



Software para Arquitectura,
Ingeniería y Construcción

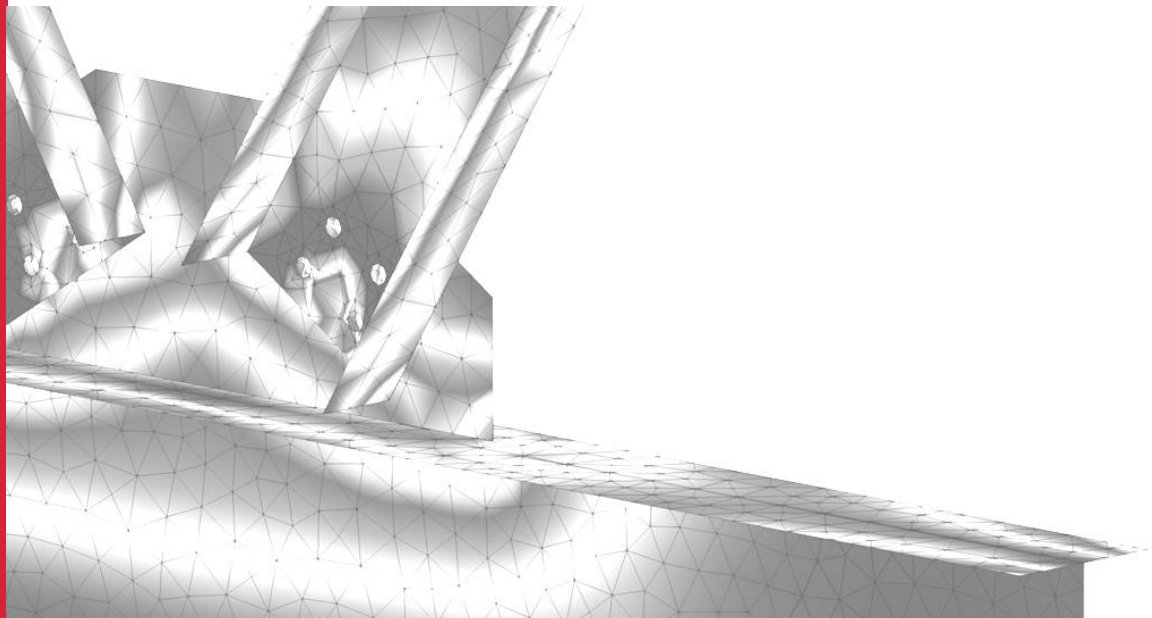


CYPE Connect

Memoria de cálculo

Modelado y análisis de uniones para estructuras de acero. Esta aplicación está integrada en el flujo de trabajo

Open BIM a través de la plataforma BIMserver.center.





Índice

1	Análisis.....	3
1.1	Introducción.....	3
1.2	Modelo de Placa.....	4
1.3	Soldaduras.....	5
1.4	Tornillos.....	6
1.4.1	Comportamiento del vástago.....	6
1.4.2	Transmisión de fuerzas de tracción a la placa.....	9
1.4.3	Comportamiento de apoyo.....	10
1.4.4	Transmisión de cargas.....	11
1.5	Contacto.....	12
1.6	Cargas y condiciones de contorno.....	12
1.6.1	Apoyos.....	12
1.6.2	Cargas.....	13
2	Referencias.....	15

1 Análisis

1.1 Introducción

El cálculo de uniones supone uno de los problemas más complejos en ingeniería estructural. La forma habitual de enfrentarse a este problema a lo largo de los años ha sido a través del uso de hipótesis simplificadoras y experiencia, mediante cálculos a mano u hojas de cálculo. No hace mucho tiempo no existía la necesidad legal de validar decenas o centenas de combinaciones de carga y los factores de seguridad eran más altos que hoy en día.

Actualmente, existen más restricciones de diseño y los factores de seguridad se han reducido, lo que provoca que la exactitud en el cálculo suponga un aspecto crucial.

La forma tradicional de enfrentarse al cálculo de uniones puede ser útil en determinadas situaciones, pero hoy en día nos enfrentamos a diseños más complejos.

Cuando se analiza la estructura mediante un modelo de barras no se realiza un modelo detallado de las uniones que la componen. Para diseñar la unión de manera correcta es necesario generar un modelo de conexión que respete la disposición real de la misma considerando, además, las fuerzas que se ejercen en los extremos de los miembros que componen la unión que se obtienen a partir de la resolución del cálculo de la estructura.

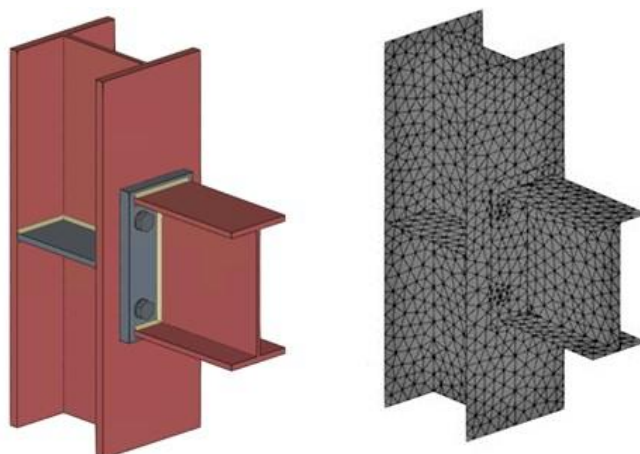
Mediante el uso de análisis por Elementos Finitos es posible abordar este problema con mayor eficacia y exactitud.

CYPE Connect es una herramienta que permite generar modelos de uniones de estructura metálica basados en Elementos Finitos, así como su cálculo y verificación según criterios normativos, con una intervención mínima o nula por parte del usuario, utilizando el software de Elementos Finitos de renombre mundial OpenSees [1] como motor de cálculo.

En los modelos de elementos finitos que genera CYPE Connect se distinguen tres elementos principales: placas, soldaduras y tornillos.

Las placas constituyen todos aquellos elementos planos (la dimensión del espesor es mucho menor que el resto de dimensiones) que intervienen en el modelo estructural de la unión como, por ejemplo, los elementos planos que forman los perfiles metálicos, las placas que se utilizan para realizar uniones atornilladas, los rigidizadores, etc. En la figura 1.1 es posible observar una comparativa entre el modelo geométrico real de la unión y el modelo discretizado de la misma. Este modelo de placa se describirá con más detalle en la sección 1.2.

Los tornillos y soldaduras constituyen los elementos de conexión del modelo y sus características se describirán con más detalle en las secciones 1.3 y 1.4.



(a) Modelo geométrico real de la unión (b) Modelo discretizado de la unión.

Figura 1.1. Discretización de placas mediante Elementos Finitos.

1.2 Modelo de Placa

En estructuras en las que el espesor es significativamente menor al resto de dimensiones, como es el caso de las placas que forman estructuras metálicas, los elementos tipo *Shell* constituyen una buena solución (sección 29.6.1 en [2]). El elemento utilizado será el elemento triangular Shell NLDKGT [3] con tres nodos.

Estos elementos tienen en cuenta el comportamiento de membrana (tensión en el plano, compresión, cortante y momento torsor) y el comportamiento de placa (momento fuera del plano). En rango no-lineal, el comportamiento de placas se modela utilizando secciones por capas. El espesor de la placa se divide en un número de capas (en este caso 5) donde el problema a resolver es de tensión plana. El cálculo de los momentos flectores se realiza sumando los efectos de cada capa y ya no es posible considerar que las tensiones en el espesor de la placa se obtienen sumando los efectos de la membrana y el comportamiento a flexión como ocurriría en el análisis lineal (sección 9.2.4 en [4]).

En elementos finitos, para calcular las integrales necesarias, se utilizan técnicas de integración numérica. Si la no linealidad de material está activada, la integración numérica necesaria para calcular la matriz de rigidez no se realiza únicamente en la superficie (donde se utilizan los puntos de *Gauss*), sino que también se realiza en el espesor.

Este modelo de placa se utilizará para discretizar los elementos planos que forman los perfiles metálicos y para discretizar otras placas que intervienen en el modelo estructural, como pueden ser las placas que se utilizan para realizar uniones atornilladas o rigidizadores. En definitiva, este modelo de placa se utilizará para discretizar cualquier elemento plano que intervenga en el modelo estructural de la unión.

Los diagramas de materiales más comunes que se utilizan en el modelado de elementos finitos de acero estructural son el modelo plástico ideal o elástico ideal con endurecimiento por deformación. La ley constitutiva seleccionada para las placas y perfiles será una ley constitutiva bilineal con una pendiente en el tramo plástico $\tan^{-1}(E/1000)$.

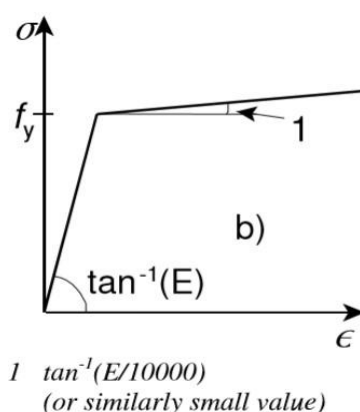


Figura 1.2. Ley constitutiva del acero en placas [5].

1.3 Soldaduras

Las soldaduras constituyen uno de los elementos conectores en las uniones. Existen diversas opciones para modelar las soldaduras.

Una opción ampliamente utilizada para su modelado, que es la que se emplea en CYPE Connect, es la conexión directa entre placas a soldar mediante restricciones de fuerza-deformación, o también denominadas, restricciones multipunto (Multi Point Constraints). La técnica de modelado de soldaduras mediante enlaces rígidos fue sugerida por Fayard y Bignonnet (1996) [6], y se basa en modelar la rigidez local de las uniones soldadas uniendo dos elementos *Shell* adyacentes a través de sus nodos a lo largo de la longitud de la soldadura. La utilización de enlaces rígidos para la modelización de soldaduras se puede encontrar en diversos documentos científicos como en [7], [8], [9] o [10].

En CYPE Connect, los nodos del extremo de la superficie a soldar se proyectan perpendicularmente sobre la superficie a la que se suelda. Los enlaces rígidos conectan cada uno de los nodos del extremo de la superficie a soldar y los nodos proyectados.

Además, estos nodos proyectados se relacionan a través de MPC con los nodos circundantes teniendo en cuenta las funciones de interpolación del campo de deformaciones del elemento sobre el que se proyecta dicho nodo. Mediante la aplicación de este método se respeta el espesor de la garganta de la soldadura así como la configuración real de la misma.

La principal ventaja de este método es que permite conectar mallas de diferentes densidades. En la imagen 1.3 se observa el modelado de la soldadura mediante elementos rígidos y MPC en CYPE Connect.

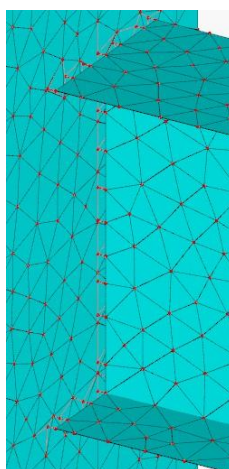


Figura 1.3. Modelado de soldaduras en CYPE Connect.

1.4 Tornillos

Se diferencian tres comportamientos en los elementos que modelan los tornillos. Comportamiento del vástago del tornillo a tracción y cortante, transmisión de fuerzas de tracción a la placa y comportamiento de apoyo de la placa en el tornillo.

1.4.1 **Comportamiento del vástago**

Para modelar el comportamiento del vástago del tornillo se utilizarán muelles no lineales que simulan el comportamiento a tracción y muelles lineales que simulan el comportamiento a cortante. Las rigideces iniciales se obtienen a partir de la normativa correspondiente. Para modelar el comportamiento elastoplástico del vástago a tracción se utilizará una ley de material bilineal que se basa en curvas de tensión-deformación de tornillos propuestas en diferentes trabajos de investigación como [11], en la que se considera que la tensión última se produce para una deformación del 5%. La ley bilineal de este comportamiento se puede observar en la figura 1.4.

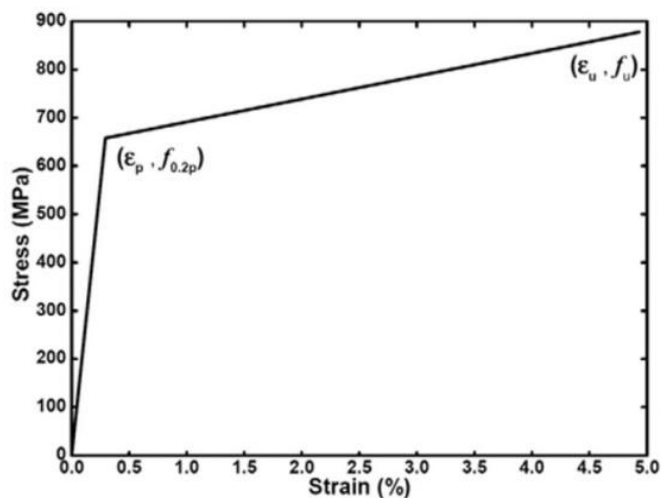


Figura 1.4. Diagrama Tensión-deformación del tornillo [11]

Este modelo de vástago de tornillo mediante el uso de elementos tipo muelle con rigideces obtenidas a partir de normativa se encuentra también en otros documentos científicos como en la sección 7.5 en [4].

A continuación, se muestra un ejemplo de las ecuaciones que representan estas leyes bilineales aplicando las rigideces que se encuentran en el Eurocódigo.

Comportamiento a tracción

La ley bilineal fuerza-desplazamiento del comportamiento a tracción que se basa en la ley de comportamiento mencionada anteriormente en la sección 1.4.1 se observa en la figura 1.5.

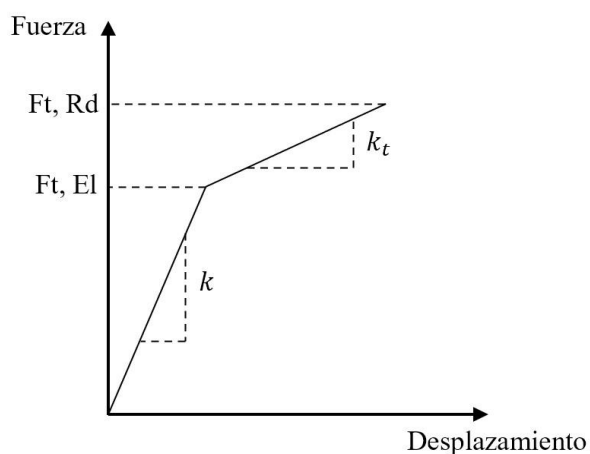


Figura 1.5. Diagrama Fuerza-desplazamiento del tornillo a tracción

De acuerdo con EN1993-1-8 tabla 6.3.2 [12] la rigidez inicial k será:

$$k = \frac{EA_s}{L_s} \quad (1.1)$$

donde E es el módulo de elasticidad del tornillo, A_s es el área de la sección transversal del tornillo efectiva en tensión (área roscada) y L_b la longitud de alargamiento, es decir, longitud de agarre del tornillo (suma de los espesores de elementos sujetos por el tornillo), espesor de las arandelas, la mitad del espesor de la tuerca y la mitad del espesor de la cabeza del tornillo.

Las ecuaciones que describen la ley bilineal son:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.2)$$

$$F_{t,El} = \frac{k_2 f_{yb} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (1.3)$$

$$c = \left(\frac{f_{us} - f_{yb}}{0,05 - \frac{f_{yb}}{E}} \right) / E \quad (1.4)$$

$$k_t = c \cdot k \quad (1.5)$$

donde

- $F_{t,Rd}$: La resistencia límite del tornillo a tracción según EN1993-1-8 tabla 3.4 [12]
- $k_2 = 0.9$ (0.63 para tornillos avellanados)
- f_{ub} : Tensión última del tornillo (ISO 898:2013 [13])
- f_{yb} : Tensión de límite elástico del tornillo (ISO 898:2013 [13])
- γ_{M2} : Factor parcial de seguridad EN1993-1-8 tabla 2.1 [12] (valor recomendado $\gamma_{M2} = 1,25$)

Comportamiento a cortante

De acuerdo con lo mencionado en [4] el comportamiento a cortante del vástago del tornillo se puede modelar mediante un muelle lineal con una rigidez determinada.

De acuerdo con lo señalado en EN1993-1-8 tabla 6.3.2 la rigidez del tornillo a cortante k será:

$$k = \frac{16n_b d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (1.6)$$

- n_b : Número de filas de tornillos trabajando a cortante
- d : Diámetro del tornillo
- d_{M16} : Diámetro de tornillo M16, 16 mm

Si se tiene en cuenta lo señalado en [4], la rigidez de un tornillo a cortante puede considerarse como

$$k = \frac{8d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (1.7)$$

1.4.2 **Transmisión de fuerzas de tracción a la placa**

El mallado de la placa con agujero para el tornillo se realizará como se muestra en la figura 1.6.

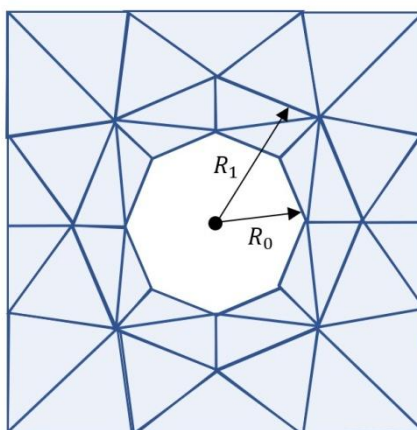


Figura 1.6. Malla de placa con agujero

El diámetro del agujero es $D = 2R_0$ y el parámetro R_1 representa la longitud de los enlaces que se describen a continuación.

El comportamiento de transmisión de fuerzas de tracción a la placa se modela mediante enlaces rígidos entre el nodo del centro de la abertura y los nodos del octógono exterior que transmiten las fuerzas de tracción en la dirección perpendicular al plano de las placas conectadas.

En la figura 1.7 se representa la conexión de estos enlaces de interpolación con nodos de la placa.

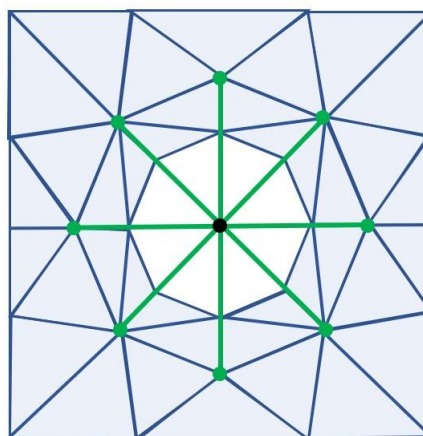


Figura 1.7. Representación de enlaces de conexión (elementos color verde) con nodos de la placa.

1.4.3 **Comportamiento de apoyo**

El comportamiento de apoyo se modela mediante enlaces entre el nodo interior de la abertura y los nodos situados en el borde de la misma. En estos enlaces se considera la rigidez de apoyo del tornillo en la placa. Este mallado se puede observar en la figura 1.8.

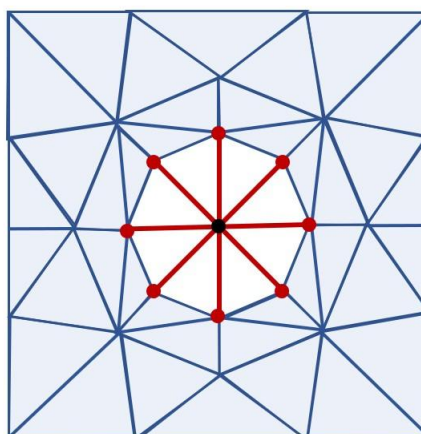


Figura 1.8. Representación de enlaces (elementos color rojo) que representan el comportamiento de apoyo de la placa y el tornillo.

La rigidez global ejercida por estos ocho elementos de conexión (elementos color rojo figura 1.8) es cuatro veces la rigidez axial de cada uno de estos elementos (sección 10.3.3 en [4]). Esto significa que cualquiera que sea la dirección de la fuerza aplicada en el nodo central común a los ocho elementos, la rigidez aparente siempre será cuatro veces la rigidez axial de un elemento radial.

Si se considera que estos ocho elementos solo trabajan a compresión, como es el caso de CYPE Connect, la rigidez de cada radio, de acuerdo con lo descrito en la sección 10.3.3 en [4], sería:

$$k_N = 0,5k \quad (1.8)$$

siendo k la rigidez de apoyo que se encuentra en diferentes normativas.

En el caso del Eurocódigo la rigidez de apoyo será, según lo descrito en EN1993-1-8 tabla 6.3.2 [12]

$$k = 24n_b k_b k_t d f_u \quad (1.9)$$

Si se tiene en cuenta lo descrito en la sección 7.5.1. en [4], la rigidez inicial de apoyo se puede considerar como

$$k = \frac{22,5 t d f_u}{d_{M16}} \quad (1.10)$$

donde

- f_u : Tensión última del acero en el que se apoya el tornillo
- t : Espesor del componente en el que se apoya el tornillo
- d : Diámetro del tornillo
- d_{M16} : Diámetro de tornillo M16

1.4.4 **Transmisión de cargas**

En CYPE Connect el modelo de unión atornillada se realiza conectando las placas con un modelo de tornillo en el que las cargas se transmiten desde los nodos de la primera placa a un único nodo, este nodo transmite las cargas a un segundo nodo a través de un elemento que simula el comportamiento del vástago y este segundo nodo transmite estas cargas a nodos de la segunda placa.

Esta forma de transmitir cargas entre placas a través de conexiones nodo a nodo se puede encontrar en numerosos documentos científicos como en [4], [14], [15], [16], [17] o [18].

1.5 Contacto

El comportamiento de contacto entre los componentes que se unen se realiza mediante la inclusión de elementos de conexión entre nodos que trabajan únicamente a compresión con una rigidez muy elevada. Si el mallado no es conforme, se proyectan los nodos de una superficie a otra en la dirección perpendicular a las superficies y se relacionan los grados de libertad mediante las funciones de forma de los elementos y Multi Point Constraints. Se conectan los nodos con sus nodos proyectados correspondientes y se incluyen estos elementos que solo trabajan a compresión (figura 1.9) con rigideces muy elevadas evitando el acercamiento entre ambos nodos.

El modelado de relaciones de contacto mediante conexiones nodo a nodo se menciona en numerosos artículos científicos como en [15], [19] o [20].

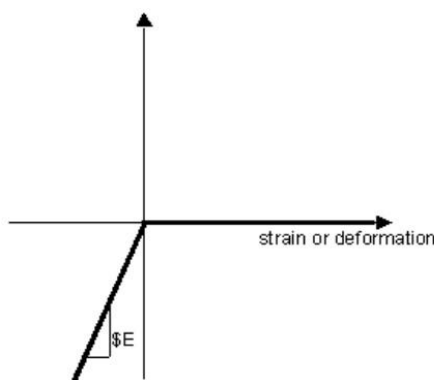


Figura 1.9. Material con comportamiento a compresión [21]

1.6 Cargas y condiciones de contorno

1.6.1 Apoyos

Un miembro de la articulación siempre se establece como Portante. Todos los demás miembros se conectan a él.

- **Portante:** El miembro portante puede ser 'pasante' o 'no pasante' en la unión. Los miembros 'no pasantes' se vinculan exteriormente en un extremo y los miembros 'pasantes' se vinculan exteriormente en ambos extremos. Las vinculaciones exteriores que se introducen coaccionan desplazamientos y giros.
- **Conectados:** Los miembros conectados se conectan al elemento portante y carecen de vinculaciones exteriores. A estos elementos se le aplican las cargas.

1.6.2 Cargas

Cuando se analiza la estructura mediante un modelo de barras, no se realiza un modelo detallado de las uniones que la componen. Si se analiza un punto de unión en un modelo de este tipo, la resultante de las fuerzas en dicha unión es nula porque el modelo está en equilibrio.

Para diseñar la unión de manera correcta es necesario generar un modelo de conexión que respete la disposición real de la misma considerando, además, las fuerzas que se ejercen en los extremos de los miembros que componen la unión que se obtienen a partir de la resolución del cálculo de la estructura.

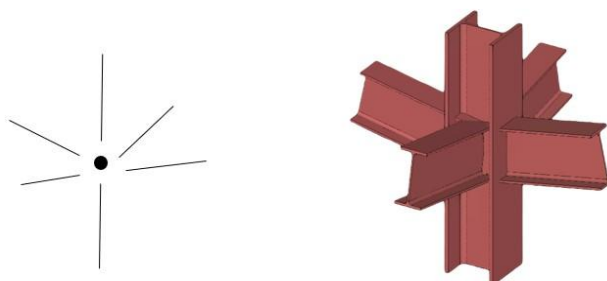
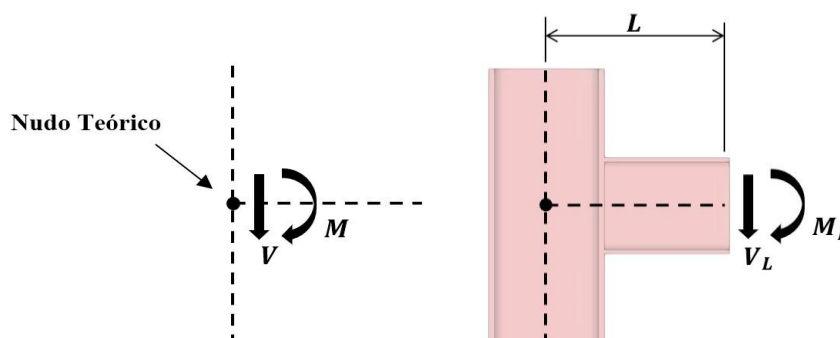


Figura 1.10. Representación de la unión teórica de los miembros y la unión real modelada en CYPE Connect.

Las fuerzas que se obtienen en los elementos del análisis estructural se transmiten a los extremos de los miembros. Las excentricidades de los miembros causadas por el diseño real de la unión se respetan en esta transmisión de cargas a los extremos. En los modelos de uniones realizados se considerará una longitud limitada de los miembros que componen la unión.

Los efectos que provoca el modelo preciso de la unión son importantes para diseñar la conexión. Los efectos se ilustran en la figura 1.11.



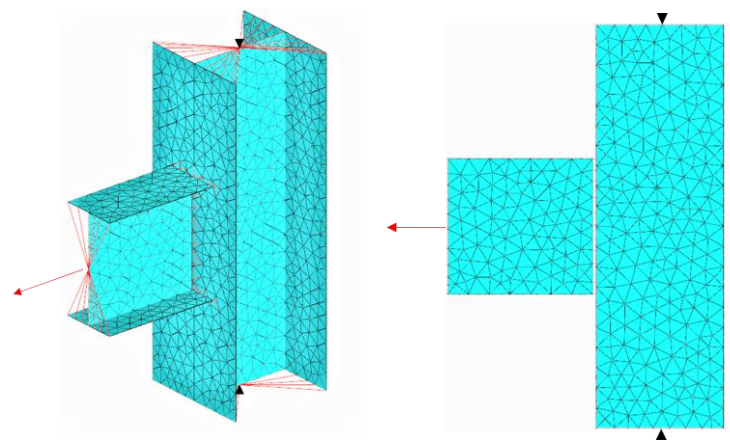
(a) Aplicación de cargas en nudo teórico. (b) Aplicación de cargas en extremo de los miembros.

Figura 1.11. Efectos del modelo preciso de la unión en la transmisión de cargas a los extremos de los miembros.

Cuando se realiza el cálculo de la unión se debe considerar que los momentos y las fuerzas cortantes que actúan sobre el nudo teórico deben de transferirse a los extremos de los miembros para que en el nudo teórico se obtengan las cargas deseadas. En el ejemplo mostrado en la figura 1.11, dicha transformación de cargas sería

$$V_L = V \quad M_L = M - V \cdot L \quad (1.11)$$

Para modelar la aplicación de cargas en los extremos de los miembros se sigue el procedimiento descrito en la sección 10.4.1 en [4]. Se incluirán nodos ficticios situados en los ejes ideales de los miembros y se conectarán estos nodos a los nodos de los extremos de los miembros mediante elementos rígidos ficticios. Un ejemplo de este modelado de cargas se puede observar en la figura 1.12.



(a) Vista General. (b) Vista Lateral.

Figura 1.12. Modelado de elementos rígidos ficticios.

Esta forma de modelar cargas tiene la ventaja de reducir las concentraciones de tensiones locales, a diferencia de los modelos en los que las cargas se aplican directamente a los nodos, y la ventaja de aplicar fácilmente las cargas y condiciones de contorno sobre los diferentes elementos. De alguna manera, mediante esta forma de modelado se tiene en cuenta la hipótesis de Navier o de Secciones Planas en la que se afirma que las secciones planas y perpendiculares al eje de la viga antes de la deformación, siguen siendo planas y perpendiculares al eje de la viga después de la deformación.

2 Referencias

- [1] Frank Mckenna, Michael Scott y Gregory Fenves. "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition". En: *Journal of Computing in Civil Engineering J COMPUT CIVIL ENG* 24 (ene. de 2010). DOI: 10.1061 / (ASCE) CP. 1943-5487. 0000002.
- [2] Dassault Systemes. "Abaqus/CAE User's Guide." En: (2014).
- [3] Xinzheng Lu y col. "Development and Application of a High-Performance Triangular Shell Element and an Explicit Algorithm in Opensees for Strongly Nonlinear Analysis". En: *Computer Modeling in Engineering and Sciences* 120 (ene. de 2019), pags. 561-582. DOI: 10.32604/ cmes.2019.04770.
- [4] Paolo Rugarli. *Steel Connection Analysis*. John Wiley and Sons, 2018.
- [5] "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: General rules-Plated structural elements". En: (2006).
- [6] Jean-Luc Fayard y Andre Bignonnet. "Fatigue Design Criterion For Welded Structures". En: *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 19 (jun. de 1996), pags. 723-729.
- [7] M. Bennebach, P. Klein y E. Kirchner. "Several seam weld finite element idealizations challenged in fatigue within a French industrial collaborative workgroup". En: *Procedia Engineering* 213 (2018). 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, pags. 403-417. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818302716>.
- [8] Jean Abry y col. "Enhanced fatigue structural stress analysis of a heavy vehicle seam welded steel chassis frame: FEA model preparation, weld model description, fatigue stress calculation and correlation with 10 year operating experience". En: *Procedia Engineering* 213 (2018). 7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France, pags. 539-548. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.050>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818302819>.
- [9] Didier Turlier y col. "Seam weld shell element model for thin walled structure FE fatigue design". En: *MATEC Web of Conferences* 165 (ene. de 2018), pag. 21007. DOI: 10.1051/mateconf/ 201816521007.
- [10] Didier Turlier y col. "New FEA shell element model for seam weld static and fatigue structural assessment". En: *Fatigue design* 165 (nov. de 2011). DOI: 10.1051/mateconf/ 201816521007.

- [11] Ying Hu y col. "FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension". En: *Journal of Constructional Steel Research* 126 (2016), pags. 174-186. ISSN: 0143-974X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.021>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302061>.
- [12] "Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints". En: (2005).
- [13] ISO 898-1:2013. "Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes, Coarse Thread and Fine Pitch Thread". En: *ISO* (2013).
- [14] S. Xu y X. Deng. "An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints". En: *Finite Elements in Analysis and Design* 40.9 (2004), pags. 1175-1194. ISSN: 0168-874X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2003.08.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X03001598>.
- [15] Jeong Kim, Joo-Cheol Yoon y Beom-Soo Kang. "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints". En: *Applied Mathematical Modelling* 31.5 (2007), pags. 895-911. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.020>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X0600062X>.
- [16] Mohamed El Aghoury, Essam Amoush y Mohamed Soliman. "Numerical Study of Bolted Moment Connections in Cold-Formed Steel Frames". En: *Future Engineering Journal* (2020).
- [17] Alexandra Korolija. "FE-modeling of bolted joints in structures". En: *Master Thesis in Solid Mechanics. Linkopings Universitet* (2012).
- [18] Jun Ye y col. "Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames". En: *Thin-Walled Structures* 150 (2020). ISSN: 0263-8231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382311830942X>.
- [19] "ANSYS. Theory Reference Release 5.6." En: (1999).
- [20] A.M. Habraken y S. Cescotto. "Contact between deformable solids: The fully coupled approach". En: *Mathematical and Computer Modelling* 28.4 (1998). Recent Advances in Contact Mechanics, pags. 153-169. ISSN: 0895-7177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00115-0). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717798001150>.
- [21] *Elastic-No Tension Material*. https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Elastic-No_Tension_Material. 2010.