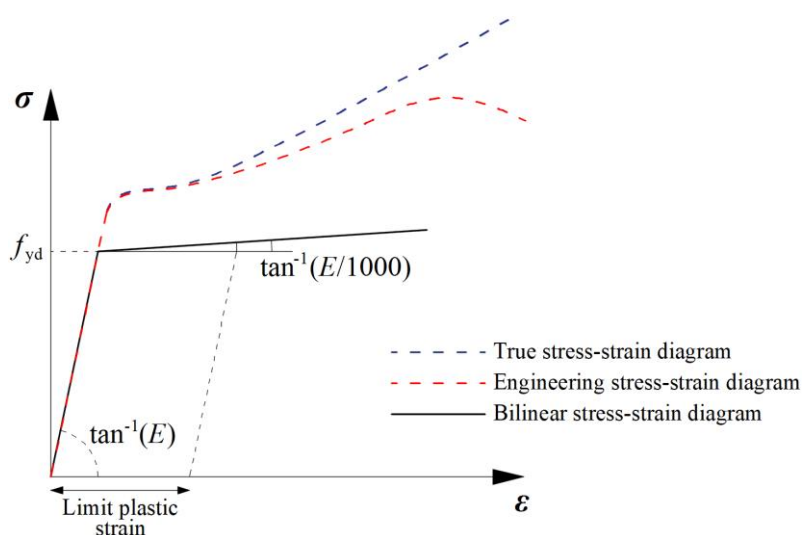


Figura 8. Diagrama tensión-deformación del acero utilizado en los MEF.

Para las conexiones de los elementos se utilizaron bulones A325. Características del bulón:

- Diámetro del bulón 15.88 mm (5/8")
- Diámetro del agujero 17.5 mm

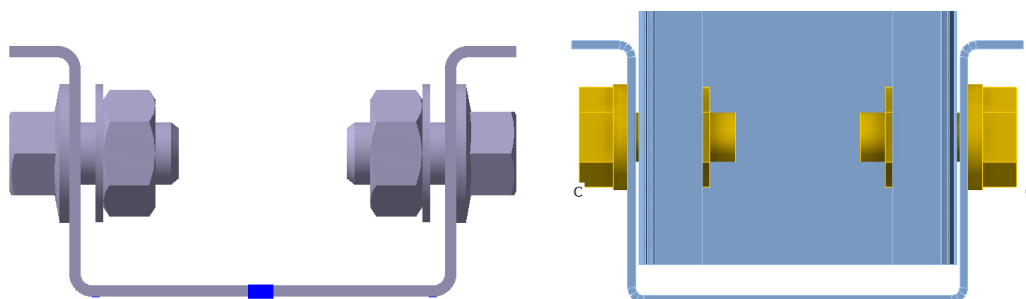


Figura 9. Modelo de nudo en SimSolid con los elementos de unión (Izq.). Modelo IDEA Statica con los elementos de unión (Der.)

Modelo en Idea Statica.

El software IDEA StatiCa, dentro del módulo Connection, 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 25.0.

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 local. 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. Esto puede comprobarse en la base teórica del software [7]

Un punto importante a destacar, descrito en [7], es como se define el elemento bulón o tornillo para modelar el contacto o no contacto entre este y las diferentes placas. El

conjunto del bulón está formado por el perno, la arandela y la tuerca; para esfuerzos de corte el programa contempla, mediante enlaces de interpolación, resortes no lineales entre el vástago y los nodos del borde del agujero. La rigidez de deformación del elemento que modela las chapas distribuye las fuerzas entre el bulón y simula el aplastamiento adecuado de la placa.

Debido a que el módulo Connection no permite obtener desplazamientos como resultado, se utiliza el módulo IDEA Statica Member [8], el cual permite analizar miembros completos considerando la rigidez de sus vínculos y forma de la carga actuante. Esta información se puede ampliar consultando la base teórica en la referencia mencionada.

La interfaz permite modelar la probeta T replicando las condiciones de borde del ensayo, donde, para simular el apoyo continuo del cordón, se genera un perfil de elevada rigidez que simula un apoyo fijo para el alma del cordón de la probeta. Se generan diferentes casos de carga en forma escalonada, aplicada sobre la cara superior del montante. Luego, para cada estado, se obtiene el desplazamiento vertical que sufre el montante producto de la deformación de los agujeros.

En la figura se observa la geometría del modelo y los resultados obtenidos en tensiones y desplazamientos de las placas.

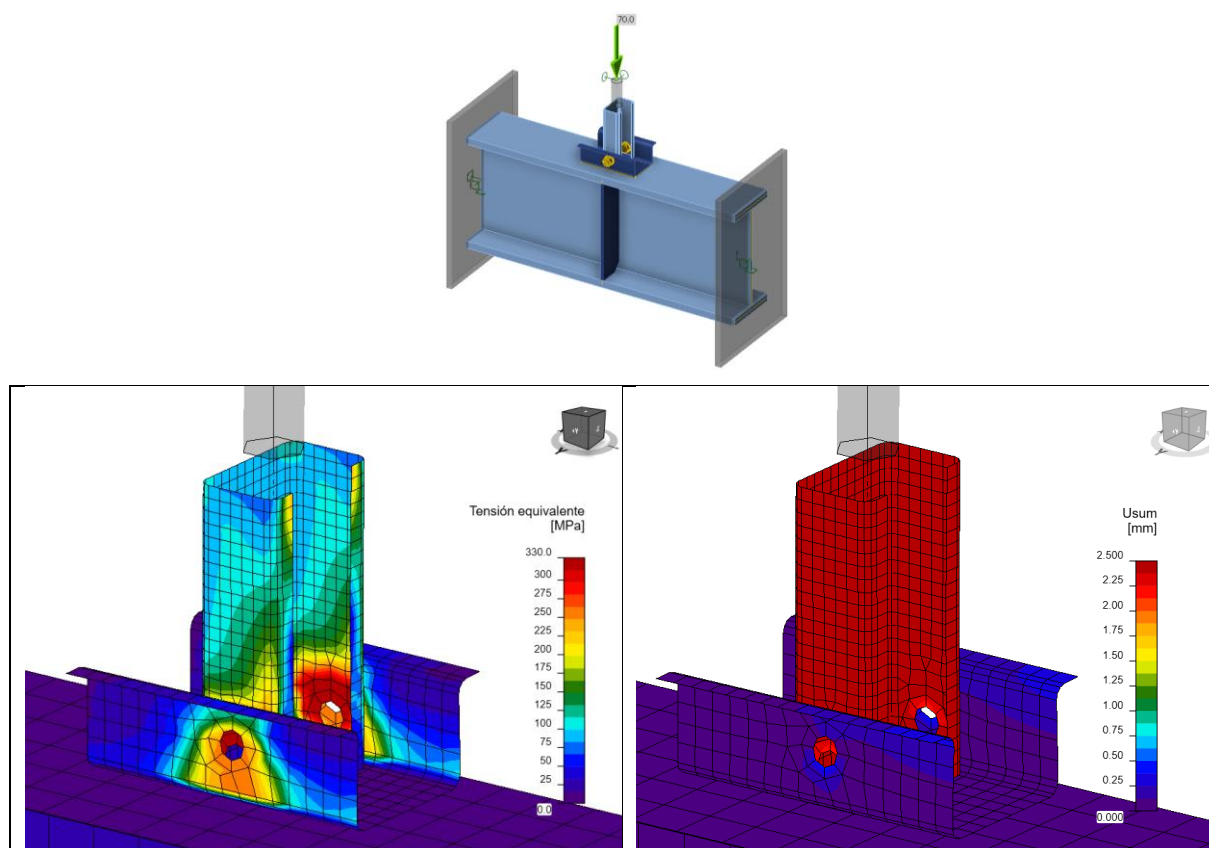


Figura 10. Modelo IDEA Statica. Tensión equivalente y desplazamiento vertical.

Modelo en SimSolid.

El estudio analítico del nudo se realizó también con el programa de elementos finitos SimSolid. Los resultados obtenidos en comparativa con los ensayos iniciales de los

nudos y vigas soldadas presentados en [12][13] y [14] demostraron ser efectivos. El análisis se realizó con la versión 2025.1 de Altair SimSolid [9]

El modelo analizado fue pensado desde un inicio formulando su ensayo. Consiste en el nudo detallado previamente conformado con perfiles de chapa tipo C y Omega. Los elementos que conforman la geometría fueron importados mediante un archivo CAD 3D de extensión .stp y en el entorno propio del software se generaron las uniones abulonadas, los escalones de cargas, las condiciones de contorno y la definición del modelo constitutivo del material.

Los vínculos para el modelo se definieron con el fin de lograr un comportamiento similar al ensayo mediante vínculos móviles en la cara de apoyo del cordón y se definió un vínculo superfluo a fines de completar la matriz de rigidez.

Los elementos de vinculación, si bien el programa puede tomarlos de forma automática frente a la elección del tipo de conexión, se deben configurar manualmente las diferentes interacciones con cada uno de los elementos de análisis. Para los elementos de conexión utilizados se consideró la condición de contacto entre elementos de transferencias de carga y las placas que conforman el perfil omega (separating/closing). En función de las diferentes condiciones de contorno de cada elemento se configuró el modelo buscando replicar el comportamiento en el ensayo.

Para el modelo constitutivo del acero de cordón y del montante, inicialmente se consideró un modelo elastoplástico perfecto, igual al utilizado para el ensayo de las probetas soldadas [12][13][14]. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios y se cambió a un modelo elastoplástico con endurecimiento siguiendo los mismos lineamientos que los utilizados para el modelo de Idea Statica (Figura 8).

Las cargas axiales se aplican sobre la cara superior del montante y se realiza un análisis por cada escalón de carga a evaluar de 10kN a 100kN.

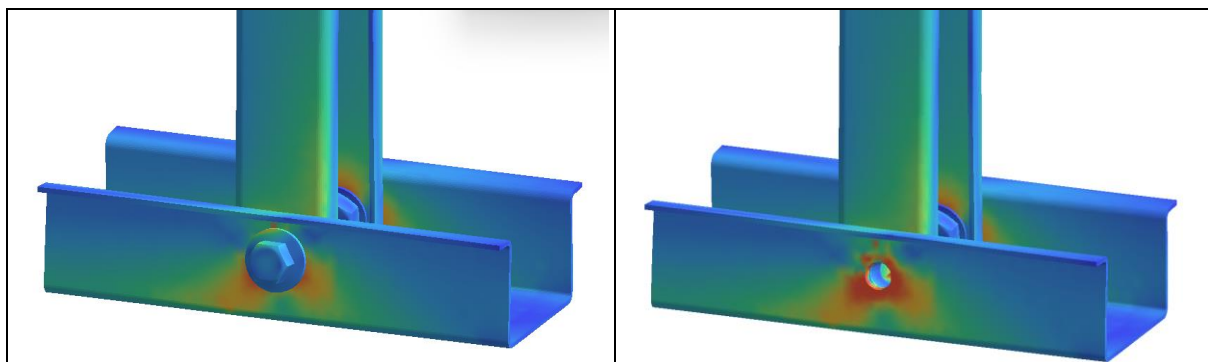


Figura 11. Modelo Sim Solid. Tensiones locales.

Comparativa de resultados. Ensayos y modelos

Sobre una misma gráfica se vuelcan las curvas carga-deformación obtenidas de los resultados de ensayo de la probeta, como también los obtenidos mediante ambos programas de elementos finitos.

Los resultados del Sim Solid, arrojan curvas muy diferente al ensayo. Se observa un comportamiento con una rigidez muy elevada frente a las otras gráficas. Se interpreta

que esto se debe a la complejidad del modelado del enlace bulón-placa donde el aplastamiento y el incremento de tensión en el elemento placa se va dando en forma progresiva y que el software no contempla con nivel de detalle suficiente. La curva denominada SIMSolid en la Figura 12, corresponde a una definición de material bilineal sin endurecimiento pasado el límite elástico. Se observa una diferencia notable en el comportamiento con la curva SIMSolid End que responde a un modelo con la ecuación constitutiva con endurecimiento de acuerdo con lo mostrado en la Figura 8.

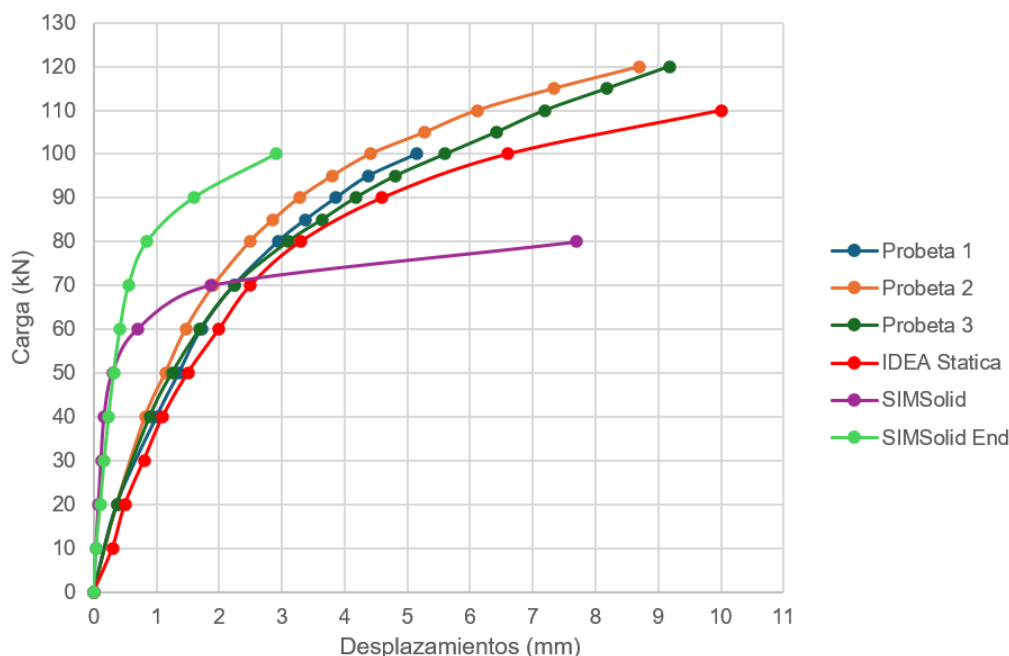


Figura 12. Comparativa de curvas carga-deformación.

El comportamiento presentado por el modelo en Idea Statica es muy similar a las curvas de ensayos, e incluso algo conservador. De acuerdo a lo indicado en las bases teóricas del Idea Statica [7], la simulación numérica utilizada para la conexión entre bulón y placas ha sido comparada y validada con múltiples experimentos reales.

En base a los resultados obtenidos, se descarta para las siguientes fases del proyecto el uso de SimSolid dado que no muestran un acoplamiento razonable a los valores obtenidos de los ensayos. En cambio, si lo hace el Idea Statica que en este caso es el software que se utilizará para las fases posteriores del proyecto. Se destaca que en el caso de la conexión soldada analizada en trabajos anteriores [12], el SimSolid lograba resultados muy cercanos a los de ensayos mientras Idea Statica tuvo que ser descartado por la falta de aproximación al comportamiento observado en la realidad. Esto refuerza la importancia de entender el funcionamiento de cada software y las teorías utilizadas para su desarrollo para ser utilizados de forma apropiada. No todo modelo es representativo del comportamiento real, aunque física y geoméricamente se parezca.

Comparativa con nudo soldado

Dado que uno de los objetivos del proyecto es comparar la eficiencia y comportamiento entre las celosías con nudos soldados analizadas en trabajos anteriores y las vigas reticuladas con uniones abulonadas entre barras, se hace una

primera comparativa de los resultados obtenidos para las probetas T de cada caso. En la gráfica siguiente se presentan los resultados como valores promedios de las mediciones de las probetas para cada caso. La diferencia de comportamiento es notable, dada la falta de rigidez de la conexión soldada por la flexibilidad del labio rigidizador del cordón C y por la baja capacidad del nudo debido a la plastificación temprana del cordón por la flexión que se produce en dicho labio.

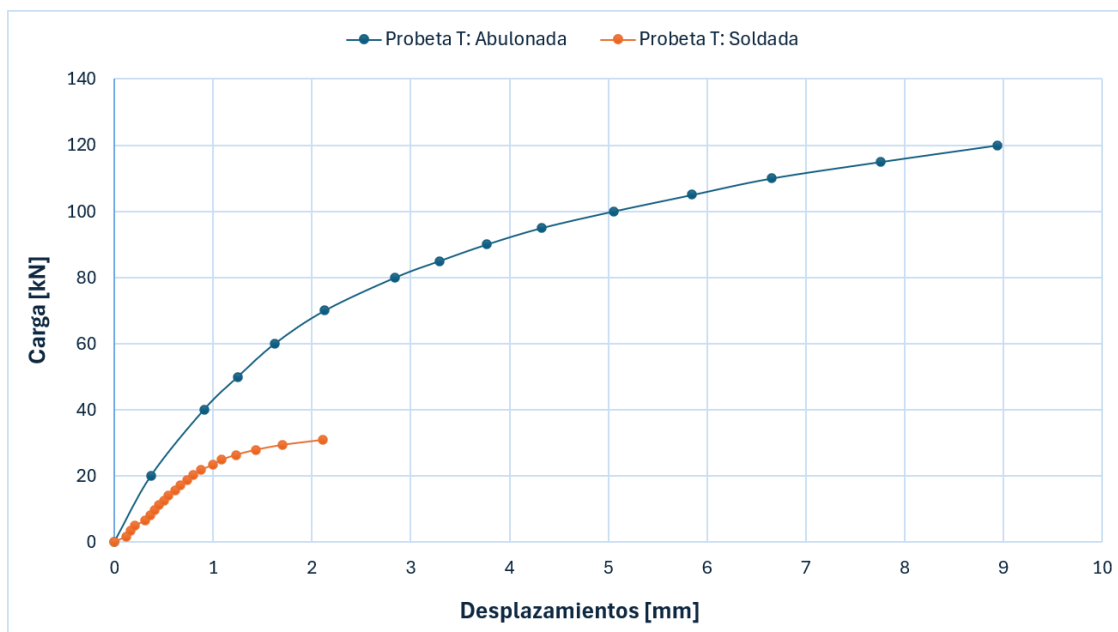


Figura 13. Comparativa de curva carga deformación entre probetas T soldadas a labio rigidizador de cordón y probetas abulonadas a las alas del cordón omega

COMPARATIVA COMPORTAMIENTO NUDOS EN N (VIGA PRATT) Y NUDOS EN V (VIGA WARREN)

Con el objetivo de analizar, desde el punto de vista del comportamiento del nudo, que tipo de viga sería más conveniente entre un esquema tipo Pratt y uno tipo Warren, se modelan ambas soluciones para determinar las máximas capacidades y estados límites últimos que gobiernan el diseño. Como se ha mencionado, en este tipo de conexiones sin medios auxiliares, en general se presentan excentricidades en el nudo por cuestiones constructivas. Este desvío de las hipótesis ideales genera esfuerzos de corte y momentos flectores en el cordón. Con estos modelos se evalúa la incidencia de estas solicitaciones adicionales y se comparan con el resto de los estados límites últimos. En función de la comparativa mostrada entre los resultados de los modelos y el ensayo de la probeta T, ambos modelos se realizan con Idea Statica. Al ser modelos que se usan para realizar un análisis comparativo, las secciones no son las mismas de los ensayos, utilizándose espesores de 2,5mm para evaluar mejor la incidencia de las posibles plastificaciones locales debido a las excentricidades.

Modelos de nudos en V

Se generan dos modelos con diferente excentricidad entre diagonales. El Nudo V1 representa el caso típico de una conexión donde la excentricidad es la mínima que permite la geometría. Mientras que el Nudo V2 presenta una excentricidad mayor a 3

veces la típica.

Luego de un proceso iterativo se obtiene la carga última en la diagonal, mediante la cual se alcanza un 5% de deformación plástica en el nudo. La misma es de 62 kN, siendo 31 kN por bulón, para ambos modelos. Se observa que el límite se obtiene por las tensiones producidas por el aplastamiento de la chapa y no por interacción de esfuerzos de corte y momento que generan el aumento de excentricidad. Respecto de esto último, se observa en el modelo un aumento de las tensiones debidas a los efectos del incremento en la excentricidad, de tan sólo el 7.5% de la tensión de fluencia entre los casos extremos.

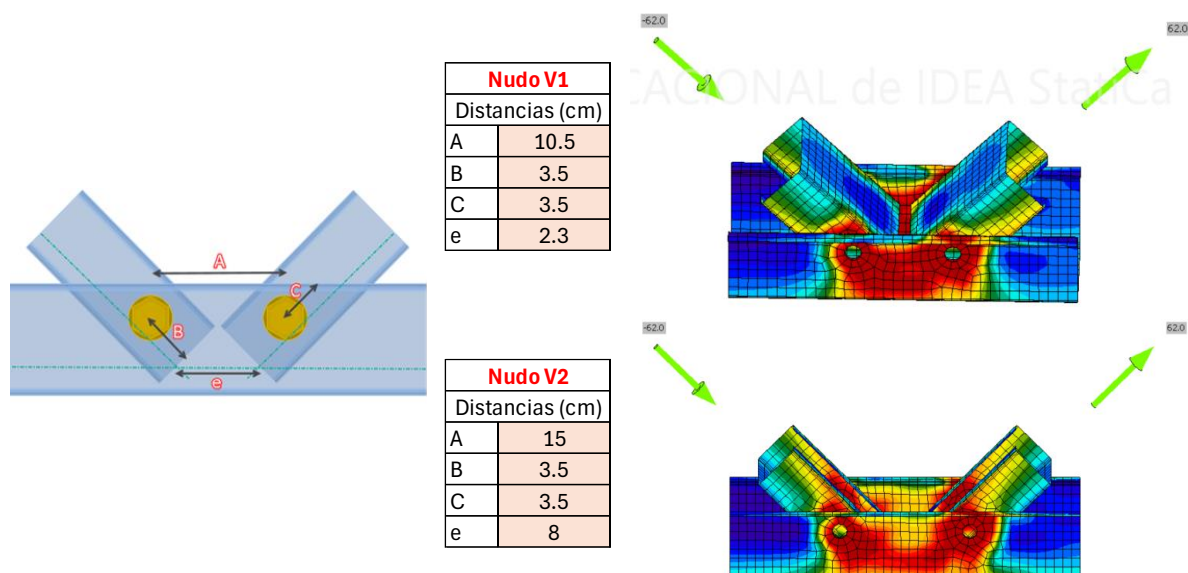


Figura 14. Modelos de nudos en V. Geometría de casos extremos.

Para la determinación de las capacidades de los correspondientes ELU, el software utiliza las ecuaciones definidas en ANSI/AISC 360-22 y no es lo apropiado dado que se trata de elementos conformados en frío de delgado espesor y que no se encuentran comprendidos dentro de la especificación mencionada. Nuevamente se destaca la importancia de evaluar el software a utilizar en todas sus dimensiones.

En la siguiente tabla se resumen los estados límites de los diferentes elementos según lo indica en la normativa vigente. Para determinar la capacidad por aplastamiento y desgarro en la chapa se siguen los lineamientos del reglamento CIRSOC 303-09. Se considera para el aplastamiento a la deformación como un condicionante de diseño dado que estas estructuras están sometidas acciones reversibles debido a la succión del viento en la cubierta, y no se considera apropiado trabajar con agujeros con deformaciones importantes ante estas circunstancias.

Estado límite por bulón	Capacidad (kN)
Corte bulón	69.8
Aplastamiento en diagonal/montante	22.1
Aplastamiento en cordón	22.1
Desgarro en diagonal/montante	24.5
Desgarro en cordón	24.5

Tabla 1- Nudo viga tipo Warren (V). Capacidades por ELU.

Modelos de nudos en N

Se desarrollaron modelos con distintos niveles de excentricidad entre diagonales. El nudo N1 representa la configuración de referencia, correspondiente a una conexión con la excentricidad mínima compatible con las restricciones geométricas del sistema. Por su parte, el nudo N2 presenta una excentricidad significativamente mayor, superior a tres veces la correspondiente al caso de referencia.

Realizado el análisis iterativo se obtiene la carga última en la diagonal y los resultados y conclusiones son muy similares al caso del modelo con las diagonales en V. Las limitaciones del nudo pasan por los estados límites últimos de aplastamiento y desgarr (plastificación local) y no por las tensiones debidas a la excentricidad teórica por la falta de concurrencia de los ejes baricéntricos de las barras.

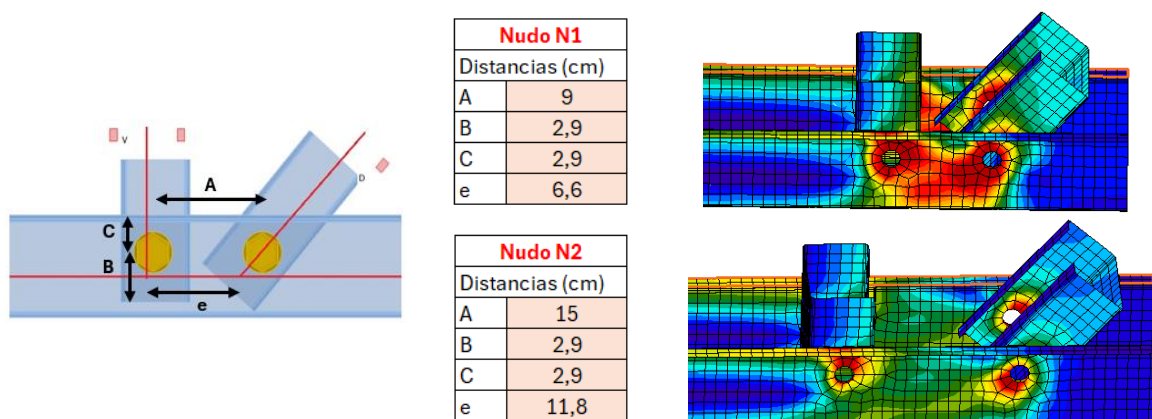


Figura 15. Modelos de nudos en N. Geometría de casos extremos.

En la siguiente tabla se resumen los estados límites de los diferentes elementos según lo indica en la normativa vigente, al igual que se hizo con el caso de nudo en V.

Estado límite por bulón	Capacidad (kN)
Corte bulón	70,0
Aplastamiento en diagonal	22.1
Aplastamiento en montante	22.1
Aplastamiento en cordón	22.1
Desgarro en diagonal	24.5
Desgarro en montante	20.3
Desgarro en cordón	20.3

Tabla 2- Nudo viga tipo Pratt (N). Capacidades por ELU.

Los resultados de los modelos de nudos muestran que la excentricidad no es determinante como estado límite último por la flexión y cortante que incorporan al cordón. Se observa que los estados que gobiernan el diseño son los correspondientes al aplastamiento y al desgarr en el extremo de la conexión. Las capacidades por desgarr son menores en la solución tipo Pratt dado que las distancias a borde en los montantes son menores que en las diagonales.

ACCIONES FUTURAS

Si bien el comportamiento de esta conexión es mucho más eficiente que la conexión

soldada estudiada y ensayada en trabajos anteriores [12][13][14], previo a definir el tipo de viga más conveniente a ensayar, se analizarán posibles acciones para mejorar la capacidad de los estados límites últimos determinantes, dado que están muy por debajo de la capacidad de los bulones utilizados. Para ello se analizarán las siguientes variantes

Capacidad de aplastamiento y desgarro con labio rigidizador en borde

Para el análisis de estos dos estados límites, el borde de la diagonal es libre y se verifica según lo especificado en [11], sin embargo, el borde correspondiente a la omega tiene un pliegue y no está analizado en la bibliografía si esta geometría mejora la capacidad de desgarro y/o aplastamiento. En caso de que haya una mejora, se podría disponer el bulón incrementando la distancia al borde de la diagonal y tener una mejora en la capacidad de la conexión. Para esto se realizarán ensayos con probetas de chapas planas y chapas con el pliegue en el borde, para comparar los resultados, observar el comportamiento y evaluar si es posible incrementar la capacidad por este motivo.

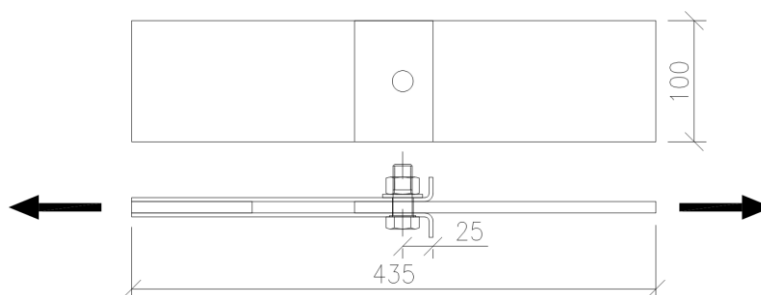


Figura 16. Probetas para futuros ensayos de desgarro y aplastamiento con borde extremo plegado.

Estudio de soluciones alternativas para mejorar capacidad a aplastamiento

Debido la importante diferencia entre la capacidad a aplastamiento y desgarro, con el resto de los estados límites, se analizarán algunas soluciones para mejorar la resistencia de estos fenómenos. Se trabajará sobre la viabilidad de los siguientes conceptos para mejorar la capacidad de los estados mencionados:

- Calidad de acero. Al aumentar F_u aumenta la capacidad de desgarro y aplastamiento. Si el aumento en el costo es inferior a la proporción en que se incrementa la resistencia, es una solución que puede ser conveniente para casos en los que se requiera mayor capacidad de carga. En Argentina se produce un acero ZAR340 con 340 Mpa de tensión de fluencia.
- Aumento de espesor. Para esto se puede pensar en incorporar refuerzos locales como arandelas o planchuelas soldadas o abulonadas en la zona de la conexión. Otra posibilidad es realizar una especie de “cuello” en el perímetro del agujero que incremente el área de contacto entre el bulón y la chapa. Esto se puede realizar mediante técnicas como embossing o hole flanging que se utilizan en racks industriales y en steel framing.

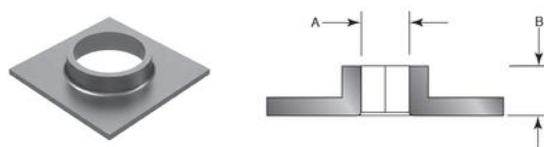


Figura 17. Concepto de embossing o hole flanging para incrementar área de contacto entre perforación y bulón.

- Profundizar en el estudio de los resultados de la capacidad de aplastamiento y desgarro de los ensayos realizados y futuros, dado que se observa que los valores de capacidad determinados mediante las formulaciones del Cirsoc 303-09 [11] parecen ser altamente conservadores.

Ensayo de viga a escala real.

Definidas las mejoras locales a aplicar con el objetivo de aumentar la capacidad de la conexión, se realizarán ensayos de vigas en escala real con la misma geometría general de las vigas ensayadas en [13]. Dado que los modelos en SimSolid no logran reproducir de forma apropiada el comportamiento de la conexión, no se modelará la viga completa como se hizo en el caso de las vigas soldadas en [13] y [14] y cobra especial importancia el ensayo, para evaluar el comportamiento del conjunto y poder obtener conclusiones. Sobre todo, se pretende analizar la rigidez general debido a la presencia de conexiones abulonadas que tienen juego y a las deformaciones locales de las perforaciones debidas al aplastamiento.

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. Muchas veces se observa que los detalles de encuentro entre barras no se cuidan lo suficiente en la práctica diaria cuando se utiliza este tipo de celosías. El caso analizado en trabajos anteriores (Ruffo et al., 2024) de nudos soldados, es un ejemplo claro de falta de diseño en la conexión, resultando vigas muy ineficientes por la baja capacidad de los nudos respecto de la resistencia posible de desarrollar por las barras. Por esto último, se plantea el estudio de conexiones abulonadas usando cordones con secciones omega que permiten una transferencia más clara y directa de los esfuerzos entre los miembros de la celosía, manteniendo la condición de no utilizar medios auxiliares para la conexión.

Para analizar el comportamiento de esta nueva propuesta de nudos, se hicieron ensayos en escala real y se compararon los resultados con modelos no lineales de elementos finitos de placas, realizados en dos softwares diferentes. Además, se determina la capacidad límite de la unión en base a los estados límites últimos posibles en el nudo.

De los ensayos y modelos analizados se puede concluir:

- El modelo en Idea Statica aproxima de forma aceptable el comportamiento observado en la curva carga-deformación de las 3 probetas ensayadas, siendo algo conservador en los valores de capacidad de carga. Este modelo utiliza una

ecuación constitutiva bilineal del acero, con endurecimiento una vez superado el límite elástico.

- El modelo de SimSolid no logra aproximarse a lo observado en las probetas ensayadas, mostrando un comportamiento mucho más rígido y resultando capacidades de carga muy inferiores.
- Al no utilizar elementos auxiliares para la conexión, se introducen excentricidades en el nudo. Las solicitaciones de flexión y corte que se presentan por este motivo no son determinantes en la capacidad de la conexión.
- Los estados límites últimos determinantes en el diseño de la unión, corresponden al desgarro y aplastamiento de la chapa contra el bulón, limitando la capacidad prácticamente al 30% de la resistencia al corte de los bulones utilizados.
- La capacidad de la conexión, gobernada por el estado límite último de aplastamiento, es aproximadamente 2 veces superior a la determinada para la misma probeta con la conexión soldada al labio rigidizador según [12]
- En las siguientes etapas del proyecto se evaluarán posibles actuaciones para mejorar la resistencia por aplastamiento, previo a la definición y ensayo en escala real de una viga con esta tipología de nudos.

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 Zagórowska, 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] Mathieson, C., Charles Clifton, G., y Lim, J., 2016. "Novel pin-jointed connection for cold-formed steel trusses". *Journal of Constructional Steel Research*, 116, pp. 173–182.
- [5] Mathieson, C., Roy, K., Charles Clifton, G., Ahmadi, A., y Lim, J., 2019. "Failure mechanism and bearing capacity of cold-formed steel trusses with hrc connectors". *Engineering Structures*, 201, p. 109741.
- [6] Wei Wang, Krishanu Roy, Hooman Rezaeian, Zhiyuan Fang, James B.P. Lim, 2025 "Moment Capacity of cold-formed steel trusses with Howick Rivet Connectors: Tests, modelling and design" *Engineering Structures*, 322, p. 119171.
- [7] 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>*
- [8] IDEA StatiCa Member – *Member Stability | <https://www.ideastatica.com/es/support-center/idea-statica-member-theoretical-background>*
- [9] *Structural analysis for rapid design iterations | Altair Simsolid. (s.f.). Default. <https://altair.com/simsolid>*
- [10] CIRSOC 304 (2007) *Reglamento argentino para la soldadura de estructuras de acero*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial
- [11] CIRSOC 303 (2009) *Reglamento argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío*, Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial
- [12] Avendaño L., Erck P., Ruffo H. (2023). *Nudos soldados en vigas reticuladas con perfiles conformados en frío. Análisis y comportamiento. Revista IE N°76, diciembre 2023, ISSN 16671511 (año 27). Página 28*

- [13] 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.*
- [14] Ruffo, H. M., Ferreras, M. E., Avendaño, L., & Erck, P. (2024). *Vigas reticuladas en base a perfiles conformados en frío con nudos soldados: Análisis de eficiencia. Revista Tecnología Y Ciencia, (51), 18–32. <https://doi.org/10.33414/rtyc.51.18-32.2024>*

Colaboradores: Ing. María Emilia Ferreras. Becarios alumnos: Fausto Ezequiel González y Hernán Sergio Travesani

Agradecimientos: a Cinter SRL por la donación de las probetas de nudos para los ensayos.