



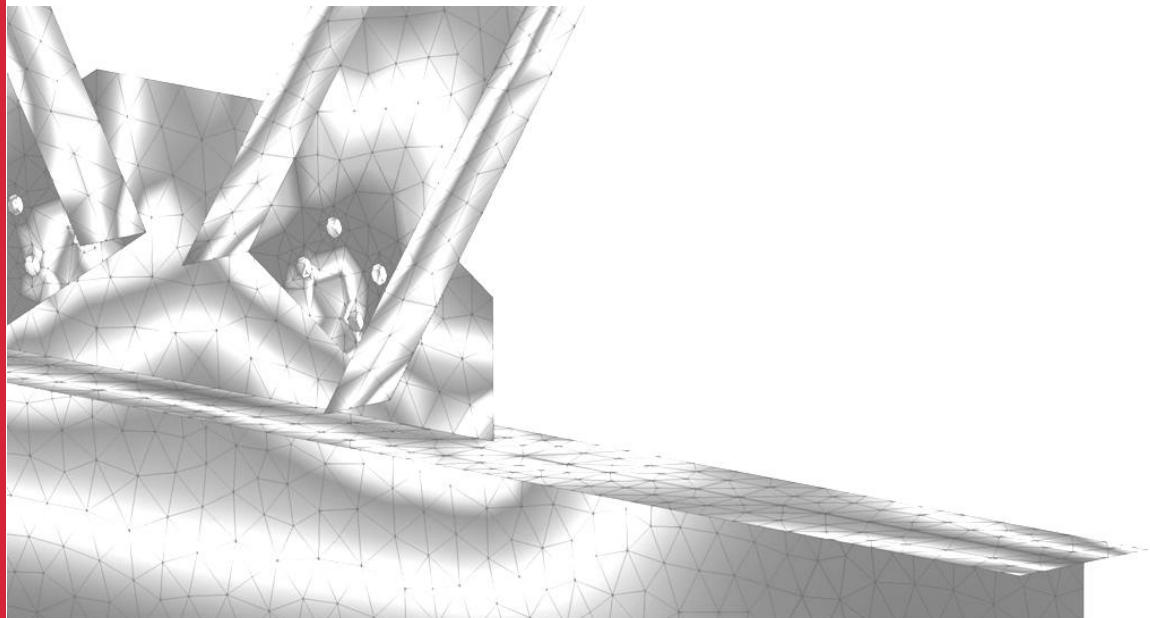
Software para Arquitetura,
Engenharia e Construção



CYPE Connect

Memória de cálculo

*Modelação e análise de ligações para estruturas de aço.
Esta aplicação está integrada no fluxo de trabalho.
Open BIM através da plataforma BIMserver.center.*





Índice

1	Análise.....	3
1.1	Introdução.....	3
1.2	Chapas.....	4
1.3	Soldaduras.....	5
1.4	Parafusos.....	6
1.4.1	Comportamento do parafuso à tração e corte.....	6
1.4.2	Transmissão de forças de tração à chapa.....	9
1.4.3	Comportamento de Apoio.....	10
1.4.4	Transmissão de cargas.....	11
1.5	Contacto.....	11
1.6	Cargas e condições de contorno.....	12
1.6.1	Apoios.....	12
1.6.2	Cargas.....	12
2	Referências.....	14

1 Análise

1.1 Introdução

O cálculo das ligações é um dos problemas mais complexos da engenharia estrutural. A forma habitual de lidar com este problema ao longo dos anos tem sido através da utilização de pressupostos e experiência simplificados, através de cálculos manuais ou de folhas de cálculo. No passado não existia a necessidade de validar dezenas ou centenas de combinações de ações e os fatores de segurança eram mais elevados do que hoje.

Atualmente, existem mais restrições de dimensionamento e os fatores de segurança diminuíram, tornando a precisão dos cálculos uma questão crucial.

A forma tradicional de lidar com o cálculo de ligações pode ser útil em certas situações, mas hoje em dia somos confrontados com estruturas mais complexas.

Quando a estrutura é analisada através de um modelo de barras, não se realiza um modelo detalhado das ligações que a compõem. A fim de conceber corretamente a ligação, é necessário gerar um modelo de ligação que respeite a disposição real da ligação e os esforços das extremidades das barras, que compõem a ligação, obtidos a partir da resolução do cálculo da estrutura.

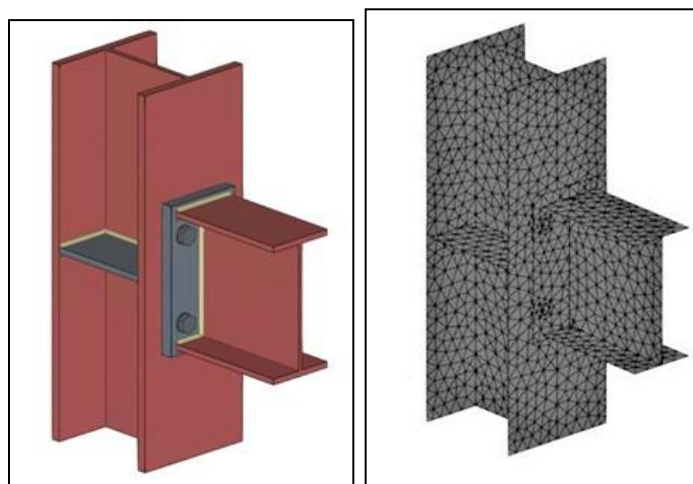
Utilizando a Análise por Elementos Finitos é possível abordar este problema com maior eficácia e precisão.

O CYPE Connect é uma ferramenta que permite gerar modelos de ligações de estruturas metálicas baseados em elementos finitos, bem como o seu cálculo e verificação de acordo com requisitos regulamentares, com uma intervenção mínima ou nula por parte do utilizador, utilizando o software de elementos finitos OpenSees [1] de renome mundial como motor de cálculo.

Nos modelos de elementos finitos gerados pelo CYPE Connect, podem distinguir-se três elementos principais: chapas, soldadura e parafusos.

No contexto do presente manual, as chapas constituem todos aqueles elementos planos (cuja dimensão da espessura é muito menor do que as restantes dimensões) que intervêm no modelo estrutural da ligação como, por exemplo, os elementos planos que constituem os perfis metálicos (alma, banzo), as chapas que são utilizadas para fazer as ligações aparafusadas, as chapas de reforço, etc. Na figura 1.1 é possível observar uma comparação entre o modelo geométrico real da ligação e o modelo discretizado da mesma. O modelo das chapas será descrito mais detalhadamente na secção 1.2.

Os parafusos e soldaduras são os elementos de ligação do modelo e as suas características serão descritas com mais detalhe nas secções 1.3 e 1.4.



(a) Modelo geométrico real da ligação.

(b) Modelo discretizado da ligação.

Figura 1.1. Discretização através de Elementos Finitos.

1.2 Chapas

Em estruturas onde a espessura é significativamente menor do que as outras dimensões, como no caso das chapas de estruturas metálicas, os elementos tipo *Shell* são uma boa solução (secção 29.6.1 [2]). O elemento utilizado será o elemento triangular *Shell NLDKGT* [3] com três nós.

Estes elementos têm em conta o comportamento de membrana (tensão no plano, compressão, corte e momento torsor) e o comportamento da chapa (momento fora do plano). No domínio não linear, o comportamento das chapas é modelado utilizando secções por camadas. A espessura da chapa é dividida em várias camadas (neste caso 5) onde o problema a ser resolvido é de tensão plana. O cálculo dos momentos fletores é efetuado pela soma dos efeitos de cada camada e não é possível considerar que as tensões na espessura da chapa são obtidas pela soma dos efeitos da membrana e do comportamento à flexão como ocorreria na análise linear (secção 9.2.4 [4]).

Em elementos finitos, são utilizadas técnicas de integração numérica para calcular os integrais necessários. Se a não linearidade do material for ativada, a integração numérica necessária para calcular a matriz de rigidez não é realizada apenas na superfície (onde são utilizados pontos de *Gauss*), mas também na própria espessura.

Este modelo de chapas será utilizado para discretizar os elementos planos que constituem os perfis metálicos e para discretizar outras chapas que intervêm no modelo estrutural, tais como as chapas que são utilizadas para realizar ligações aparafusadas ou de reforço. Em suma, este modelo de chapas será utilizado para discretizar qualquer elemento plano que intervenha no modelo estrutural da ligação.

Os diagramas de materiais mais comuns utilizados na modelação de elementos finitos de aço estrutural são o modelo elástico ou plástico com endurecimento por deformação. O diagrama constitutivo selecionado para chapas e perfis será um diagrama bilinear com um declive no tramo plástico de $\tan^{-1}(E/1000)$.

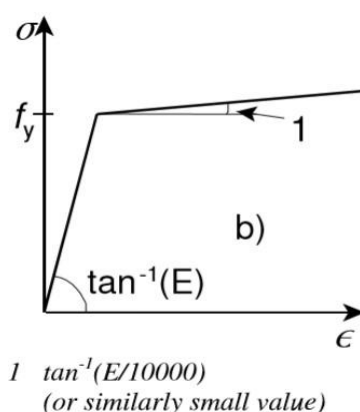


Figura 1.2. Diagrama constitutivo do aço em chapas [5].

1.3 Soldaduras

As soldaduras são um dos elementos de união nas ligações. Existem várias opções para modelar soldaduras.

Uma opção amplamente utilizada para a sua modelação, que é a utilizada no CYPE Connect, é a ligação direta entre chapas a soldar através de restrições de força-deformação, também conhecidas como restrições multiponto MPC (Multi Point Constraints). A técnica de modelação de soldaduras utilizando ligações rígidas foi sugerida por Fayard e Bignonnet (1996) [6], e baseia-se na modelação da rigidez local das ligações soldadas unindo dois elementos *Shell* adjacentes através dos seus nós ao longo do comprimento da soldadura. A utilização de ligações rígidas para modelação de soldadura pode ser encontrada em vários artigos científicos [7], [8], [9], [10].

No CYPE Connect, os nós do extremo da superfície a soldar são projetados perpendicularmente sobre a superfície à qual se solda. As ligações rígidas ligam cada um dos nós do extremo da superfície a soldar e os nós projetados. Além disso, estes nós

projetados relacionam-se através de MPC com os nós circundantes tendo em conta as funções de interpolação do campo de deformação do elemento sobre o qual se projeta o referido nó. Ao aplicar este método, respeita-se a espessura da garganta de soldadura, bem como a configuração real da soldadura.

A principal vantagem deste método é que permite ligar malhas de diferentes densidades. A figura 1.3 mostra a modelação da soldadura usando elementos rígidos e MPC no CYPE Connect.

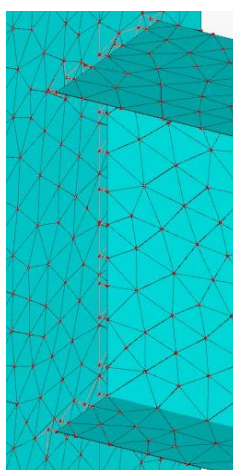


Figura 1.3. Modelação de soldaduras com o CYPE Connect.

1.4 Parafusos

Diferenciam-se três comportamentos nos elementos que modelam os parafusos. Comportamento do parafuso à tração e corte; transmissão de forças de tração à chapa e comportamento de apoio da chapa ao parafuso.

1.4.1 *Comportamento do parafuso à tração e corte*

Para modelar o comportamento do parafuso utilizam-se molas não lineares que simulam o comportamento à tração e molas lineares que simulam o comportamento ao corte. As rigidezes iniciais são obtidas a partir das normas correspondentes. Para modelar o comportamento elasto-plástico à tração, é utilizado um diagrama de material, bilinear, que se baseia em curvas de tensão-deformação de parafusos propostas em diferentes trabalhos de investigação [11]. Considera-se que a tensão última ocorre para uma deformação de 5%. O diagrama bilinear deste comportamento pode observar-se na figura 1.4.

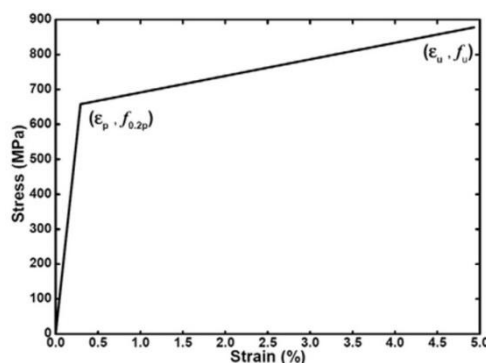


Figura 1.4. Diagrama tensão-deformação do parafuso [11]

Este modelo de parafuso utilizando elementos do tipo mola com rigidezes obtidas a partir de normas encontra-se também noutros documentos científicos (secção 7.5 [4]).

Seguidamente apresenta-se um exemplo das equações que representam estes diagramas bilineares aplicando as rigidezes que se encontram no Eurocódigo.

Comportamento à tração

O diagrama força-deslocamento do comportamento à tração, que se baseia no diagrama de comportamento mencionado acima, na secção 1.4.1, pode observar-se na figura 1.5.

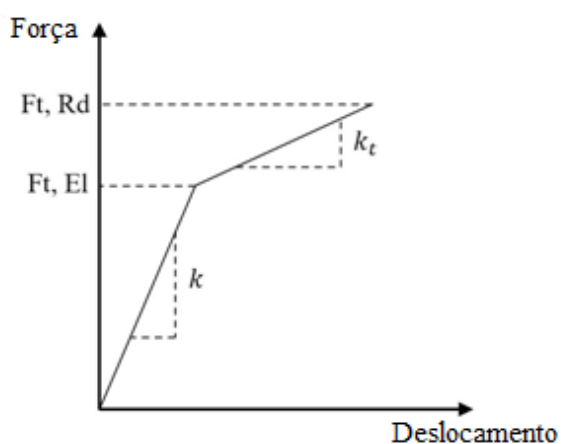


Figura 1.5. Diagrama Força-deslocamento do parafuso à tração

De acordo com EN1993-1-8 secção 6.3.2 [12] a rigidez inicial k será:

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

onde E é o módulo de elasticidade do parafuso, A_s é a área da secção transversal do parafuso efetiva em tensão (área roscada) e L_b o comprimento de aperto (espessura total

do material e das anilhas, adicionando a metade da soma da altura da cabeça com a altura da porca.

As equações que descrevem o diagrama de tensões são as seguintes:

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

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

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

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

donde

- $F_{t,Rd}$: Valor de cálculo da resistência à tração do parafuso segundo EN1993-1-8 quadro 3.4 [12]
- $F_{t,El}$: Resistência à tração em limite elástico do parafuso
- $k_2 = 0.9$ (0.63 para parafusos com cabeça de embeber)
- f_{ub} : Tensão última do parafuso (ISO 898:2013 [13])
- f_{yb} : Tensão de limite elástico do parafuso (ISO 898:2013 [13])
- γ_{M2} : Coeficiente parcial de segurança EN1993-1-8 quadro 2.1 [12] (valor recomendado $\gamma_{M2} = 1,25$)

Comportamento ao corte

O comportamento ao corte do parafuso pode ser modelado por uma mola linear com uma determinada rigidez [4].

De acordo com a secção EN1993-1-8 6.3.2 [12], a rigidez do parafuso ao corte, k , será:

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

- n_b : Número de linhas de parafusos solicitados ao corte
- d : Diâmetro do parafuso
- d_{M16} : Diâmetro nominal do parafuso M16, 16 mm

A rigidez de corte de um parafuso pode ser considerada como [4]:

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

1.4.2 Transmissão de forças de tração à chapa

A malha da chapa com o furo para o parafuso será realizada como se mostra na figura 1.6.

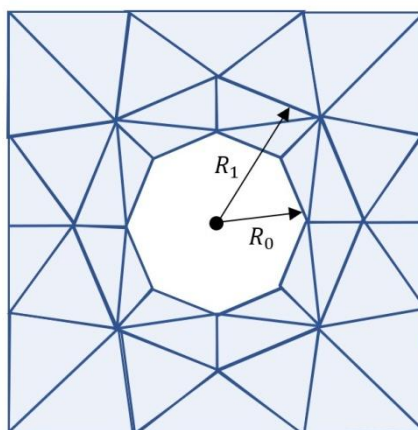


Figura 1.6. Malha da chapa com furo

O diâmetro do furo é $D = 2R_0$ e o parâmetro R_1 representa o comprimento das ligações descritas seguidamente.

O comportamento de transmissão de forças de tração à chapa é modelado por ligações rígidas entre o nó do centro do furo e os nós do octógono exterior que transmitem forças de tração na direção perpendicular ao plano das chapas conectadas.

A figura 1.7 representa a conexão destas ligações de interpolação com os nós da chapa.

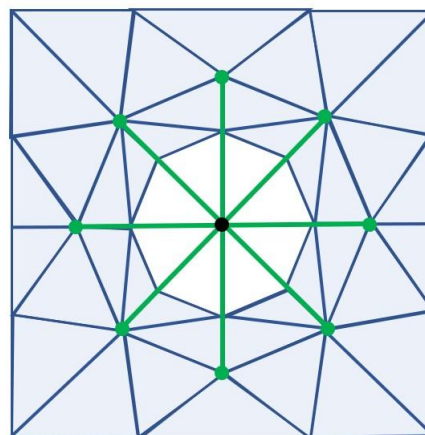


Figura 1.7. Representação de ligações de conexão (elementos a verde) com os nós da chapa.

1.4.3 Comportamento de apoio

O comportamento de apoio é modelado através de ligações entre o nó interior do furo e os nós localizados no bordo do mesmo. Nestas ligações considera-se a rigidez de apoio do parafuso na chapa. Esta malha pode ser vista na figura 1.8.

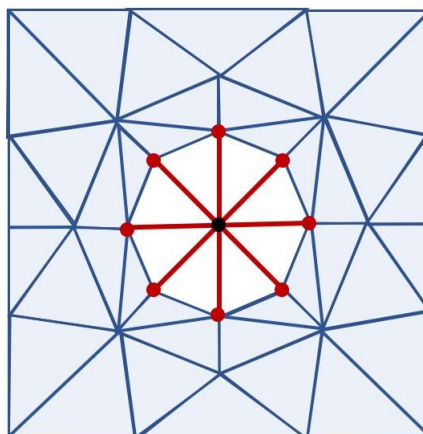


Figura 1.8. Representação de ligações (elementos vermelhos) que representam o comportamento de apoio da chapa e parafuso.

A rigidez global exercida por estes oito elementos de ligação (elementos vermelhos, figura 1.8) é quatro vezes a rigidez axial de cada um deles (secção 10.3.3 [4]). Isto significa que qualquer que seja a direção da força aplicada no nó central comum aos oito elementos, a rigidez aparente será sempre quatro vezes a rigidez axial de um elemento radial.

Se se considerar que estes oito elementos só trabalham à compressão, como é o caso do CYPE Connect, a rigidez de cada raio, como descrito na secção 10.3.3 [4], será:

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

sendo k a rigidez de apoio que se encontra em diferentes normas.

No caso do Eurocódigo, a rigidez de apoio está descrita na secção EN1993-1-8 6.3.2 [12]:

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

Tendo em conta o descrito na secção 7.5.1 [4], a rigidez inicial de apoio pode ser considerada como:

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

onde

- f_u : Tensão última do aço no qual se opia o parafuso
- t : Espessura do componente no qual se apoia o parafuso
- d : Diâmetro do parafuso
- d_{M16} : Diâmetro do parafuso M16

1.4.4 Transmissão de cargas

Em CYPE Connect o modelo de ligação aparafusada é feito ligando as chapas com um modelo de parafuso em que as cargas se transmitem dos nós da primeira chapa a um único nó, este nó transmite as cargas a um segundo nó através de um elemento que simula o comportamento do parafuso e este segundo nó transmite essas cargas aos nós da segunda chapa.

Esta forma de transmitir as cargas entre chapas através da ligação nó a nó pode ser encontrada em vários artigos científicos [4], [14], [15], [15], [16], [17], [18].

1.5 Contacto

O comportamento de contacto entre os componentes que se unem é realizado através da inclusão de elementos de ligação entre nós que trabalham unicamente à compressão com uma rigidez muito elevada. Se a malha não estiver conforme, projetam-se os nós de uma superfície para outra na direção perpendicular às superfícies e relacionam-se os graus de liberdade através de funções de forma dos elementos e Multi Point Constraints. Ligam-se os nós com os seus nós projetados correspondentes e incluem-se estes elementos que só trabalham à compressão, figura 1.9, com rigidezes muito elevadas evitando a aproximação entre ambos os nós.

A modelação das relações de contacto mediante ligações nó a nó é mencionada em vários artigos científicos [15], [19], [20].

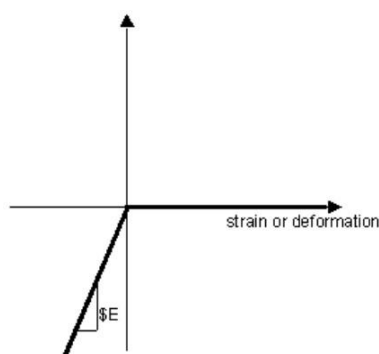


Figura 1.9. Material com comportamento à compressão [21]

1.6 Cargas e condições de contorno

1.6.1 Apoios

Uma barra da ligação é sempre definida como portante. Todas as restantes barras estão ligadas à portante.

- **Portante:** A barra portante pode ser 'contínua' ou 'não contínua' na ligação. As barras "não contínuas" ligam-se exteriormente num extremo e as barras "contínuas" ligam-se exteriormente em ambos os extremos. As vinculações exteriores que são introduzidas restringem deslocações e rotações.
- **Conectadas:** As barras conectadas ligam-se ao elemento portante e carecem de vinculações exteriores. A estes elementos são aplicadas as cargas.

1.6.2 Cargas

Quando a estrutura é analisada utilizando um modelo de barras, não é realizado um modelo detalhado das ligações que compõem a estrutura. Se uma ligação for analisada num modelo deste tipo, a resultante das forças nessa ligação é zero porque o modelo está em equilíbrio.

Para dimensionar a ligação corretamente, é necessário gerar um modelo de ligação que respeite a disposição real desta, considerando as forças que são exercidas nos extremos das barras que compõem a ligação, as quais são obtidas a partir da resolução do cálculo da estrutura.

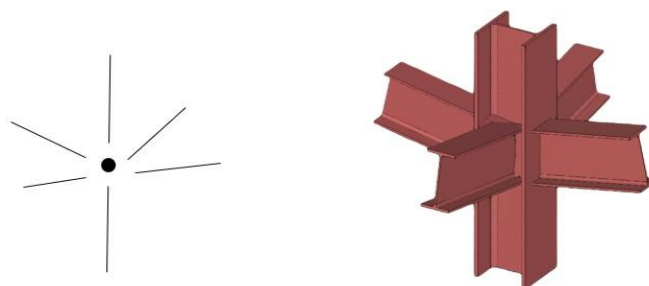
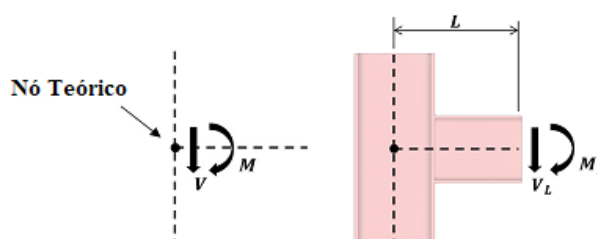


Figura 1.10. Representação da ligação teórica das barras e a ligação real modelada no CYPE Connect.

As forças que se obtêm nas barras, da análise estrutural, são transmitidas aos extremos das barras. As excentricidades causadas pela conceção real da ligação são respeitadas nesta transmissão de cargas aos extremos. Nos modelos de ligações realizados, será considerado um comprimento limitado das barras que compõem a ligação.

Os efeitos causados pelo modelo da ligação são importantes para a conceção da ligação, estes estão ilustrados na figura 1.11.



(a) Aplicação de cargas no nó teórico.

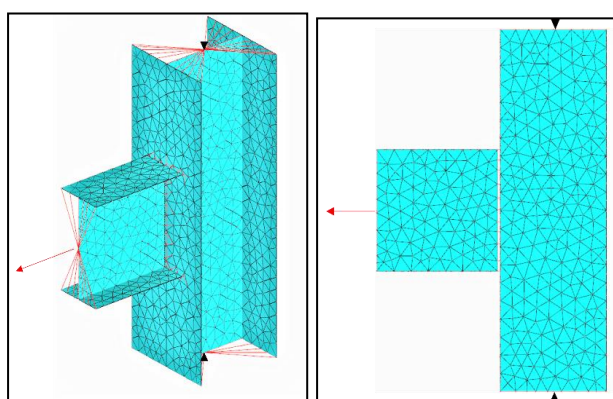
(b) Aplicação de cargas no extremo das barras.

Figura 1.11. Efeitos do modelo da ligação na transmissão de cargas aos extremos das barras.

Ao calcular a ligação, deve-se considerar que os momentos e os esforços transversos que atuam no nó teórico devem ser transferidos para os extremos das barras para que no nó teórico se obtenham as cargas desejadas. No exemplo mostrado na Figura 1.11, esta transformação de cargas será:

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

Para modelar a aplicação de cargas nos extremos das barras, segue-se o procedimento descrito na secção 10.4.1[4]. Incluem-se nós fictícios localizados nos eixos principais das barras e estes nós são ligados aos nós extremos da secção por meio de elementos rígidos fictícios. Um exemplo desta modelação de cargas pode ser visto na figura 1.12.



(a) Vista geral.

(b) Vista lateral.

Figura 1.12. Modelação de elementos rígidos fictícios.

Esta forma de modelar cargas tem a vantagem de reduzir a concentração de tensão locais, ao contrário dos modelos em que as cargas são aplicadas diretamente nos nós, e a vantagem de aplicar facilmente as cargas e condições de fronteira sobre os diferentes elementos. De certa maneira, esta forma de modelação tem em conta a hipótese de Navier ou de Secções Planas, na qual se afirma que as secções planas e perpendiculares ao eixo de uma viga antes da deformação, permanecem planas e perpendiculares ao eixo da viga após a deformação.

2 Referências

- [1] Frank Mckenna, Michael Scott e Gregory Fenves. "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition". *Journal of Computing in Civil Engineering J COMPUT CIVIL ENG* 24 (jan. de 2010). doi: 10.1061 / (ASCE) CP. 1943-5487. 0000002.
- [2] Dassault Systemes. "Abaqus/CAE User's Guide." (2014).
- [3] Xinzheng Lu *et al.* "Development and Application of a High-Performance Triangular Shell Element and an Explicit Algorithm in Opensees for Strongly Nonlinear Analysis". *Computer Modeling in Engineering and Sciences* 120 (jan. 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". (2006).
- [6] Jean-Luc Fayard e Andre Bignonnet. "Fatigue Design Criterion For Welded Structures". *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 19 (jun. de 1996), pags. 723-729.
- [7] M. Bennebach, P. Klein e E. Kirchner. "Several seam weld finite element idealizations challenged in fatigue within a French industrial collaborative workgroup". *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 *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". *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". *MATEC Web of Conferences* 165 (ene. de 2018), pag. 21007. doi: 10.1051/mateconf/ 201816521007.
- [10] Didier Turlier *et al.* "New FEA shell element model for seam weld static and fatigue structural assessment". *Fatigue design* 165 (nov. de 2011). doi: 10.1051/mateconf/ 201816521007.

- [11] Ying Hu *et al.* "FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension". *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". (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". *ISO* (2013).
- [14] S. Xu e X. Deng. "An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints". *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". *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 e Mohamed Soliman. "Numerical Study of Bolted Moment Connections in Cold-Formed Steel Frames". *Future Engineering Journal* (2020).
- [17] Alexandra Korolija. "FE-modeling of bolted joints in structures". *Master Thesis in Solid Mechanics. Linkopings Universitet* (2012).
- [18] Jun Ye *et al.* "Efficient design of cold-formed steel bolted-moment connections for earthquake resistant frames". *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." (1999).
- [20] A.M. Habraken e S. Cescotto. "Contact between deformable solids: The fully coupled approach". *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.