



CÁLCULO DE UNIONES POR ELEMENTOS FINITOS, COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL MÉTODO DE LOS COMPONENTES SEGÚN EN 1993-1-8:2005

Pablo Gómez^a, Amaya Gómez^b y Paula Assis^c

^{a,b} *Cype Software*

^c *Top Informatica*

Resumen. Para el cálculo de uniones de estructuras de acero, las normativas actuales se basan en el conocido método de los componentes. Este método propone calcular las uniones como un conjunto de componentes más básicos, teniendo como principal inconveniente la dificultad de extrapolar el método a uniones complejas. Como alternativa, existe la posibilidad de ensayar las uniones en laboratorio o realizar modelos de elementos finitos. El objeto de este estudio es comparar la resistencia propuesta por el Eurocódigo 3, con la resistencia obtenida de modelos de elementos finitos de láminas bidimensionales con el fin de dar validez a un modelo, a priori, menos preciso que el modelo de elementos tridimensionales.

1. Introducción

El Eurocódigo EN 1993-1-8:2005 proporciona un método de cálculo para estimar la resistencia de uniones estructurales de elementos de acero. Las uniones se modelan como un conjunto de componentes básicos, para los cuales se ofrece la formulación necesaria para obtener su resistencia. El principal inconveniente es la dificultad de extrapolar el método a uniones con una configuración geométrica compleja.

Con la llegada de las herramientas informáticas y el aumento de la capacidad de cálculo de los ordenadores, se han realizado numerosos estudios y herramientas de cálculo para simular el comportamiento de las uniones mediante el método de los elementos finitos. Estos estudios, principalmente se han centrado en realizar modelos de elementos finitos de volumen.

Como alternativa a estos modelos de elementos finitos con elementos de volumen, se pueden utilizar elementos de lámina bidimensionales. Estos últimos poseen la ventaja de requerir

un tiempo de cálculo y dificultad de modelado inferiores. En el presente estudio, se pretende realizar la comparación de la resistencia propuesta por el Eurocódigo EN 1993-1-8:2005, para diferentes componentes, frente a la resistencia obtenida de un modelo de elementos finitos de láminas. El objetivo final es dar validez a los resultados obtenidos a partir de un modelo, a priori, menos preciso que el tridimensional.

Los modelos se han generado con la herramienta CYPE Connect Steel y calculado con el motor de cálculo OpenSees [1] que viene integrado en el programa.

2. Descripción del modelo

En los modelos de análisis que genera CYPE Connect Steel [2] podemos distinguir tres elementos principales: Placas, soldaduras y tornillos.

2.1 Placas

Los elementos planos que forman los perfiles y el resto de placas que intervienen en la unión se discretizan por elementos tipo *shell*, utilizando para ello el elemento triangular NLDKGT [3] con tres nodos.

Estos elementos tienen en cuenta el comportamiento de membrana (tensión en el plano, compresión y cortante) y el comportamiento de placa (momento fuera del plano y torsión). 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 podemos 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 [4].

La ley constitutiva para las placas y perfiles será una ley bilineal [5].

2.2 Soldaduras

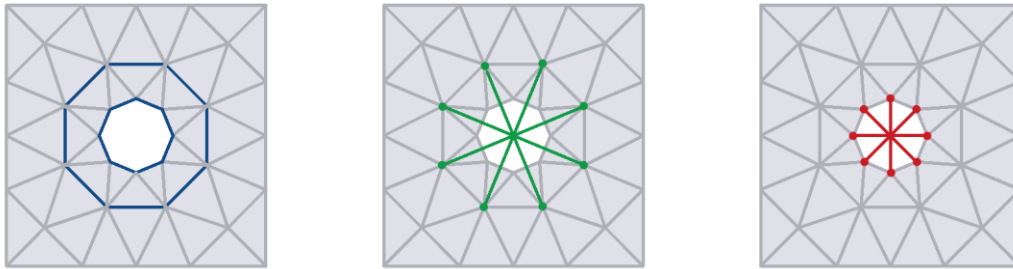
Las soldaduras se modelan mediante la conexión directa entre placas a soldar mediante restricciones de fuerza-deformación, o también denominadas, restricciones multipunto (Multi Point Constraints). La técnica de modelado de soldaduras mediante enlaces rígidos fue sugerida por Fayard y Bignonnet (1996) [6], encontrándola también en diversos documentos científicos como en [7], [8], [9] o [10].

2.3 Tornillos

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%. El comportamiento a cortante se modela de acuerdo con lo señalado en EN1993-1-8 tabla 6.3.2 y [4].

2.3.1 Transmisión de fuerzas de tracción a la placa

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, Fig.1.



a) Malla de placa con agujero b) Enlaces con octógono exterior c) Enlaces con octógono interior
Fig. 1 Discretización de los tornillos

2.3.2 Comportamiento de apoyo

El comportamiento de apoyo se modela mediante enlaces entre el nodo interior de la abertura y los nodos del octógono interior, Fig.1. Estos enlaces solo trabajan a compresión.

2.3.3 Contacto

El comportamiento de contacto entre los componentes que se unen con tornillos se realiza mediante la inclusión de elementos de conexión entre nodos que trabajan únicamente a compresión con una rigidez muy elevada. El modelado de relaciones de contacto mediante conexiones nodo a nodo se menciona en numerosos artículos científicos como en [12], [13] o [14].

3. Método de comparación

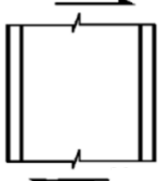
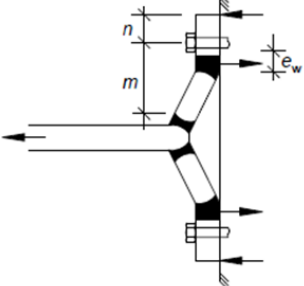
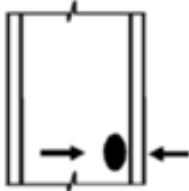
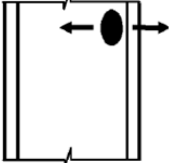
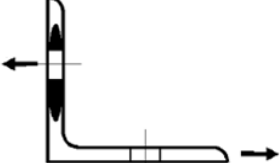
El proceso llevado a cabo para comparar los resultados ha sido, en primer lugar, determinar los componentes básicos a estudiar, mostrados en la Tabla 1, y realizar modelos de elementos finitos equivalentes, en los cuales la resistencia más desfavorable la produzca el componente estudiado. A continuación se introduce la carga equivalente a la resistencia calculada por el Eurocódigo, según la formulación mostrada en la Tabla 1, en el modelo de CYPE Connect Steel. Después de calcular, en función de la deformación equivalente de Von Mises obtenida, se aumenta o reduce la carga iterativamente hasta llegar a un valor de deformación equivalente de Von Mises inmediatamente inferior al 5% (EN 1993-1-5, Ap. C, Par. C.8, Nota 1).

Los modelos estudiados se han realizado con la versión 2021.g de CYPE Connect Steel. Se puede descargar el fichero que contiene estos modelos desde el siguiente enlace:

http://share2.cype.com/files/Test_EN-1993-1-8_20210825_141923.html

Tabla1: Componentes estudiados

Componente	Resistencia	Eq.
Desgarro (EN 1993-1-8:2005, 3.10.2)		
	$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$	(1)
Alma de pilar a cortante (EN 1993-1-8:2005, 6.2.6.1)		

	$V_{wp,Rd} = \frac{0.9f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (2)$	
Resistencia de un casquillo en T equivalente (EN 1993-1-8:2005, 6.2.6.1)		
	$F_{T,1,Rd} = 4 \cdot M_{pl,1,Rd} / m$ $M_{pl,1,Rd} = 0.25 l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} \quad (3)$ (4)	
Alma de pilar en compresión transversal (EN 1993-1-8:2005, 6.2.6.2)		
	$F_{c,wc,Rd} = \omega k_{wc} f_y t_{wc} b_{eff,c,wc} / \gamma_{M0} \quad (5)$ $F_{c,wc,Rd} \leq \omega k_{wc} \rho f_y t_{wc} b_{eff,c,wc} / \gamma_{M0} \quad (6)$	
Alma de pilar en tracción transversal ((EN 1993-1-8:2005, 6.2.6.3)		
	$F_{t,wc,Rd} = \omega f_y t_{wc} b_{eff,c,wc} / \gamma_{M0} \quad (7)$	
Lado de angular en flexión (EN 1993-1-8:2005, 6.2.6.6)		
	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m + n)} \quad (8)$	

4. Modelos de elementos finitos

Se han realizado modelos simplificados, Fig.2, buscando para cada uno de ellos, que el modo de fallo se produzca para un componente diferente. El tipo de acero utilizado es S275 en todos los casos.

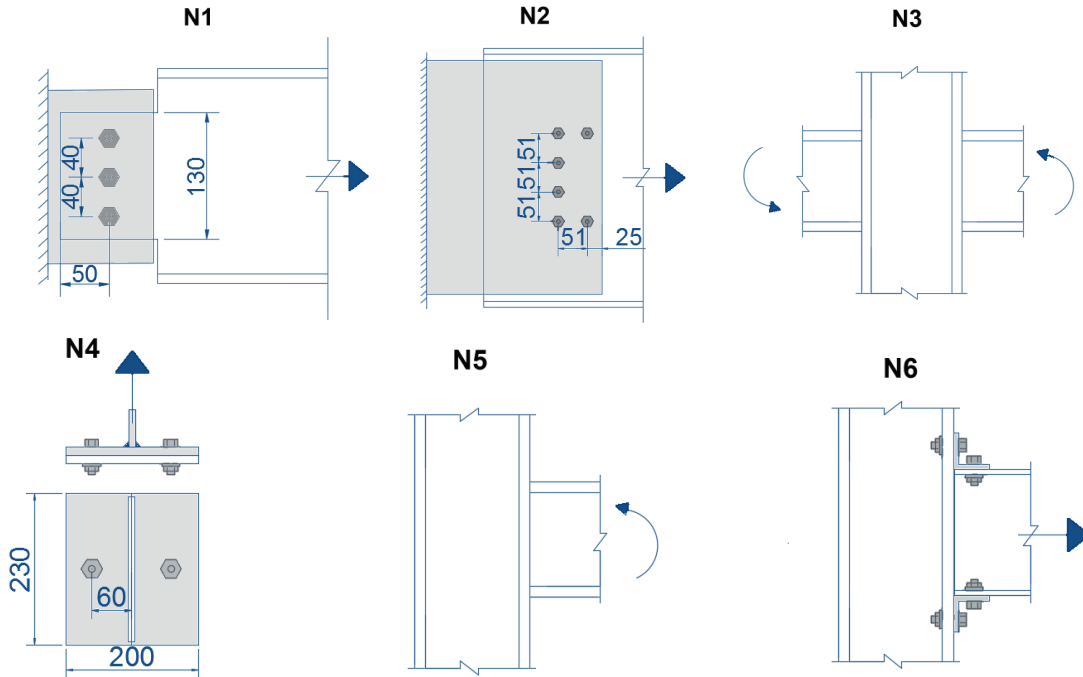


Fig. 2 Croquis de los modelos estudiados

4.1 Descripción

4.1.1 Modelo N1, resistencia a desgarro

Alma de viga atornillada a dos placas laterales de espesor 9 mm de modo que el componente más desfavorable sea el alma de la viga. El canto recortado del alma son 130 mm, espesor 6 mm, resultando un área neta sometida a tracción igual a 456 mm^2 . Se introduce un esfuerzo de tracción en la viga. Tornillos M16 de calidad 8.8.

4.1.2 Modelo N2, resistencia a desgarro

El modelo consiste en una chapa de 6.6 mm de espesor, en la que se aplica un esfuerzo por medio de un grupo de 6 tornillos M18. Resultando un área neta sometida a tracción igual a 613.8 mm^2 y un área neta sometida a cortante igual a 613.8 mm^2 .

4.1.3 Modelo N3, alma de pilar a cortante

El modelo N3-A consiste en un pilar al que se le une a cada ala, una viga soldada por sus alas. Se introducen momentos alrededor del eje 'y' a cada viga iguales y de signo contrario. Todos los perfiles son de sección HEA240. El modelo N3-B es similar al modelo N3-A, pero reduciendo la anchura de las alas del pilar a la mitad, 120 mm.

4.1.4 Modelo N4, resistencia de un casquillo en T equivalente

Se busca una comparación entre la resistencia de un casquillo en 'T' por plastificación completa de la chapa (Modo 1). El modelo consiste en una viga unida al ala de un pilar mediante una chapa frontal de 10 mm de espesor, con una fila de 2 tornillos M18 de calidad 8.8. Se suelda únicamente el alma de la viga. La prueba se centra en el resultado de la chapa frontal, por lo tanto el ala del pilar y el alma de viga se introducen con una rigidez mayor.

4.1.5 Modelo N5, alma del pilar en compresión y tracción transversal

Unión entre pilar y viga, se sueldan las alas de la viga al ala del pilar, ambos perfiles son de tipo HEA 240.

4.1.6 Modelo N6, lado de angular en flexión

Se busca una comparación entre la resistencia de un casquillo en ‘T’ por plastificación completa de la chapa (Modo 1). El modelo consiste en una unión viga pilar, en la cual se unen las alas de la viga al ala del pilar, por medio de dos angulares atornillados. Se introduce un esfuerzo de tracción en la viga hasta conseguir una deformación inferior a la deformación límite. Los tornillos utilizados son de calidad alta, 10.9, buscando que el agotamiento se produzca por el Modo 1. El diámetro de los tornillos se define igual a 12mm.

4.2 Resultados

4.2.1 Modelo N1

Se obtiene una deformación menor al 5%, Fig.3, para un valor de carga igual a 153.5 kN.

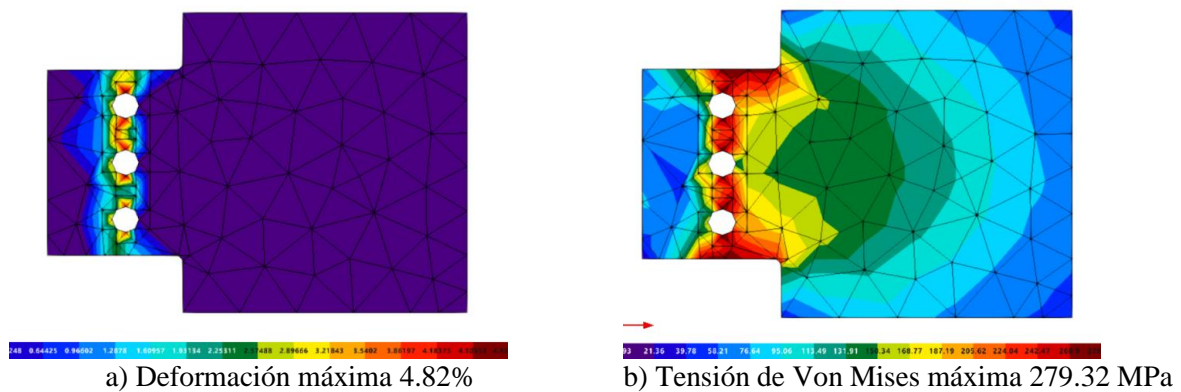


Fig. 3 Resultados del modelo N1

4.2.2 Modelo N2

Se obtiene deformación de 4.34%, Fig.4, para un valor de carga igual a 352 kN. En este caso se obtiene una resistencia superior a la propuesta por el Eurocódigo, pero inferior a la estimada según la formulación propuesta por [15].

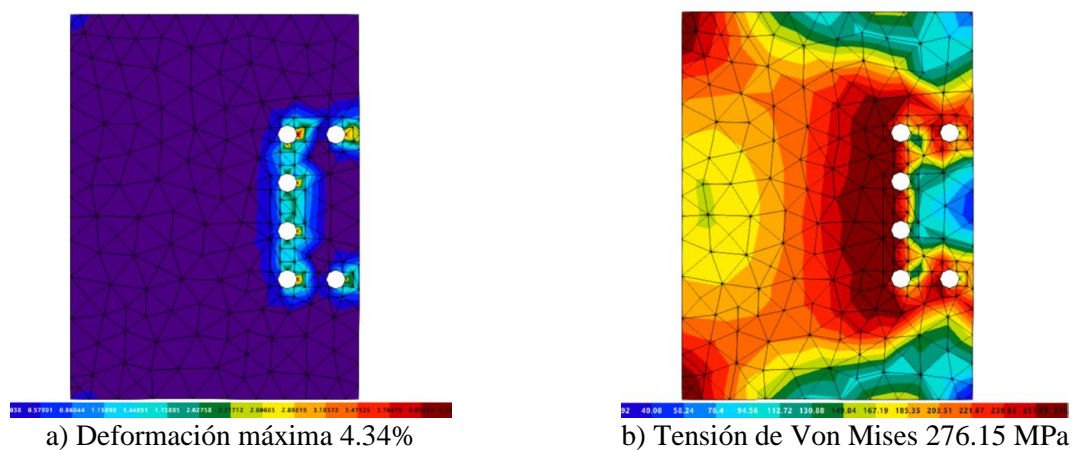


Fig. 4 Resultados del modelo N2

4.2.3 Modelo N3

En el modelo de elementos finitos A se obtiene deformación de 4.50 %, Fig.5, para un valor de momento en cada viga de 41.5 kNm, que produciría un esfuerzo cortante de 377.27 kN.

En el modelo de elementos finitos B se obtiene deformación de 4.08% para un valor de momento en cada viga de 37 kNm, que produciría un esfuerzo cortante de 336.36 kN.

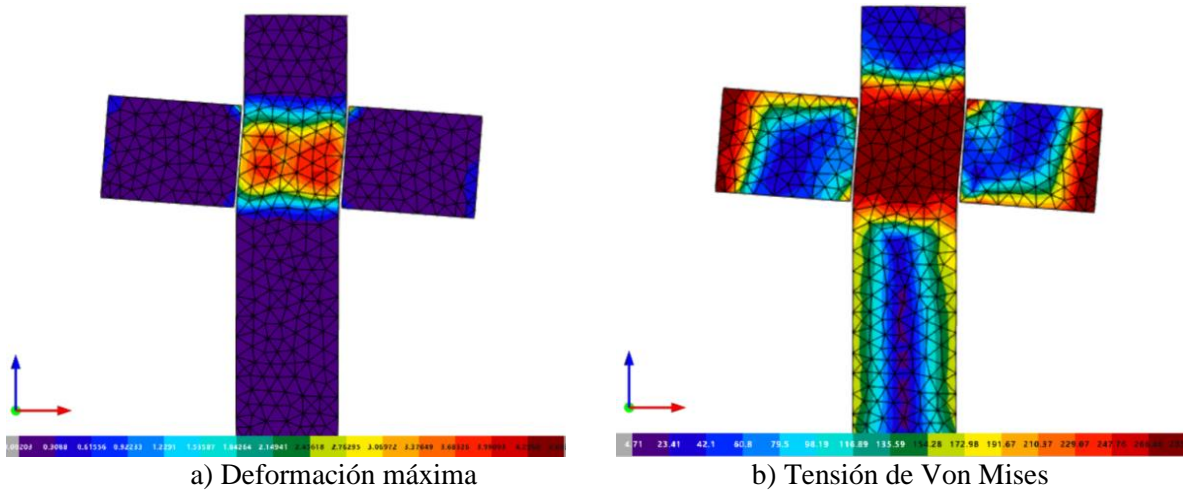


Fig. 5 Resultados del modelo N3 B

En la comparación realizada se observa que el valor de resistencia obtenido en CYPE Connect Steel se aproxima a la resistencia propuesta por el Eurocódigo a medida que se reduce la anchura de sus alas, y por lo tanto la contribución a la resistencia es menor.

4.2.4 Modelo N4

Se obtiene deformación menor al 5%, Fig.6, para un valor de carga igual a 124 kN.

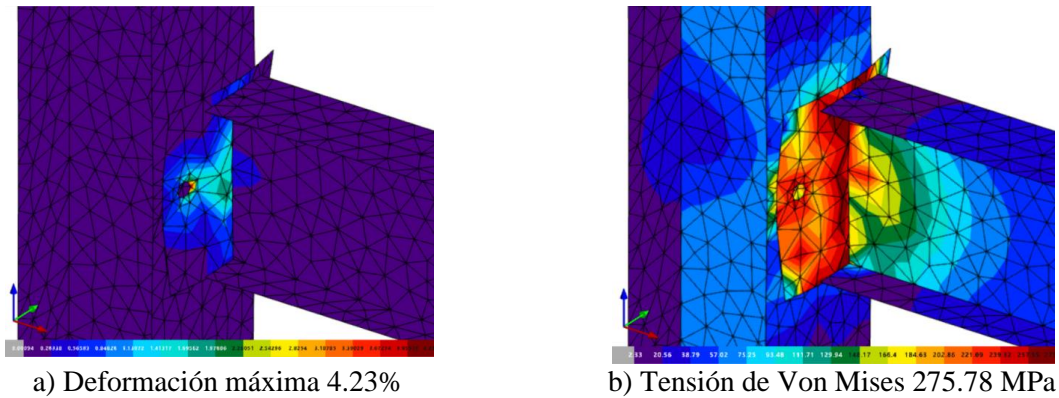


Fig. 6 Resultados del modelo N5

4.2.5 Modelo N5

En el modelo se define un momento en la viga de 76 kNm. Este esfuerzo produce una deformación de 4.90%, Fig.7. El esfuerzo de compresión se produciría en el ala inferior de la viga, con un valor estimado de $(76 \text{ kNm}/0.218\text{m}) = 348 \text{ kN}$. El esfuerzo de tracción se produciría en el ala superior con un valor estimado de la misma magnitud.

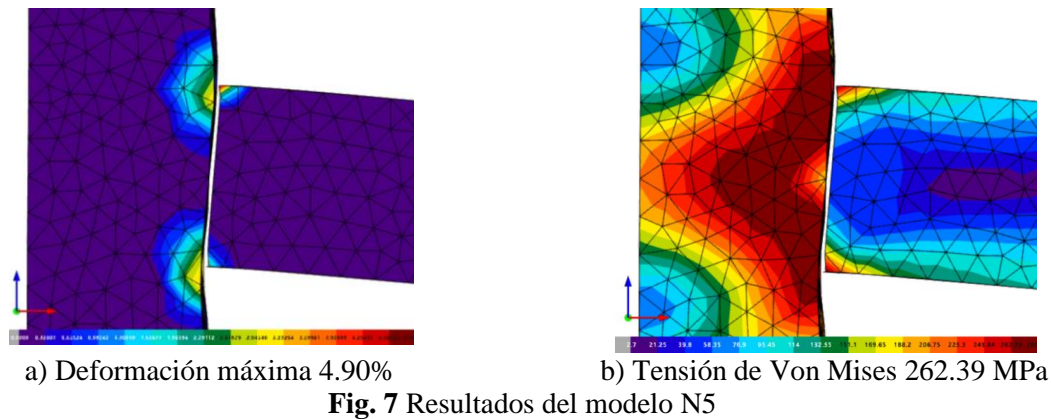


Fig. 7 Resultados del modelo N5

Se observan un valor de agotamiento similar a la resistencia a tracción y a la resistencia a compresión sin tener en cuenta la reducción por pandeo de placas. Para el caso estudiado, donde no se ha realizado la comprobación de pandeo de placas, se observa una variación de resistencia del 6%.

4.2.6 Modelo N6

Se obtiene deformación de 4.98%, Fig.8, para un valor de carga igual a 101.8 kN (50.9 kN por angular).

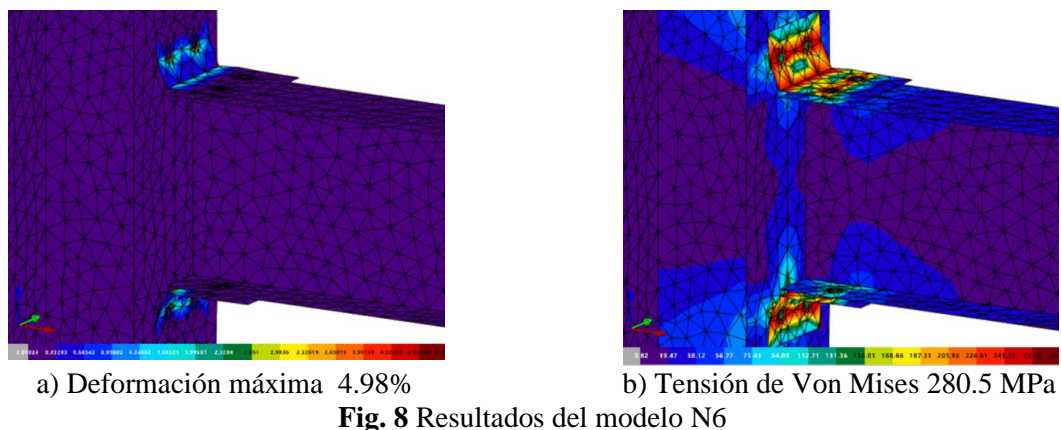


Fig. 8 Resultados del modelo N6

5. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 2, se observa una gran similitud en la resistencia obtenida por ambos métodos, siendo la diferencia media de resultados del 2.88 %. La mayor diferencia se obtiene en el modelo N2 (desgarro), ofreciendo el Eurocódigo una resistencia conservadora, según se indica también en [15]. Observando los resultados de los modelos N1 y N2 se aprecia la principal diferencia por el desgarro en zonas sometidas a esfuerzo cortante.

En el modelo N3, donde se estudia la resistencia a cortante del alma del pilar se observa una diferencia del 11.98% en el modelo A, que se reduce al -0.16% en el modelo B. La diferencia entre los dos modelos se produce ya que la formulación propuesta por EN 1993-1-8:2005 no tiene en cuenta la influencia de las alas del pilar, por lo tanto ofrece un resultado conservador a medida que el tamaño de estas, aumenta.

Del modelo N5 (compresión), se obtiene una diferencia del 6.09% motivada por no tener en cuenta en el modelo de elementos finitos, la reducción de resistencia por pandeo de placas.

Tabla 2: Resumen de resultados

Modelo	EN 1993-1-8 (a)		MEF CYPE Connect Steel (b)	% diferencia $(100 \cdot b/a) - 100$
	Formulación	Resistencia		
N1	Eq. (1)	156.86 kN	153.5 kN	-2.14
N2	Eq. (1)	303.96 kN	352 kN	15.80
N3 A	Eq. (2)	336.9 kN	377.27 kN	11.98
N3 B	Eq. (2)	336.9 kN	336.36 kN	-0.16
N4	Eq. (3)	128.57 kN	124 kN	-3.55
N5 Compresión	Eq. (5)	328.03 kN	348 kN	6.09
N5 Tracción	Eq. (7)	347.49 kN	348 kN	0.15
N6	Eq. (8)	52.79 kN	50.09	-5.11
			Diferencia media	2.88

6. Conclusiones

El modelo de elementos finitos de láminas bidimensionales utilizado en CYPE Connect Steel ofrece resultados similares a los esperados según EN 1993-1-8, tal y como se puede verificar en los casos de estudio. Para el cálculo de uniones con geometrías complejas, el método de los componentes no es fácilmente extrapolable. El método de cálculo basado en elementos finitos propuesto, por el contrario, se puede aplicar sin ningún tipo de dificultad adicional para simular el comportamiento de cualquier tipo de unión. La conclusión del presente trabajo, a la luz de todo lo expuesto, es que el método de cálculo utilizado en el software CYPE Connect Steel, constituye una excelente alternativa al cálculo tradicional según el método de los componentes.

Notación

A_{nt}	Área neta sometida a tracción
A_{nv}	Área neta sometida a cortante
$F_{c,wc,Rd}$	Resistencia de cálculo del alma de un pilar sin rigidizar sometido a compresión
$F_{t,wc,Rd}$	Resistencia de cálculo del alma de un pilar sin rigidizar sometido a tracción
$F_{T,1,Rd}$	Resistencia de cálculo del ala de casquillo en T para el modo 1
$M_{pl,1,Rd}$	Momento plástico resistente para el modo 1
$V_{eff,Rd}$	Resistencia al desgarro
$V_{wp,Rd}$	Resistencia plástica de cálculo a cortante del alma de un pilar sin rigidizar
$b_{eff,c,wc}$	Anchura eficaz del alma del pilar a compresión
e_w	0.25 veces el diámetro de de la arandela
f_u	Resistencia última del acero
f_y	Límite elástico del acero
k_{wc}	Coefficiente de reducción
$l_{eff,1}$	Longitud eficaz para un patrón de rotura no circular
m	Distancia desde el eje del tornillo hasta la raíz del cordón o radio de acuerdo
n	Distancia desde el eje del tornillo hasta el borde de la chapa, no mayor que $1.25 \cdot m$
t_f	Espesor del ala
t_{wc}	Espesor del alma del pilar
γ_{M2}	Coefficiente parcial para la resistencia a rotura de secciones transversales en tracción

γ_{M0}	Coeficiente parcial para la resistencia de secciones transversales
ρ	Coeficiente de reducción para el pandeo de placas
ω	Coeficiente de reducción para permitir posibles efectos de interacción con cortante en el alma del pilar

Referencias

- [1] Mckenna F, Scott M, Fenves G. “Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition”. *En: Journal of Computing in Civil Engineering J COMPUT CIVIL ENG 24*, 2010. DOI: 10.1061 / (ASCE) CP. 1943-5487. 0000002.
- [2] “CYPE Connect Steel - MEMORIA DE CÁLCULO”. [Online] Disponible en: http://www.cype.net/manuales/cype_connect_steel/cype_connect_steel_mem_es.pdf. Accedido en: Feb., 8, 2021
- [3] Xinzhen Lu et al. “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*, 561-582, 2019. DOI: 10.32604/ cmes.2019.04770.
- [4] Rugarli P. “Steel Connection Analysis”. *John Wiley and Sons*, 2018.
- [5] “Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5”, 2006.
- [6] Fayard J-L, Bignonnet A. “Fatigue Design Criterion For Welded Structures”. *En: Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 19*, 723-729, 1996.
- [7] Bennebach M, Klein P, Kirchner E. “Several seam weld finite element idealizations challenged in fatigue within a French industrial collaborative workgroup”. *En: Procedia Engineering 213*, 2018.
- [8] Abry J et al. “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*, Senlis, France, 539-548, 2017. ISSN: 1877-7058.
- [9] Turlier D et al. “Seam weld shell element model for thin walled structure FE fatigue design”. *En: MATEC Web of Conferences 165*, 21007/2018. DOI: 10.1051/mateconf/201816521007.
- [10] Turlier D et al. “New FEA shell element model for seam weld static and fatigue structural assessment”. *En: Fatigue design 165*, 2011.
- [11] Ying Hu et al. “FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension”. *En: Journal of Constructional Steel Research 126*, 174-186, 2016. ISSN: 0143-974X.
- [12] Kim J, Yoon J-C, Kang B-S. “Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints”. *En: Applied Mathematical Modelling 31.5*, 895-911, 2007. ISSN: 0307-904X.
- [13] ANSYS. Theory Reference Release 5.6. *En: (1999)*.
- [14] Habraken A.M., Cescotto S. “Contact between deformable solids: The fully coupled approach”. *En: Mathematical and Computer Modelling 28.4. Recent Advances in Contact Mechanics*, 153-169, 1998. ISSN: 0895-7177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00115-0).
- [15] Topkaya C. “A finite element parametric study on block shear failure of steel tension members”, *Journal of Constructional Steel Research*, Ankara, 2004.