



CONECTORES DE CISALHAMENTO EM BARRAS DE AÇO PARA VIGAS MISTAS DE AÇO-CONCRETO

Wallison Carlos de Sousa Barbosa

wallcsb@gmail.com

Professor Doutor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG
Campus Formosa, Formosa-GO, CEP: 73813-816

Luciano Mendes Bezerra

lmbz@unb.br

Professor Doutor, Universidade de Brasília – UnB
Campus Darcy Ribeiro, Edifício SG12, Brasília-DF, CEP: 70910-900

Resumo. *As estruturas mistas apresentam grandes vantagens quanto a aspectos estruturais e construtivos, sendo os conectores de cisalhamento determinantes para a obtenção da interação entre os materiais (aço e concreto). Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um conector de cisalhamento (conector treliçado) proposto para uso em vigas mistas de aço-concreto. O conector proposto é de fácil execução e pode servir como alternativa viável ao uso dos conectores stud bolt ou U. Foi idealizada uma geometria para o conector que propiciasse baixo custo de produção, facilidade de execução, maiores valores de carga resistente e eficiência quanto a resistência aos deslizamentos relativos entre o perfil metálico e a laje de concreto. A fim de avaliar o comportamento dos conectores treliçados foram realizados estudos numéricos através do Método dos Elementos Finitos (MEF), simulando-se ensaios de push-out em vigas mistas. Os estudos numéricos possibilitaram a compreensão do comportamento dos modelos quanto à distribuição de tensões e o deslizamento do perfil em relação às lajes dos modelos. Os resultados das análises numéricas proporcionaram uma visão global do funcionamento dos conectores stud e treliçado, com resultados significativos que evidenciaram vantagens do conector treliçado em relação ao conector stud, considerando os parâmetros analisados neste trabalho.*

Palavra chave: estruturas mistas, aço, concreto, conectores de cisalhamento.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, técnico e científico tem proporcionado o surgimento de grande número de sistemas estruturais, dentre eles tem-se as estruturas mistas aço-concreto que apresentam grande eficiência do ponto de vista estrutural e construtivo. Quanto ao aspecto estrutural, pode-se ressaltar o melhor aproveitamento das propriedades de resistência dos materiais, explorando-se de forma efetiva as potencialidades dos materiais constituintes da estrutura mista. Obtendo-se desta forma estruturas leves e otimizadas. Para que a laje e o perfil metálico atuem como uma estrutura mista, é necessária a ligação entre o concreto e o perfil metálico. Para isso são utilizados elementos metálicos, chamados conectores de cisalhamento, que ficam imersos no concreto e soldados aos perfis metálicos.

A escolha do tipo de conectores e o seu correto dimensionamento são de grande importância, pois é por meio deles que se determina o grau de interação e a maneira como os esforços normais e de cisalhamento são transmitidos entre os materiais (aço e concreto), sendo os estudos numéricos e experimentais de grande valia para a melhor compreensão do comportamento desses conectores e do funcionamento das estruturas mistas que envolvem aço e concreto.

O conector de cisalhamento mais largamente utilizado em vigas mistas é o *stud bolt*, com os critérios de dimensionamento apresentados na ABNT NBR 8800:2008, que mostra também a metodologia de dimensionamento de conectores do tipo “U” para estruturas mistas de aço e concreto. No decorrer do tempo vários conectores de cisalhamento foram desenvolvidos com o intuito de aprimorar a interação entre aço e concreto das estruturas mistas.

Os estudos a respeito de conectores de cisalhamento iniciaram-se em 1933 na Suíça, *Swiss Federal Institute for Testing Materials*, em parceria com o projeto chamado Sistema Alpha. O conector analisado era formado por meio de barras circulares com formato helicoidal, denominado conector espiral (Chaves., 2009).

No Brasil alguns tipos de conectores alternativos têm sido estudados, como é o caso do conector do tipo Crestbond, derivado do conector Perforbond e avaliado experimentalmente por Veríssimo (2007) e do conector de cisalhamento do tipo “V”, desenvolvido e avaliado experimentalmente por Cavalcante (2010).

Pesquisas recentes mostram esforços do meio científico direcionados à compreensão do comportamento de conectores não soldados, como apresentado nos trabalhos de Rehman *et al.* (2016) e Pathirana *et al.* (2015). Trabalhos recentes também veem abordando o estudo de conectores alternativos desenvolvidos com materiais conhecidos da construção civil, como pode ser observado na pesquisa desenvolvida por Barbosa (2016), onde foram utilizados vergalhões de aço CA50-A no desenvolvimento de novos tipos de conectores de cisalhamento.

2 CONCEPÇÃO DOS CONECTORES TRELIÇADOS

O conector de cisalhamento proposto foi testado em laboratório através de ensaios de *push-out* realizados por Barbosa (2016), estes ensaios foram previamente simulados através do método dos elementos finitos no programa ANSYS 14.5. O modelo numérico foi baseado nos procedimentos adotados por Cavalcante (2010), que por sua vez se baseou nos estudos

numéricos de Tristão (2002), com modelos numéricos calibrados para ensaios *push-out* feitos por Kalfas et al (1997), obtendo resultados muito próximos aos experimentais.

2.1 Conector de cisalhamento treliçado

O conector proposto consiste em um vergalhão de aço para concreto armado CA50-A dobrado em formato triangular, conforme ilustra a Fig. 1.

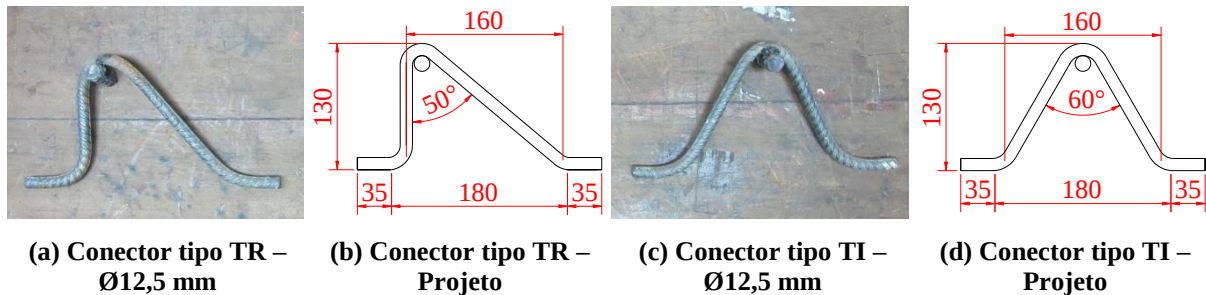


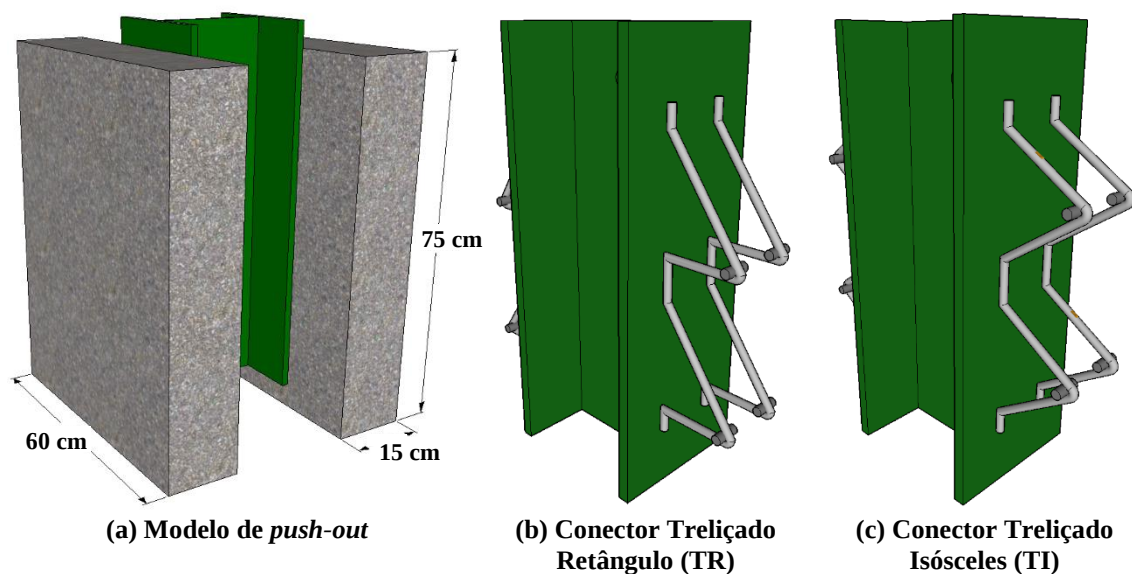
Figura 1. Detalhes dos conectores de cisalhamento (dimensões em milímetros)

O conector do tipo TR (treliçado retângulo) foi idealizado e construído com uma haste vertical em sua disposição geométrica, esta haste vertical foi posicionada no lugar onde estaria o *stud bolt*. Para o conector TI (treliçado isósceles) a barra dobrada apresenta duas hastes inclinadas. No conector TR, a partir do topo da haste vertical, realizou-se a dobra da barra de aço com um ângulo de 50° e para o conector TI, com o vértice do triângulo no mesmo lugar geométrico da ancoragem do *stud bolt*, realizou-se a conformação do vergalhão de aço com o mesmo distanciamento entre os pontos de solda dos conectores do tipo TR.

Para os dois tipos de conectores estudados foram soldadas barras de aço CA-50 com 40 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro na parte superior de cada conector, na parte interna do vértice do triângulo, para auxílio no combate ao *uplift* (afastamento transversal entre a laje e o perfil metálico), assim como a “cabeça” do *stud bolt* faz. A ligação dos conectores treliçados com o perfil metálico foi feita com solda de entalhe nas extremidades horizontais anterior e posterior dos conectores, paralelas ao eixo longitudinal do perfil metálico.

Os conectores deste trabalho foram simulados, através de modelos numérico do ensaio de *push-out* padronizado pela EN 1994-1-1:2004, através do método dos elementos finitos, para que se pudesse avaliar a potencialidade de seu emprego em obras de engenharia.

Inicialmente, pensou-se em executar o conector em módulos com dois triângulos dobrados na mesma barra de aço, de forma contígua. No entanto, para manter um padrão satisfatório de precisão no posicionamento dos conectores, para um ensaio controlado em laboratório, optou-se por executar os conectores compostos por um triângulo apenas. Assim foram executados 8 conectores para cada modelo experimental, sendo cada conector fixado, portanto, de forma independente dos demais. Na Figura 2 são apresentados detalhes dos modelos de *push-out* simulados numericamente.

Figura 2. Conectores treliçados no ensaio de *push-out*

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentados resultados de análises numéricas realizadas com o uso de ferramentas computacionais que se baseiam no método dos elementos finitos para a análise estrutural.

Ensaio experimentais são de fundamental importância no estudo e compreensão de fenômenos que necessitam de esclarecimentos quanto a diversos parâmetros. No caso do estudo de conectores de cisalhamento, os resultados experimentais são de grande importância na validação e aprimoramento dos métodos teóricos de estimativa de resistência e classificação quanto à ductilidade, apesar das limitações quanto aos resultados que geralmente são obtidos em pontos específicos do modelo experimental e quanto aos elevados custos na construção e ensaio de modelos de laboratório. Quanto a esses aspectos, a realização de estudos numéricos é de grande valia na análise do comportamento de novos tipos de conectores de cisalhamento, pois, desde que o modelo numérico se apresente calibrado, pode-se obter resultados para o modelo como um todo que podem servir de complementação para as análises experimentais.

Nos ensaios de *push-out*, os modelos são, geralmente, idealizados com 8 conectores dispostos em fila dois a dois em cada flange do perfil metálico. Na modelagem numérica, tomou-se proveito do plano de simetria perpendicular ao plano da alma, analisando-se assim metade dos modelos submetidos a ensaios de *push-out*, o que contribui para a diminuição do número de elementos finitos e consequentemente para otimização do processamento e da convergência do modelo numérico.

Quanto à malha de elementos finitos utilizada, buscou-se realizar um refinamento nas regiões onde eram esperados maiores esforços e deslocamentos no modelo numérico, notadamente nas regiões próximas dos conectores de cisalhamento, otimizando com isso o processamento de dados durante a resolução do modelo numérico.

3.1 Modelagem numérica no ANSYS

O estudo numérico realizado através do software ANSYS, versão 14.5, constituiu-se da simulação dos ensaios de *push-out*, normatizados pela EN 1994-1-1:2004.

A análise numérica incorporou o estudo dos conectores *stud bolt*, conector de cisalhamento que se apresenta como solução mais empregada para vigas mistas de aço-concreto atualmente e dos conectores treliçados, para a realização de análise comparativa quanto ao comportamento estrutural. Assim, foram desenvolvidos 3 modelos numéricos, a partir da calibração realizada com resultados experimentais. Um com conectores *stud bolt* de 19,0 mm de diâmetro, utilizado como modelo de referência, e outros 2 com conectores treliçados, com barras de 12,5 mm de diâmetro e aço CA-50.

3.1.1 Elementos finitos adotados

Nos modelos numéricos desenvolvidos foram utilizados elementos finitos sólidos e elementos de contato. Os conectores de cisalhamento, o perfil metálico e as lajes foram modelados com elementos sólidos e nos contatos entre a laje, os conectores e o perfil metálico foram utilizados elementos de contato.

Durante o processo de geração da malha de elementos finitos no ANSYS *workbench* há a possibilidade de se utilizar os elementos finitos selecionados automaticamente pelo software ou escolher outros dentro de uma biblioteca, através de linhas de comando inseridas no momento da geração e aprimoramento das malhas. Para a modelagem dos conectores, do perfil metálico e da laje foi utilizado o elemento SOLID186, apresentado na Fig. 3, implementado através de linhas de programação.

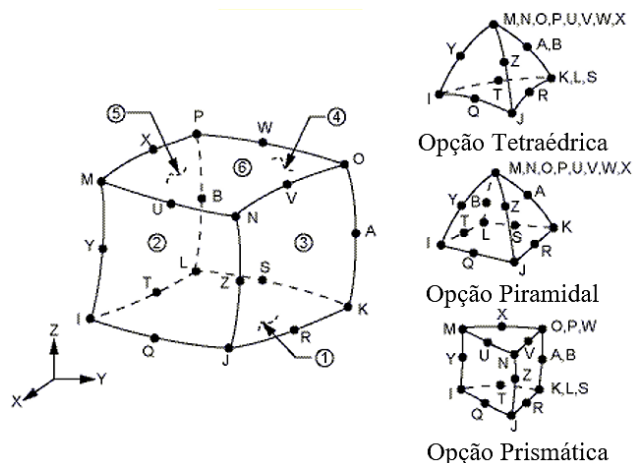


Figura 3. Geometria do elemento SOLID186 (Biblioteca do ANSYS 14.5)

O elemento SOLID186 possui 20 nós com três graus de liberdade por nó: translação nas direções x , y e z . Este elemento permite plasticidade, hiperplasticidade, fluência, enrijecimento, grandes deslocamentos e capacidade para grandes deformações.

A interação entre as superfícies do conector de cisalhamento e do concreto das lajes dos modelos foi realizada através de elementos de contato aplicados nas superfícies dos conectores e na zona de contato das lajes com os conectores de cisalhamento.

Foi considerada ligação do tipo rígido-flexível e contato do tipo superfície-superfície para a simulação da interação entre os materiais aço e concreto. Neste caso o concreto foi considerado rígido e o aço flexível. O elemento aplicado na superfície flexível (o aço) é o elemento de “contato” enquanto o elemento sobre a superfície rígida (o concreto) é identificado como “alvo”, conforme ilustrado na Fig. 4. As normais destes elementos devem estar orientadas em sentidos opostos.

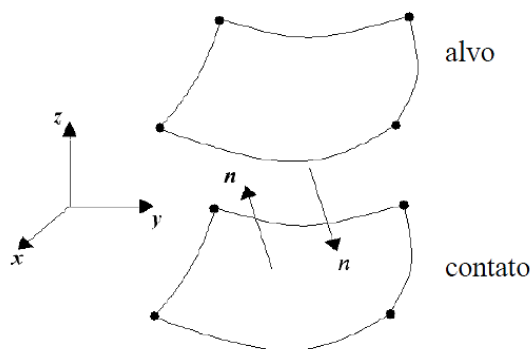


Figura 4. Sentido das normais dos elementos de superfície utilizados para descrever o contato entre o aço dos conectores e o concreto da laje (Cavalcante, 2010)

Para simular o contato entre os materiais aço e concreto foram utilizados os elementos CONTA174, para os elementos de “contato”, ou seja, o aço, e o TARGE170 para os elementos “alvo”, o concreto. Os dois elementos são associados considerando-se uma constante de atrito. Nas Figuras 5 e 6 são mostrados detalhes dos elementos de contato TARGE 170 e CONTA 174.

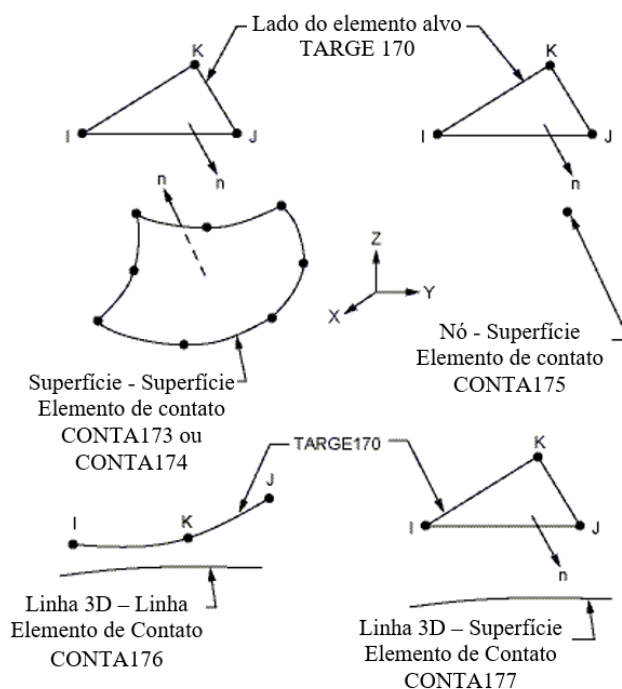
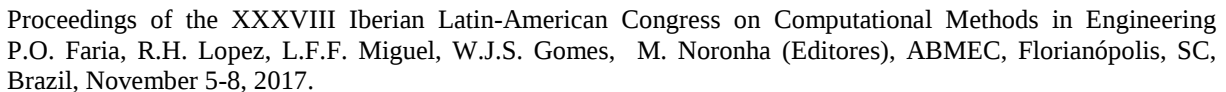


Figura 5. Geometria do elemento alvo TARGE170 e possibilidades de interação com os elementos de contato (Biblioteca do ANSYS 14.5)



Entre a laje de concreto e o perfil metálico foram adotados elementos de contato que possibilitaram a simulação da ausência de atrito entre as superfícies de contato destes componentes dos modelos de *push-out*, conforme ilustrado na Fig.7(d).

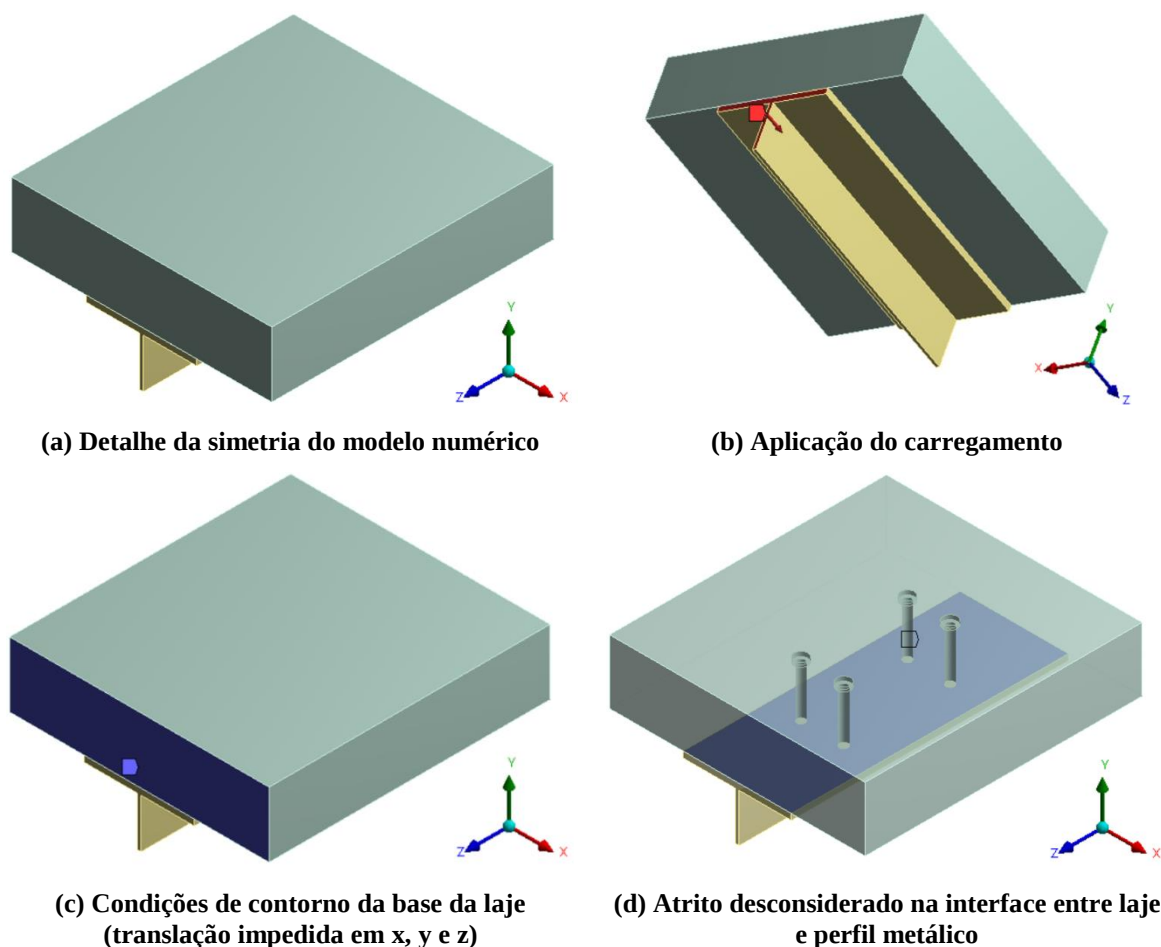


Figura 7. Simetria, condições de contorno e aplicação de carga nos modelos numéricos

3.1.2.2 Acoplamentos e vínculos entre elementos

Quanto aos acoplamentos e vínculos, os elementos finitos de cada material estão acoplados por meio de nós coincidentes ou através de elementos de contato. O par de elementos de contato, apesar de terem a mesma geometria, não compartilham o mesmo nó. Desta forma as condições de acoplamento variam de acordo com os materiais. Os acoplamentos adotados foram:

- Perfil/Conectores – a região de união do conector e do perfil compartilha o mesmo nó, garantindo assim a união perfeita entre estes elementos.
- Laje/Conectores – os elementos das faces coincidentes possuem a mesma geometria, porém não compartilham o mesmo nó. Nesta região foi aplicado um refinamento na malha de elementos finitos. A interação entre estes materiais é realizada por intermédio dos elementos de contato.
- Perfil/Laje – as faces coincidentes dos elementos finitos destes componentes apresentam a mesma geometria, mas não estão ligadas pelos mesmos nós. Nesta região foram aplicados elementos de contato para simular a ausência de atrito entre perfil metálico e laje de concreto.

Foram utilizados elementos de contato nas regiões de interface entre aço e concreto, do perfil metálico e dos conectores de cisalhamento com o concreto das lajes. Os elementos de contato utilizados foram o TARGET170 e o CONTA174, onde sua aplicação ocorre de forma automática no ANSYS v.14.5-Workbenck. O programa identifica as regiões de contato entre os distintos materiais e aplica automaticamente os elementos de contato. A seguir são apresentados os possíveis contatos que podem ser adotados para modelagem numérica no ANSYS versão 14.5 – *Workbenck*.

- *Bonded* (alta aderência) - esse tipo de contato é linear, permanecendo fixo nas duas direções, normal e tangencial;
- *No Separation* (não separa) - as faces em contato são unidas apenas na direção normal, permitindo pequenos deslocamentos na direção tangencial, sendo também lineares;
- *Frictionless* (sem atrito) - as faces são livres para se mover nas duas direções. Este contato, assim como o *Rough* e *Frictional*, introduzem não linearidades;
- *Rough* (rugoso) - as duas faces são livres para separarem na direção normal, na direção tangencial assume-se grande atrito, impedindo o deslizamento;
- *Frictional* (atrito) - as faces são livres para separarem apenas na direção normal, ocorrendo deslizamento apenas quando a força tangencial ultrapassar a força de atrito.

Para os modelos numéricos desenvolvidos foram utilizados contatos do tipo *frictionless* entre o perfil metálico e as lajes de concreto e contato tipo *bonded* para a região de interação entre conectores de cisalhamento e lajes de concreto.

3.1.2.3 Critérios para a análise não-linear do aço e do concreto

Visando otimizar o modelo numérico e obter resultados próximos aos experimentais foram adotados comportamentos não lineares para os materiais simulados na modelagem numérica, conforme apresentado na Fig. 8 para os aços dos vergalhões, do perfil metálico e dos *studs*. Na Figura 8(d) é apresentado o comportamento adotado para o concreto das lajes.

O aço dos conectores de cisalhamento treliçados é do tipo CA-50 e seu comportamento foi descrito através da curva tensão x deformação, Fig. 8(a), obtida através de ensaios de caracterização das barras de aço por tração direta. O comportamento do material do conector *stud* é apresentado na Fig. 8(b) e foi o mesmo adotado por Tristão (2005) e Cavalcante (2010).

O comportamento do concreto, Fig. 8(d), foi adotado seguindo o diagrama tensão-deformação idealizado, apresentado na seção 8.2.10.1 da ABNT NBR 6118:2014 para análises no estado-limite último, considerando uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa.

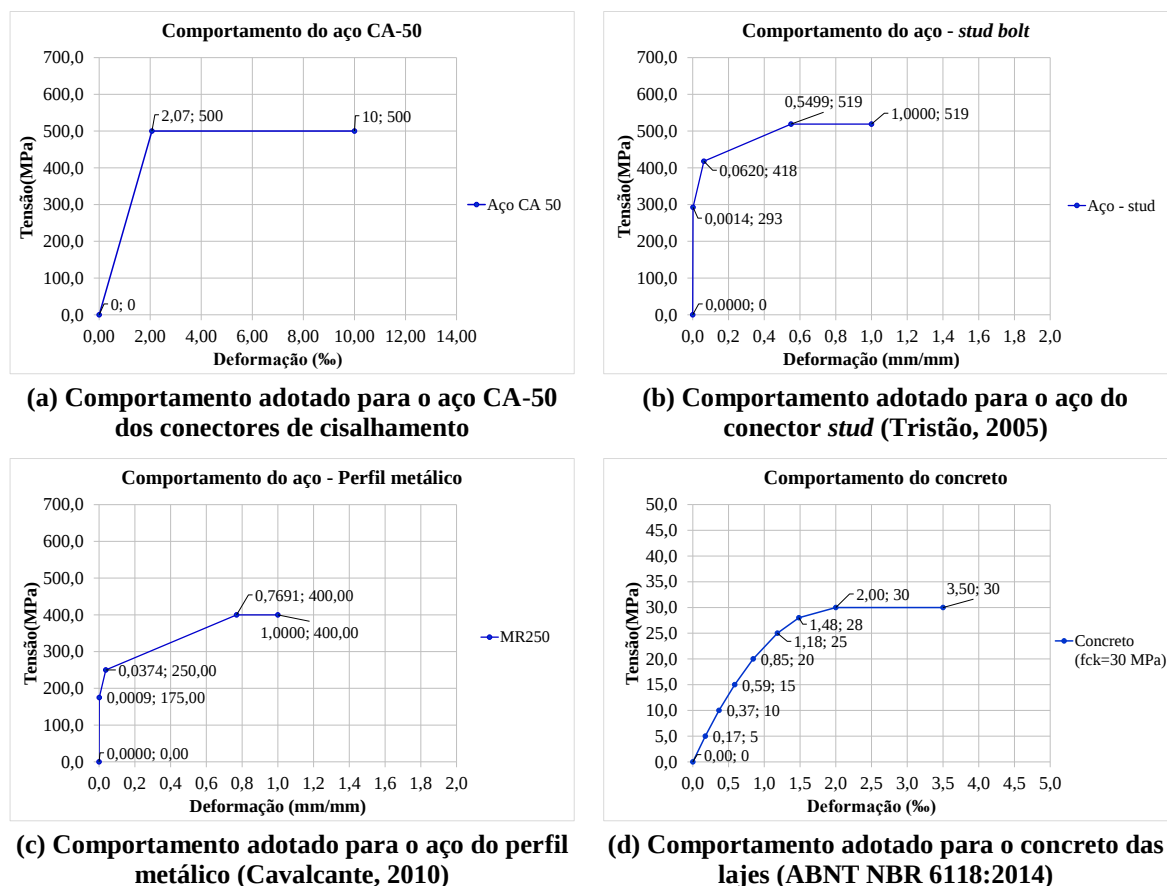


Figura 8. Propriedades dos materiais considerados nos modelos numéricos

Na modelagem numérica adotou-se o coeficiente de Poisson (ν) do aço igual a 0,30 e para o concreto, ν é igual a 0,20.

O ANSYS versão 14.5 é capaz de prever a falha do concreto e do aço por meio dos critérios de ruína quanto ao esmagamento e fissuração para o concreto e ruptura para o aço. Para ambos os materiais foram implementados diagramas tensão x deformação de comportamento multilinear que serviram como base para a convergência dos resultados das simulações numéricas.

3.1.3 Modelo do conector *stud bolt* em elementos finitos

Visando a validação dos resultados numéricos para os conectores treliçados, foram feitas calibrações do modelo numérico com conectores *stud bolt* considerando ensaios de *push-out* realizados por Cavalcante (2010) para modelos experimentais com conectores do tipo *stud bolt* com 19 mm de diâmetro. A Figura 9 ilustra este modelo em elementos finitos empregado na calibração e também como base comparativa para os conectores propostos neste trabalho.

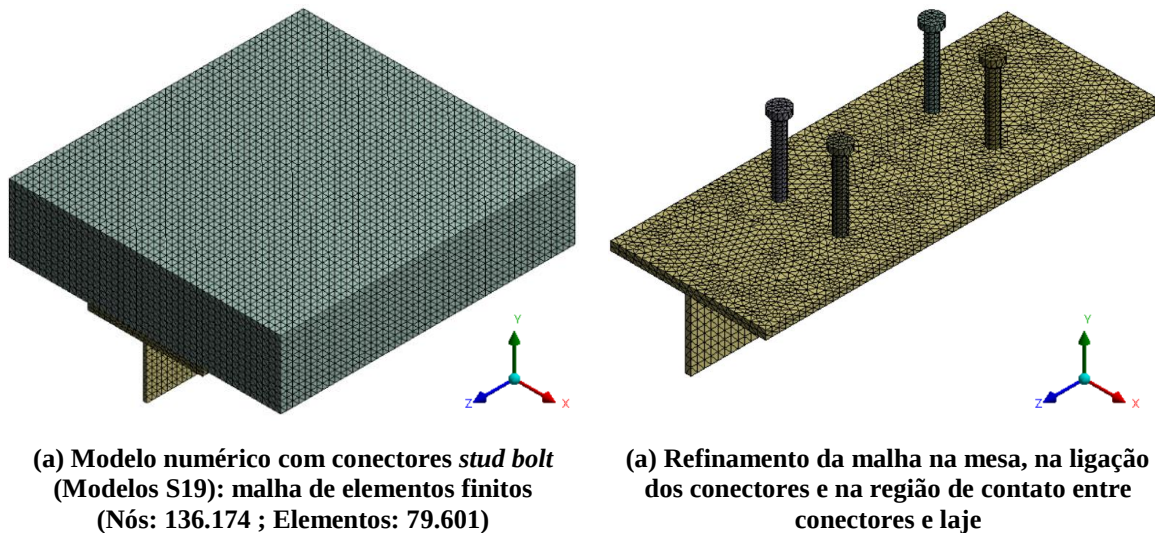


Figura 9. Modelo em elementos finitos utilizado para a calibração com o ensaio experimental do conector *stud bolt*

3.1.3.1 Resultados da Calibração

Para a calibração do modelo numérico seguiu-se a metodologia empregada por Barbosa (2016), com ênfase na análise do deslizamento longitudinal do perfil metálico em relação à laje de concreto, parâmetro esse de grande importância para a caracterização do conector de cisalhamento quanto à sua ductilidade. A Figura 10 dispõe os resultados da calibração do modelo em elementos finitos com relação aos resultados experimentais obtidos por Cavalcante (2010).

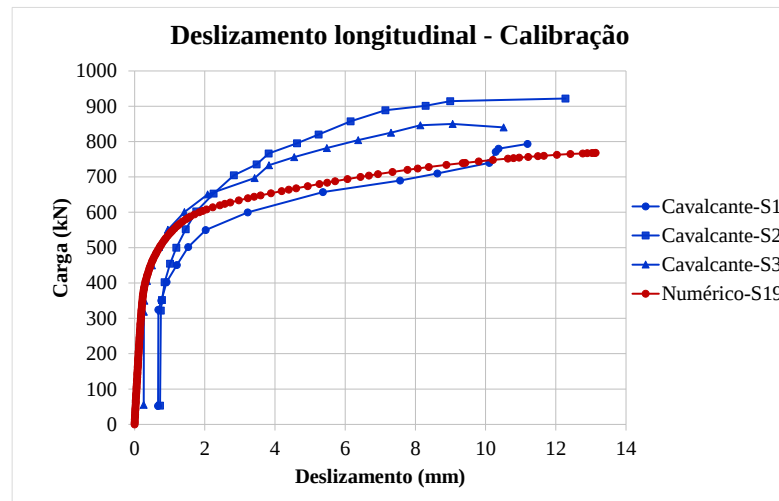


Figura 10. Resultado da calibração para o deslizamento longitudinal do perfil metálico

Com a calibração, o modelo numérico apresentou boa representatividade para os deslizamentos longitudinais do perfil metálico em relação à laje de concreto e a distribuição de tensões nos conectores de cisalhamento e no perfil metálico. Estes resultados foram utilizados como referência para a avaliação do comportamento e da empregabilidade dos conectores propostos neste trabalho.

3.1.4 Modelos dos conectores treliçados em elementos finitos

Os modelos elaborados para os conectores treliçados seguiram as características geométricas e de malha do modelo com conectores *studs* calibrado com os resultados experimentais.

As dimensões adotadas nos modelos numéricos foram as mesmas consideradas nos modelos experimentais, realizando-se a modelagem de apenas metade dos modelos submetidos aos ensaios de *push-out* e utilizando a ferramenta de simetria do ANSYS, visando a redução do esforço computacional na resolução das simulações numéricas. Definida a geometria para os modelos numéricos de *push-out* procedeu-se sua discretização com elementos finitos sólidos. Na Figura 11 são apresentados detalhes das geometrias e das malhas de elementos finitos dos modelos com conectores treliçados de 12,5 mm de diâmetro.

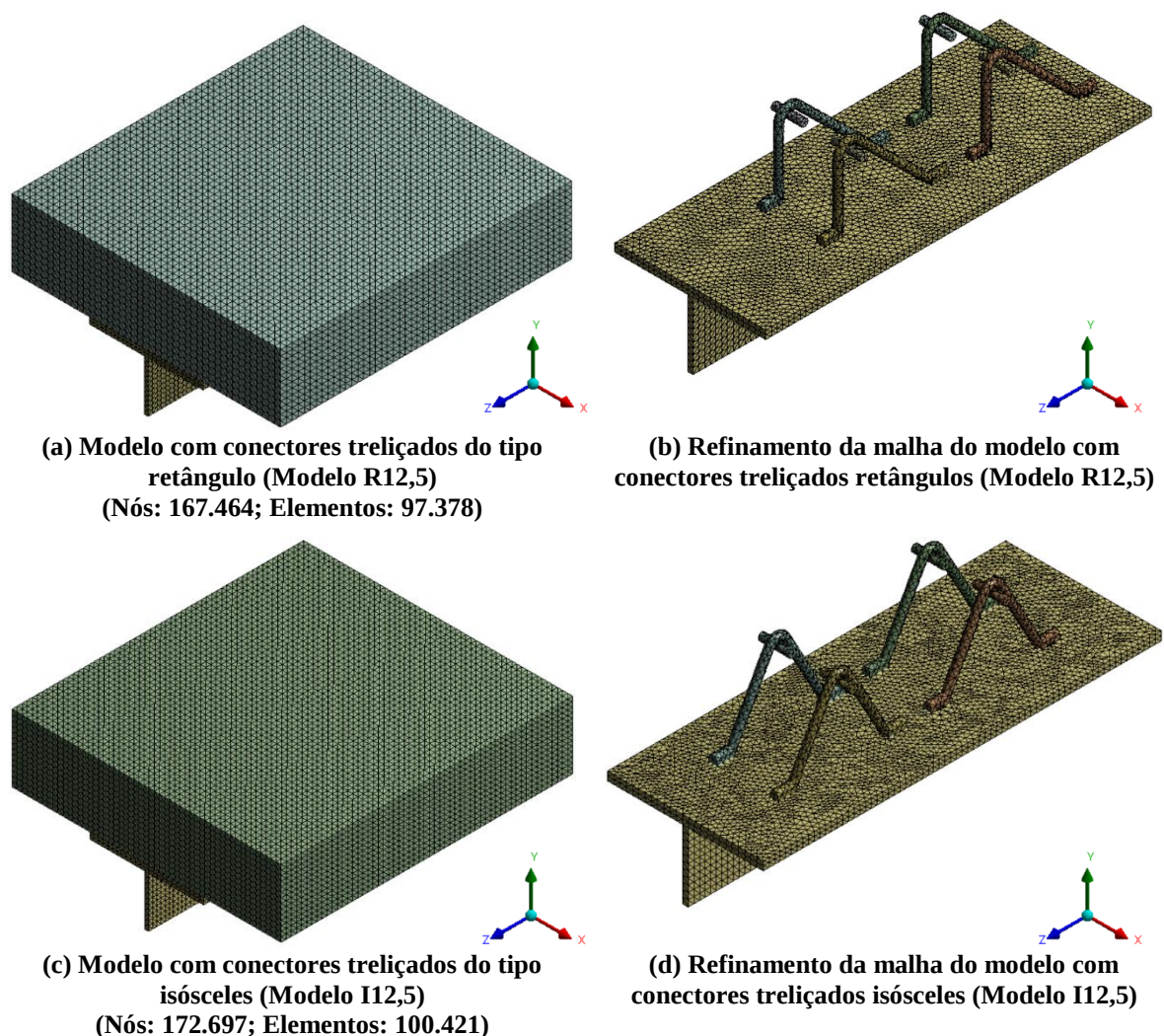


Figura 11. Modelos em elementos finitos dos ensaios de *push-out* para os conectores treliçados e orientação dos eixos de coordenadas

Para a malha de elementos finitos empregada buscou-se realizar um refinamento nas regiões de concentração de tensões, como é o caso da região de conexão entre o perfil metálico e os conectores de cisalhamento. Para melhor convergência dos resultados buscou-se

refinar a malha na região de contato entre a laje e os conectores e na região de contato entre laje e perfil metálico, como pode ser observado na Fig. 11.

3.1.5 Resultados das modelagens numéricas

Nesta seção são apresentados os resultados de deslizamentos longitudinais dos perfis metálicos e da distribuição de tensões para os modelos analisados.

3.1.5.1 Deslizamento longitudinal relativo entre perfil metálico e laje

O deslizamento do perfil metálico em relação às lajes de concreto é um dos principais parâmetros a serem obtidos nos ensaios de *push-out*, através destes dados pode ser realizada a classificação do conector analisado quanto sua ductilidade e sua capacidade de carga. A Figura 12 traz as curvas de força x deslizamento obtidas com as simulações numéricas realizadas.

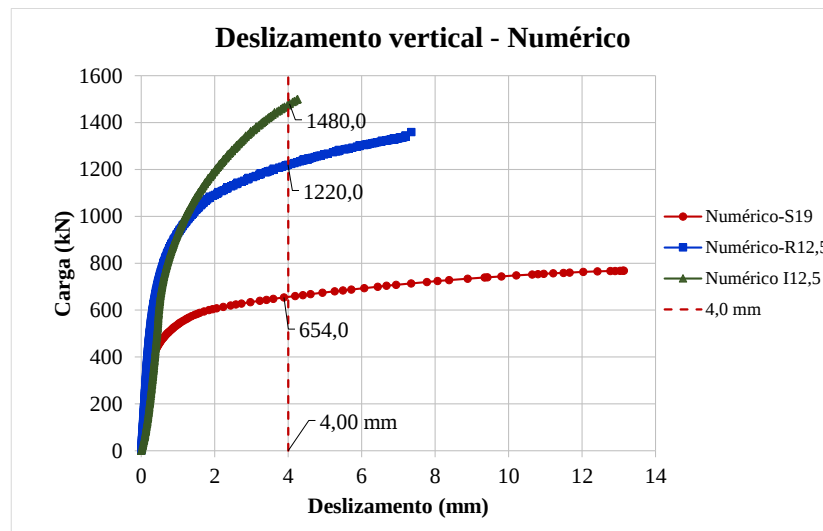


Figura 12. Curvas de força x deslizamento obtidas com as simulações numéricas

O reforço proporcionado pelas barras inclinadas garante um melhor desempenho dos conectores treliçados em relação aos conectores *stud bolt*, permitindo uma melhor ligação entre o perfil metálico e a laje de concreto. Observa-se que os conectores treliçados permitem uma redução da seção transversal do conector com ganho de capacidade resistente em relação aos conectores *stud bolt*.

Estabelecendo como referência um deslizamento de 4,0 mm, observa-se que a carga atuante na simulação numérica dos modelos com conectores treliçados com diâmetro de 12,5 mm é de 1220 kN para o modelo com conectores do tipo retângulo e de 1480 kN para o modelo com conectores treliçados do tipo isósceles, como pode ser observado na Fig. 12. Na Tabela 3.1 são apresentados os valores de deslizamentos longitudinais dos perfis metálicos para uma intensidade de carga de 600 kN atuando nos modelos numéricos.

Tabela 1. Deslizamentos dos perfis metálicos para uma intensidade de carga de 600 kN

Conector	Deslizamento (mm)
<i>Stud bolt</i>	1,84
Treliçado Retângulo	0,31
Treliçado Isósceles	0,48

Com o intuito de avaliar de forma mais abrangente o comportamento dos modelos desenvolvidos foram obtidas as distribuições dos deslocamentos na direção do eixo z para os perfis metálicos e para os conectores de cisalhamento, bem como a deformada dos conectores para diferentes níveis de carregamento. Na Figura 13 são apresentados os valores obtidos de deslocamentos na direção z para os perfis metálicos e para os conectores de cisalhamento dos modelos com *studs* e com os conectores treliçados analisados neste trabalho.

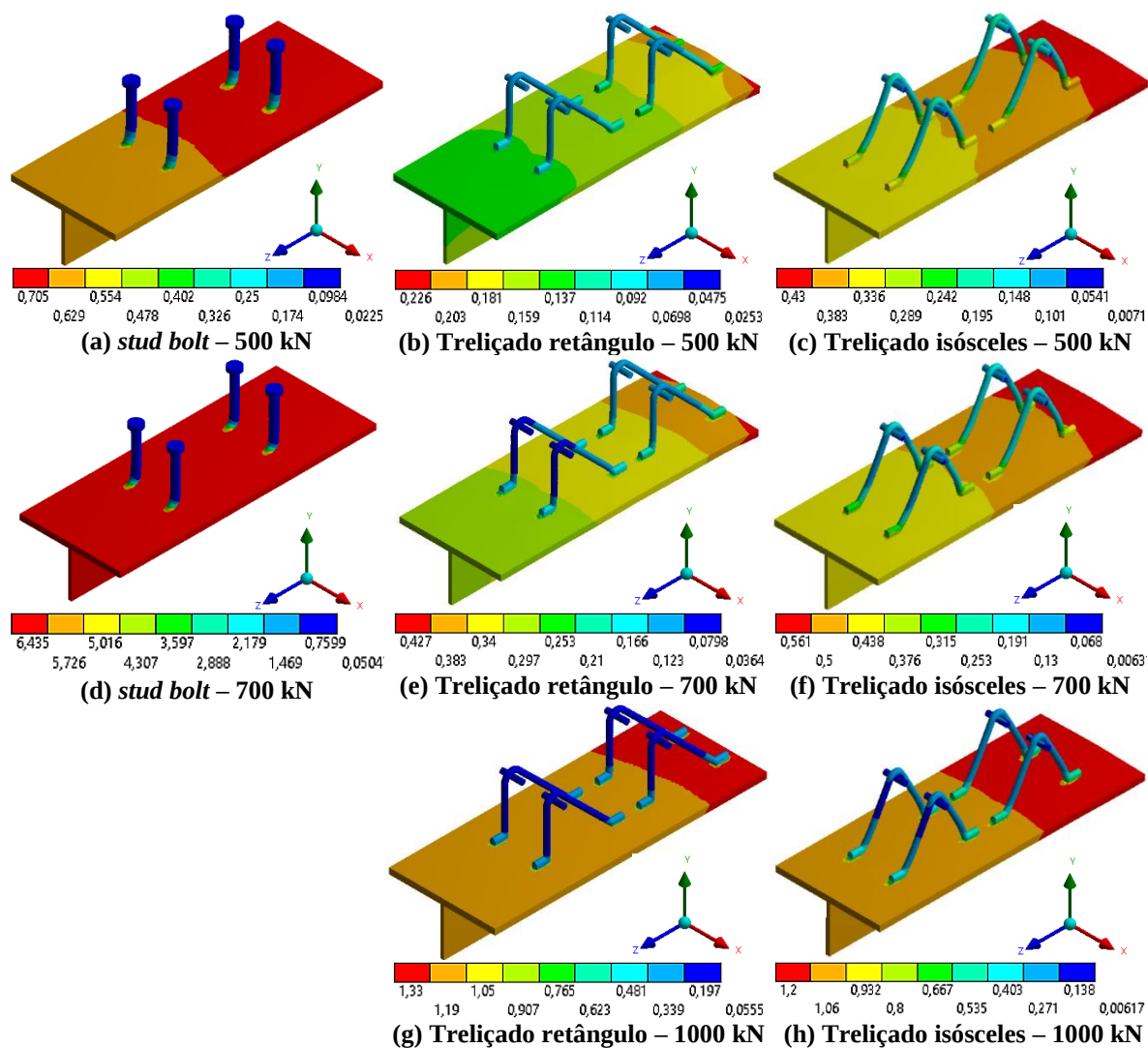


Figura 13. Deslocamentos na direção do eixo z para os perfis metálicos e para os conectores de cisalhamento (resultados em milímetros)

Os resultados de deslocamentos na direção z foram obtidos para os carregamentos de 500 kN, 700 kN e 1000 kN, considerando os modelos numéricos de *push-out* completos, com as duas lajes e a seção do perfil metálico inteira. Foram aplicados 75 passos de carga em incrementos de 10 kN até à ruptura dos modelos, com a carga máxima de até 750 kN para a metade do modelo de *push-out* elaborado, o que corresponde a até 1500 kN de carga máxima no modelo completo de *push-out*, com as duas lajes e o perfil com seção inteira (desconsiderando o comando de simetria empregada na modelagem numérica para otimização do processamento computacional).

Com os resultados das modelagens numéricas observa-se que os perfis metálicos e os conectores treliçados apresentam deslocamentos na direção do eixo z menores, para os mesmos níveis de carregamento, em relação aos modelos com conectores *stud bolt*. Os conectores treliçados isósceles mostraram-se mais rígidos em relação aos conectores treliçados retângulo para maiores intensidades do carregamento atuante.

3.1.5.2 Distribuição de tensões nos modelos numéricos

As distribuições de tensões foram verificadas nos perfis metálicos e nos conectores de cisalhamento, sendo avaliadas pela tensão equivalente de Von Mises.

Nesta análise considerou-se a distribuição de tensões nos modelos numéricos para três situações de carga distintas apresentadas na Fig. 14: 500 kN, 700 kN e 1000 kN atuando nos modelos de *push-out*.

Analisando a distribuição de tensões nas mesas dos perfis, observa-se que nos modelos com conectores treliçados os esforços se distribuem em uma maior área em relação aos modelos com conectores *stud bolt*, visto que os conectores treliçados se apoiam em dois pontos distintos na mesa do perfil. As maiores solicitações das mesas dos perfis podem levar à ruptura na ligação, no metal base (perfil), antes do uso efetivo da capacidade resistente do aço ASTM A108 dos conectores *stud bolt*.

Os maiores valores de *tensão* foram obtidos para os modelos com conectores treliçados, na região próxima ao plano de cisalhamento entre laje e perfil metálico. As maiores solicitações na região da solda dos conectores treliçados conduziram à execução de soldas mais resistentes no programa experimental realizado por Barbosa (2016), com eletrodos revestidos do tipo E70 na região de coalescência do perfil metálico com os conectores de cisalhamento.

O modelo numérico com conectores *studs* apresentou menores intensidades de tensões, contudo permitiu maior deslizamento do perfil para os níveis de carregamento avaliados. Para maiores deslizamentos do perfil, maiores as deformações dos conectores.

Os resultados positivos das análises numéricas em elementos finitos, especialmente do ponto de vista dos deslizamentos longitudinais relativos entre perfil metálico e laje, creditaram os conectores treliçados para estudos experimentais realizados por Barbosa (2016).

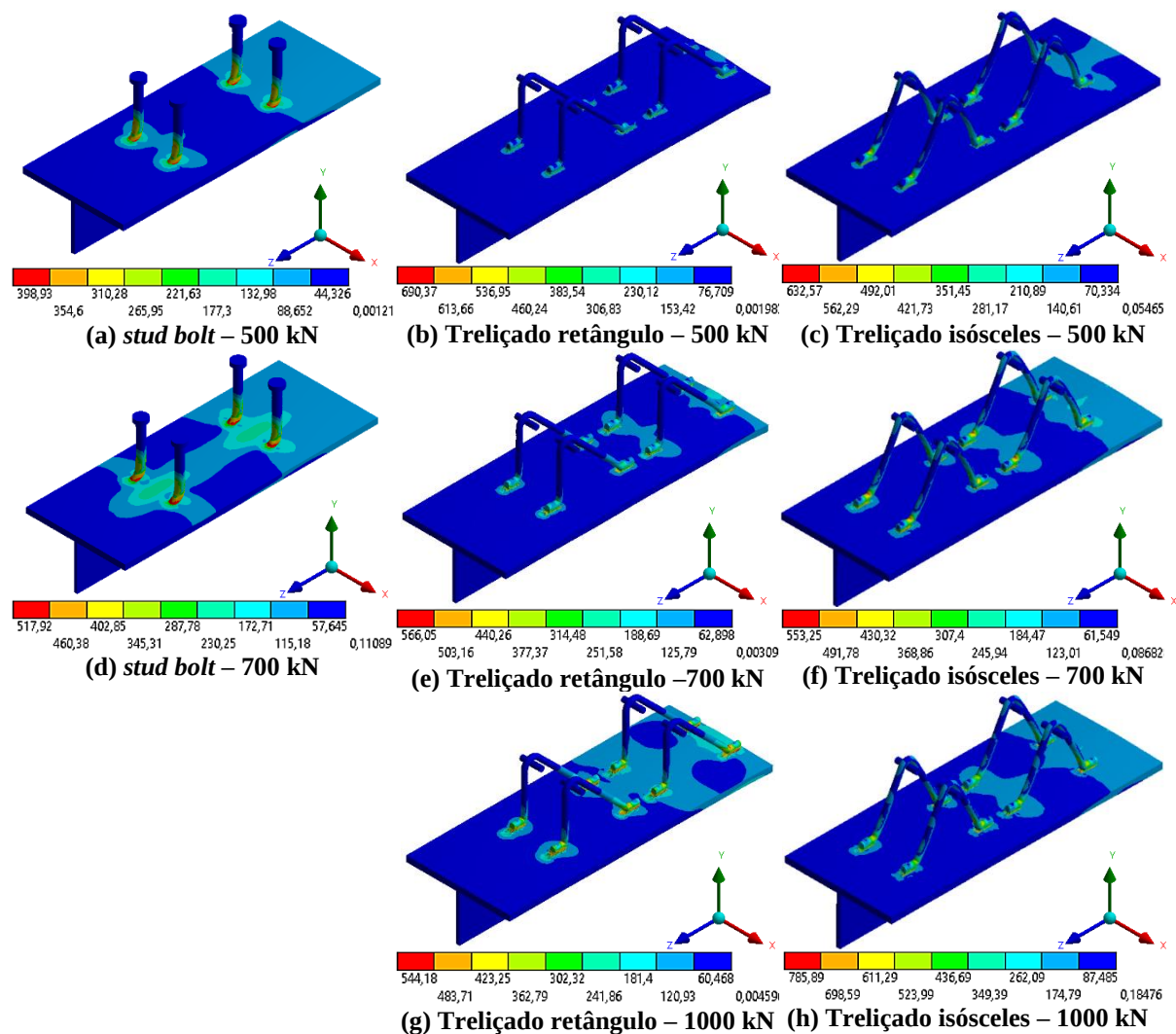


Figura 14. Distribuição de tensões equivalentes de Von Mises (MPa) nos modelos numéricos.

4 CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações numéricas para avaliação das potencialidades e eficiência dos conectores de cisalhamento treliçados estudados neste trabalho. A análise numérica incorporou o estudo dos conectores *stud bolt* e treliçados para a realização de análise comparativa quanto ao comportamento estrutural. Assim, foram desenvolvidos 3 modelos numéricos a partir da calibração realizada com resultados experimentais obtidos no trabalho de Cavalcante (2010). Um com conectores *stud bolt* de 19,0 mm de diâmetro, utilizado como modelo de referência, e os outros dois com conectores treliçados, variando-se o formato dos conectores e utilizando-se barras de 12,5 mm de diâmetro com as propriedades do aço CA-50 para discretização dos conectores de cisalhamento. A seguir são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos estudos numéricos efetuados:

- Os modelos numéricos elaborados apresentaram comportamentos semelhantes quanto ao deslizamento longitudinal, com acentuação dos deslizamentos para valores de carregamento acima de 80% da carga resistente máxima de cada modelo.

- Observou-se conformidade entre as curvas de carga versus deslizamento longitudinal obtidas através do modelo numérico com conectores *stud bolt* e os resultados experimentais obtidos por Cavalcante (2010) com ensaios de *push-out* de modelos com conectores *stud bolt*.
- Os conectores treliçados com 12,5 mm de diâmetro proporcionaram maiores valores de cargas resistentes em relação ao conector *stud bolt*. Tomando como referência um deslizamento de 4,0 mm observou-se carga maior para os modelos elaborados com conectores treliçados isósceles de 12,5 mm de diâmetro (1480,0 kN). Os modelos com conectores treliçados do tipo retângulo com 12,5 mm de diâmetro atingiram um deslizamento de 4,0 mm com uma carga de 1220,0 kN. O modelo numérico elaborado com conectores *stud bolt* atingiu 4,0 mm de deslizamento para uma carga de 654,0 kN.
- Os conectores treliçados isósceles e retângulo de 12,5 mm propiciaram ganhos de resistência de 92,3% e 74,4%, respectivamente, em relação aos conectores *stud bolt*.
- As regiões nas proximidades das soldas dos conectores e próximas ao plano de cisalhamento entre laje e perfil metálico são as mais solicitadas para os ensaios de cisalhamento direto regulamentados pela EN 1994-1-1:2004.
- Os conectores *stud bolt* apresentaram menores intensidades de tensões na mesa dos perfis metálico, mas com maior deslizamento longitudinal em relação aos conectores treliçados.
- Os conectores treliçados distribuem a tensão sobre uma maior área da mesa dos perfis metálicos em relação aos conectores *stud bolt*, uma vez que possui dois pontos de contato com a mesa por conector.
- Com as modelagens numéricas realizadas no ANSYS 14.5, observou-se, para maiores intensidades de carregamento nos conectores treliçados, maiores valores de tensões para os conectores treliçados isósceles e maiores deslizamentos longitudinais foram registrados para os conectores treliçados do tipo retângulo, isso considerando os mesmos níveis de carregamentos incidentes nos modelos numéricos.
- Os resultados positivos das análises numéricas em elementos finitos, especialmente do ponto de vista dos deslizamentos longitudinais e das cargas resistentes finais dos conectores, creditaram os conectores treliçados para serem avaliados experimentalmente por Barbosa (2016).
- Os resultados de deslizamentos longitudinais e tensões nos conectores, obtidos nas modelagens numéricas, foram importantes na orientação das instrumentações para obtenção das deformações específicas nos conectores de cisalhamento e dos deslocamentos através de LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) nos ensaios de *push-out* realizados por Barbosa (2016).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras de fomento à pesquisa, CNPQ e CAPES, pelo apoio financeiro que tornou capaz a realização da pesquisa abordada neste trabalho, à UnB por todo o suporte na realização desta pesquisa, às empresas CONCRECON e CPC ESTRUTURAS pela doação do concreto e dos perfis metálicos utilizados nos ensaios experimentais e a todos os pesquisadores e trabalhos citados neste artigo, por todo o conhecimento compartilhado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. *NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, W. C. S., 2016. *Estudo de Conectores de Cisalhamento em Barras de Aço para Vigas Mistas de Aço-Concreto*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 008A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 511p.
- Calvacante, O. R. O., 2010. *Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo 'V' em Vigas Mistas*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Chaves, I. A., 2009. *Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido*. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.
- European Committee for Standardization, 2004. *Eurocode 4- Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings*. Bruxelas.
- Kalfas, C. et al., 1997. Inelastic behavior of shear connection by a method based on FEM. *Journal of Construction Steel Research*, v.44.
- Pathirana S.W., B. Uy, O. Mirza, X. Zhu., 2015. *Strengthening of existing composite steel concrete beams utilizing bolted connectors and welded studs*. *Journal of Constructional Steel Research*, 114. pp. 417–430.
- Rehman N., D. Lam, X. dai, A.F. ashour., 2016. *Experimental study on demountable shear connectors in composite slabs with profiled decking*. *Journal of Constructional Steel Research*, 122. pp. 178–189.
- Tristão, G. A., 2002. *Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP/São Carlos.
- Veríssimo, G. S., 2007. *Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento*. Tese de Doutorado em Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, 290p.