



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

ESTUDO NUMÉRICO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO EM BARRAS DE AÇO PARA VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

Wallison Carlos de Sousa Barbosa

wallcsb@gmail.com

Doutorando em Estruturas – UnB

Latif Chater

latifchater@gmail.com

Mestre em Estruturas – UnB

Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante

otaviorc@hotmail.com

Professor Doutor – UFC

Luciano Mendes Bezerra

lmbz@unb.br

Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – UnB

Dyorgge Alves Silva

Dyorggeasilva@utfpr.edu.br

Doutorando em Estruturas – UnB

Campus Darcy Ribeiro, Edifício SG12, Universidade de Brasília, 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 com barras de aço CA50-A, proposto para uso em viga mista de aço e concreto. O conector proposto é de fácil execução e pode servir como alternativa viável ao uso dos conectores stud e '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 investigaram o comportamento dos modelos quanto à distribuição de tensões e deslizamento do perfil em relação às lajes dos modelos. Os resultados das análises numéricas proporcionaram uma visão global do funcionamento dos conectores stud e treliçados, com resultados que evidenciaram vantagens do conector treliçado em relação ao conector stud.*

Palavras 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.

2 CONCEPÇÃO DO CONECTOR TRELIÇADO E ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O conector de cisalhamento proposto foi testado em laboratório através de ensaios de *push-out*, estes ensaios foram previamente simulados através do método dos elementos finitos no programa ANSYS 11.0. 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 Figura 1.



Figura 1. Conector de cisalhamento treliçado

Procurou-se obter um conector análogo ao *stud bolt*, com uma parte vertical em sua disposição geométrica, posicionado no lugar onde estaria o *stud bolt*. Da haste vertical parte um reforço diagonal, dobrado a partir da mesma barra, com o ângulo de 45° e com o menor raio de dobramento possível, para que o comportamento se assemelhasse tanto quanto o possível ao de uma treliça, conforme mostra a Figura 2.

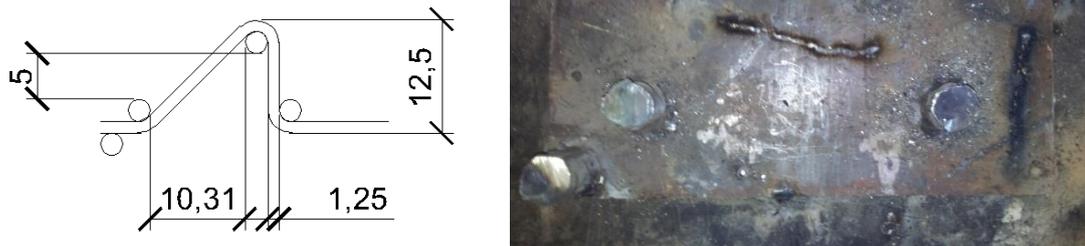


Figura 2. Detalhes da construção do conector de cisalhamento (medidas em cm)

Sob a dobra de 45° foram soldados recortes de barra de aço CA50-A com 40 mm de comprimento para ajudar a combater a separação transversal das lajes de concreto armado em relação aos perfis metálicos dos modelos (*uplift*), assim como a cabeça do *stud bolt*. Deve-se ressaltar que, na aplicação rotineira deste conector, é prevista uma barra transversal, o que garantirá uma completa interação do conector com a laje. A ligação do conector com o perfil metálico foi feita com solda de filete nos trechos horizontais anterior e posterior ao triângulo, paralelos ao eixo longitudinal do perfil metálico.

Este conector, após idealizado, foi inicialmente simulado numericamente seguindo os procedimentos do ensaio de *push-out* padronizados pela EN 1994-1-1 (2004), para que se pudesse examinar seu desempenho em uso. A partir dos resultados desta simulação, decidiu-se então prosseguir com o estudo do conector treliçado, que se mostrou promissor. A Figura 3 ilustra a disposição dos conectores nos modelos para os ensaios de *push-out*.

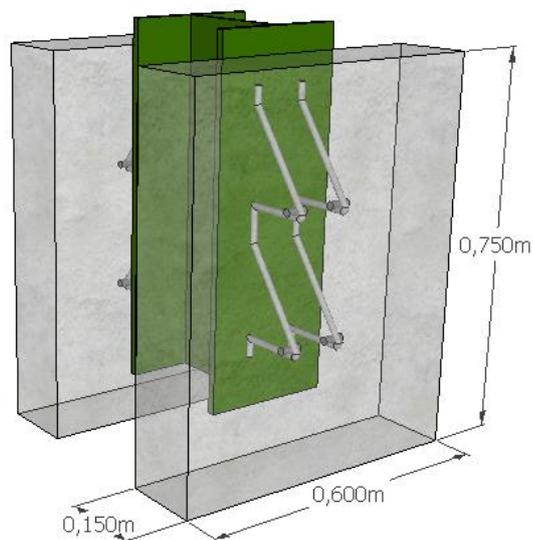


Figura 3. Conectores treliçados no ensaio de *push-out*.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

A análise numérica realizada simulou o próprio ensaio de *push-out*. Os modelos foram estudados numericamente através do método dos elementos finitos e foram calibrados com base nos ensaios experimentais de *push-out* do conector *stud bolt* realizados por Cavalcante (2010). Este foi baseado inicialmente no trabalho de Tristão (2002), em que são aplicados elementos sólidos tetraédricos para a laje de concreto e o perfil metálico. Para o conector de cisalhamento e a armadura do concreto foram empregados os mesmos elementos adotados por

Kotinda (2006): elementos de viga e barra, respectivamente. Toda análise foi desenvolvida através do software ANSYS v.11.

Buscou-se realizar, nesta análise, uma comparação com o *stud bolt*, uma vez que é o conector mais amplamente utilizado no mercado da construção civil e que, assim como o conector do tipo ‘U’, possui metodologia de dimensionamento disponível na ABNT NBR 8800:2008. Assim, foram feitos 4 modelos, a partir da calibração realizada, um com os conectores *stud bolt*, para referência, e os outros três com o conector treliçado, utilizando-se diferentes diâmetros de barras de aço CA50-A para os conectores: 10 mm, 12,5 mm e 16 mm de diâmetro.

No ensaio de *push-out*, são ensaiados 8 conectores, sendo 4 dispostos em 2 fileiras em cada mesa do perfil metálico (em cada laje). Na modelagem numérica, tomou-se proveito do plano de simetria perpendicular ao plano da alma, modelando-se assim, metade do modelo experimental, o que contribuiu para a diminuição do número de elementos finitos e consequentemente para o melhor processamento e convergência dos resultados dos modelos.

Quanto a malha de elementos finitos, buscou-se refiná-la nas regiões próximas aos conectores, obtendo resultados mais refinados nestas regiões e mantendo um menor esforço computacional na análise numérica dos modelos.

3.1 Elementos finitos adotados

O perfil metálico foi discretizado utilizando-se o elemento finito SOLID45. O elemento tem a capacidade de simular plasticidade, fluência, inchamento, enrijecimento por tensionamento, altas deflexões e grandes deformações. São até 8 nós (I, J, K, L, M, N, O e P) com conectividade, conforme mostra a Figura 4, e 3 graus de liberdade relativos as translações nas 3 direções ortogonais.

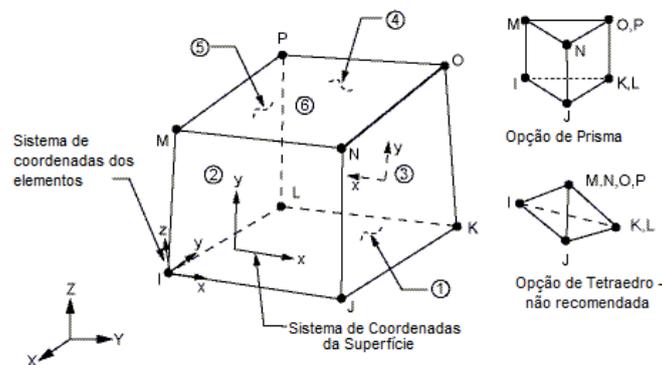


Figura 4. Elemento finito SOLID45 (adaptado do ANSYS v.11).

O concreto da laje foi modelado através de elementos do tipo SOLID65. Este elemento tridimensional é similar ao SOLID45, conforme ilustra a Figura 5, com a diferença de que simula a fissuração nas 3 direções ortogonais e o esmagamento na compressão. Além disso, permite a simulação de propriedades não-lineares dos materiais, a deformação plástica e a fluência.

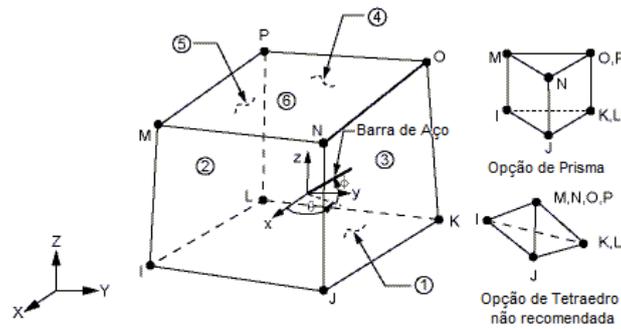


Figura 5. Elemento finito SOLID65 (adaptado do ANSYS v.11).

Os conectores foram modelados utilizando-se o elemento BEAM189, sendo cada segmento de reta do conector (a haste vertical e a diagonal) discretizado com dois elementos. O BEAM189 é indicado para análise de vigas esbeltas a moderadamente curtas, é baseado na teoria de vigas de Timoshenko e considera efeitos de deformação por cisalhamento. O elemento possui 3 nós I, J, K (com um quarto nó L opcional para definição da orientação do elemento) e 6 graus de liberdade por nó, referentes às translações e rotações nas 3 direções, conforme a Figura 6.

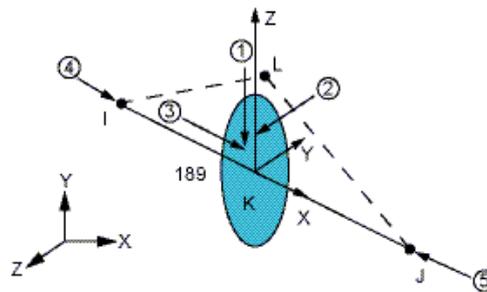


Figura 6. Elemento finito BEAM189 (adaptado do ANSYS v.11).

O contato entre o conector e o concreto da laje foi realizado através de elementos finitos específicos. Para este contato foi adotada a ligação do tipo rígido-flexível e superfície-superfície. Neste tipo de contato, 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 Figura 7. As normais destes elementos devem estar orientadas em sentidos opostos.

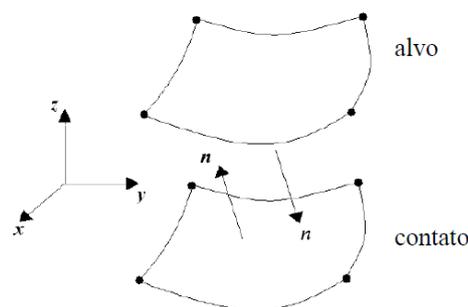


Figura 7. Sentido das normais dos elementos de superfície utilizados para descrever o contato entre o aço dos conectores e o concreto da laje. (Cavalcante, 2010)

Os elementos finitos utilizados no programa ANSYS v.11 foram o CONTAT173, para os elementos de “contato”, ou seja o aço, e o TARGE170 para os elementos “alvo”, o concreto.

Os dois elementos, ilustrados na Figura 8, são associados através do Coeficiente de Rigidez Normal (FKN), como mostra a Figura 9.

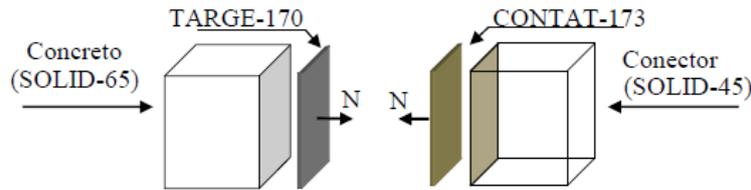


Figura 8. Elementos finitos de contato, conforme empregados no modelo numérico. (Cavalcante, 2010)

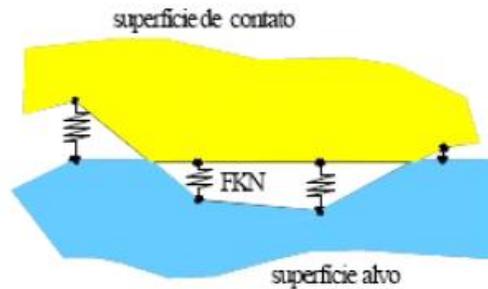


Figura 9. Constante de Rigidez Normal FKN dos elementos de contato e penetração entre eles (Barbosa, 2000)

O Coeficiente de Rigidez Normal (FKN) é uma constante utilizada pelo software para determinar a rigidez à penetração ou separação entre materiais, através da Equação (1):

$$R_{final} = FKN \cdot R_{est} \quad (1)$$

Em que:

R_{final} é a rigidez final de cálculo;

R_{est} é a rigidez estimada pelo Ansys através das características do material.

O software admite valores de FKN entre 0,01 e 1. Valores altos da rigidez podem causar problemas de convergência e por isso é geralmente recomendado que se obtenha um valor relativamente baixo que produza pequenas penetrações. Neste trabalho, porém, foi possível empregar FKN de 1, por tentativa e erro, com o intuito de produzir penetração máxima da ordem de 0,1 mm entre o concreto e o aço.

3.2 Calibração do modelo numérico do *stud bolt* com resultados experimentais e critérios para a análise não-linear

Para garantir a eficiência da análise numérica do conector treliçado, foi feita uma calibração comparando-se o modelo numérico que simula o ensaio de *push-out* do *stud bolt* com os resultados obtidos nos ensaios experimentais de conectores do tipo *stud bolt*, ambos desenvolvidos por Cavalcante (2010). A Figura 10 ilustra este modelo em elementos finitos, empregado na calibração e como base para os critérios de modelagem numérica do conector proposto neste trabalho.

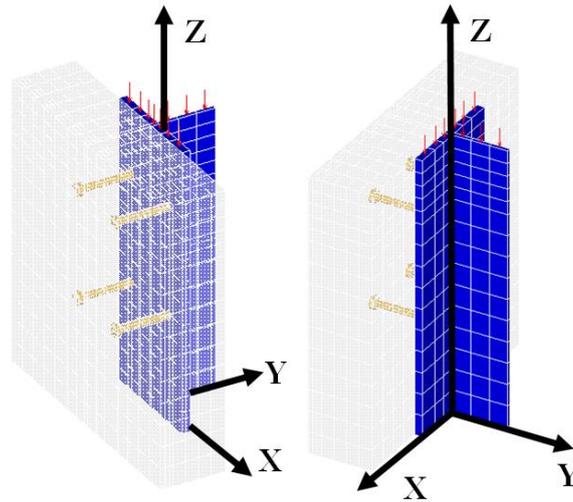


Figura 10. Modelo em elementos finitos utilizado para a calibração com resultados experimentais

No processo de calibração, foi dada ênfase ao deslocamento relativo do perfil em relação à laje de concreto, que é um dos principais resultados obtidos nos ensaios *push-out*, pois permite a caracterização do conector de forma adequada. A Figura 11 dispõe os resultados da calibração do modelo em elementos finitos que utiliza os dados dos ensaios experimentais do conector de referência, o *stud bolt*, obtidos por Cavalcante (2010). Na Figura 11, “Anl Exp 01” e “Anl Exp 02” referem-se a modelos experimentais com conectores do tipo *stud bolt* submetidos a ensaios de *push-out* segundo as prescrições da EN 1994-1-1 (2004), a resistência a compressão (f_{cj}) para o concreto das lajes destes modelos foi de 30,5 MPa.

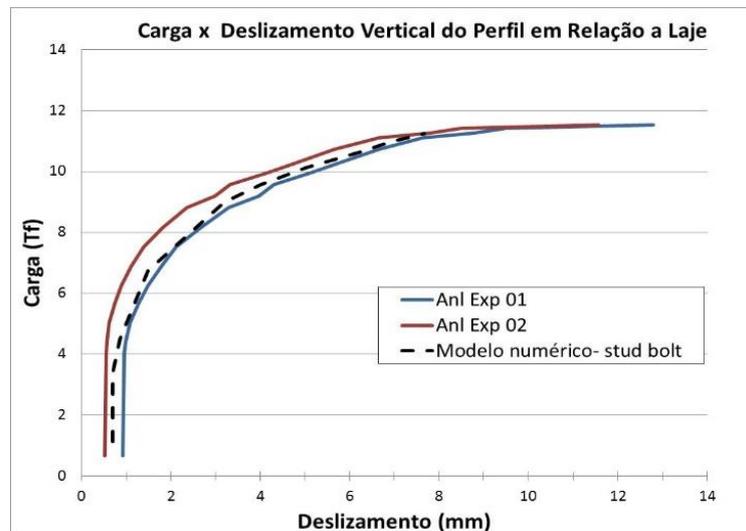


Figura 11. Resultado da calibração para o deslocamento vertical do perfil.

A partir desta calibração, foram extraídos os parâmetros para a análise do conector treliçado quanto ao deslizamento vertical em relação à laje e à distribuição de tensões no conector e no perfil metálico.

O primeiro resultado da calibragem foi a eliminação das capacidades de fissuração e esmagamento do concreto, permitidos pelo elemento finito SOLID65, mas que não conduziam a uma boa conformidade das curvas comparando com os ensaios experimentais. Para simular a resposta do concreto no programa, alternativamente, foi inserido um gráfico de tensão-deformação com base nos resultados experimentais de caracterização realizados por

Cavalcante (2010). O gráfico resultante, inserido na programação do modelo é apresentado na Figura 12.

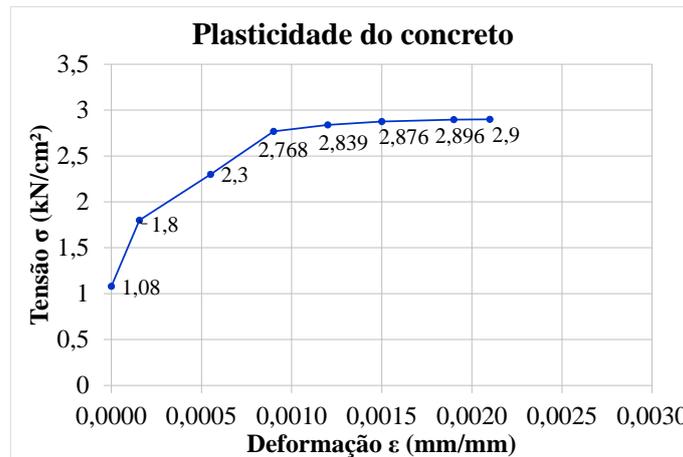


Figura 12. Curva de caracterização do comportamento estrutural do concreto das lajes do ensaio *push-out* conforme considerado no modelo numérico.

Outro resultado da calibragem foi a obtenção do valor do Coeficiente de Rigidez Normal (FKN), considerado como 1. Este valor resultou em uma limitação da penetração da laje de concreto no perfil metálico na porção superior do modelo e do afastamento entre os mesmos na porção inferior de 0,1 mm.

As características não-lineares do aço do perfil metálico também foram ajustadas através do modelo de calibração, resultando no gráfico de tensão por deformação da Figura 13. O aço do perfil foi caracterizado de forma simplificada por não ser este o foco da análise e pelo fato de o comportamento do perfil ter pouca influência sobre o modelo. O comportamento do aço do perfil metálico foi representado através de uma curva que descreve um comportamento elasto-plástico com endurecimento.

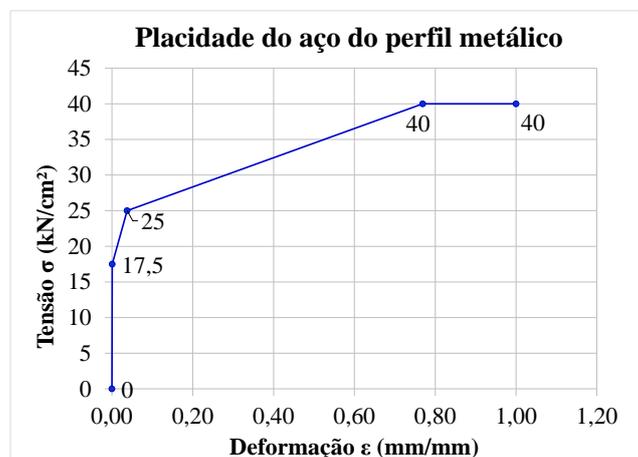


Figura 13. Comportamento do aço dos perfis metálicos considerado nas modelagens numéricas

Nas Figuras 14 e 15 são apresentados os gráficos com o comportamento dos materiais utilizados nas modelagens numéricas dos conectores do tipo *stud bolt* e treliçado. A curva da Figura 14 traz os resultados dos ensaios de caracterização do aço do conector *stud bolt*. A partir desta curva foi configurada a entrada de dados da não-linearidade para o modelo numérico de calibragem.

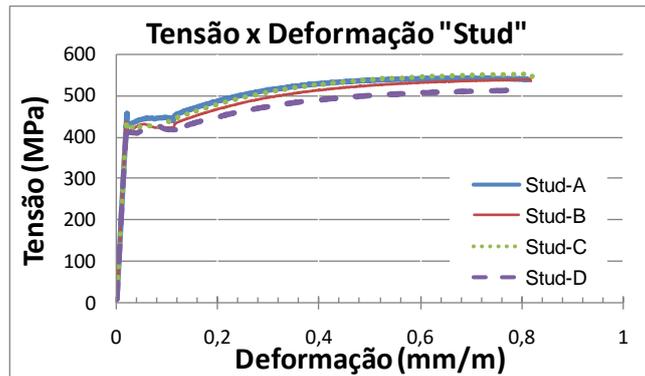


Figura 14. Curva de tensão por deformação obtidas por Cavalcante (2010) para o *stud bolt* em ensaio de tração direta, utilizada como base para o modelo numérico de calibragem.

O aço do conector treliçado é o mesmo aço das armaduras das lajes, vergalhão classe CA50-A, e foi descrito com base na curva tensão x deformação da Figura 15, obtida do ensaio de caracterização de barras por tração direta.

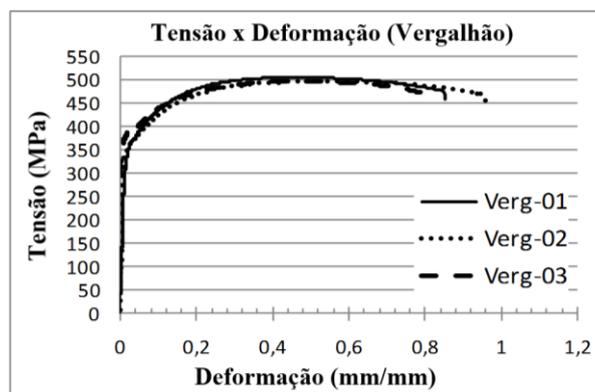


Figura 15. Curva de tensão por deformação obtidas por Cavalcante (2010) para o aço CA50-A em ensaio de tração direta, utilizada como base para o modelo numérico.

3.3 Modelo numérico do conector treliçado

O modelo em elementos finitos para o conector treliçado, ilustrado na Figura 16, foi desenvolvido com base no modelo do *stud bolt*, utilizado na calibração. Mudou-se o mínimo de características possível, visando manter a boa correlação com o modelo de calibragem.

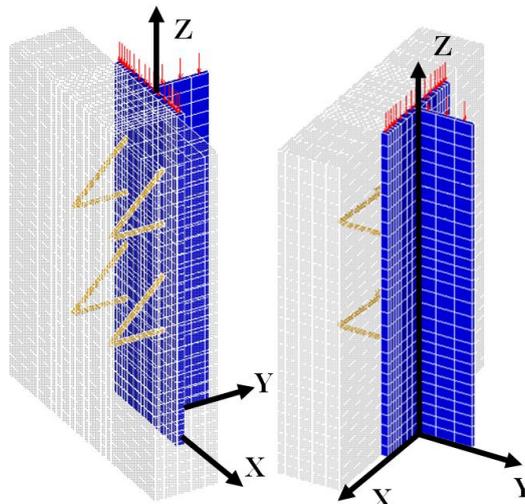


Figura 16. Modelo em elementos finitos do ensaio *push-out* para o conector treliçado e orientação dos eixos de coordenadas.

3.4 Acoplamentos/Vínculos entre elementos, condições de contorno e aplicação de cargas

Os conectores ligam-se ao perfil por meio de interação total, onde a base do conector compartilha o mesmo nó do perfil metálico. A ligação entre os conectores e as lajes é descrita com nós coincidentes, mas não comuns.

As lajes e os perfis metálicos não possuem nós comuns, no intuito de simular o efeito da não aderência entre a superfície de concreto da laje e a mesa do perfil metálico nos ensaios de *push-out*. Entre estes materiais foram posicionados os elementos de contato, para limitar a penetração de um sobre o outro quando o modelo é carregado.

As posições de atuação das cargas sobre o modelo encontram-se ilustradas nas Figuras 10 e 16 pelas setas vermelhas no topo do perfil metálico. As Figuras 17 e 18 trazem as condições de contorno do sistema e as restrições nos acoplamentos entre materiais. Observa-se que os nós do corpo dos conectores e de seus apoios no perfil foram acoplados aos materiais a sua volta com restrições às translações em 'X' e 'Z'. Os nós dos topos dos conectores foram restringidos adicionalmente quanto a translação em 'Y', em seu acoplamento à laje de concreto, para simular a ancoragem provida, no caso do *stud bolt* pela cabeça do pino e no caso do conector treliçado pelo recorte de barra soldado sob a dobra de 45°. Os nós dos elementos do fundo da laje em contato com a base de apoio foram restringidos quanto às translações em 'X' e 'Z'.

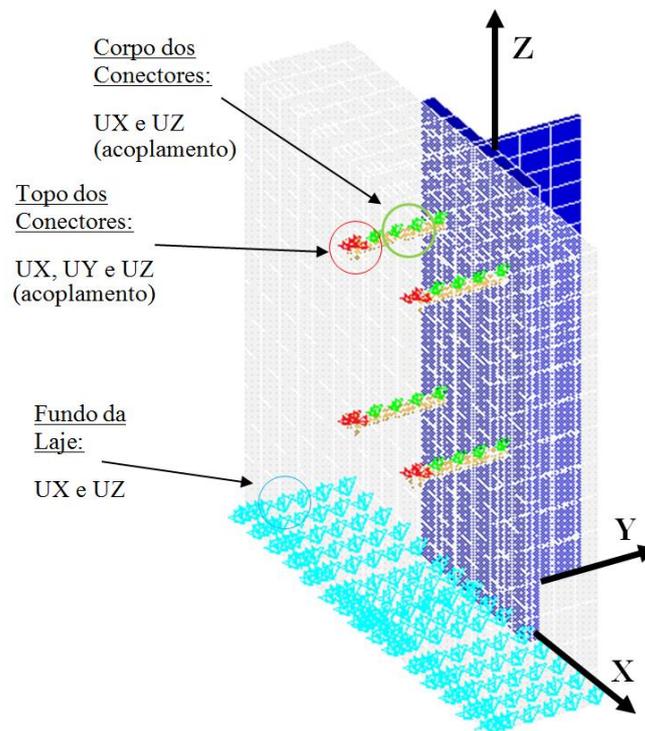


Figura 17. Graus de liberdade restringidos para o modelo em elementos finitos do conector *stud bolt*

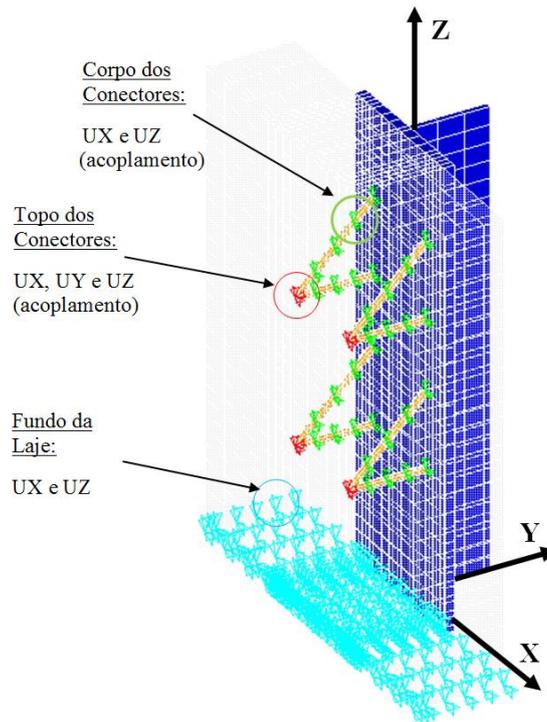


Figura 18. Graus de liberdade restringidos para o modelo em elementos finitos do conector treliçado.

A Tabela 1, a seguir, contém um resumo das condições de contorno e de acoplamento dos modelos em elementos finitos.

Tabela 1. Resumo das condições de contorno e restrições no acoplamento de elementos.

	Região do Nó	Restrição
Acoplamentos	Corpo dos Conectores	UX e UZ
	Topo dos Conectores	UX, UY e UZ
Condições de Contorno	Fundo da Laje	UX e UZ

Para a configuração das cargas aplicadas aos modelos, foi utilizado o modo automático de incremento de cargas do ANSYS, com o incremento mínimo estabelecido em 1% e o máximo em 10% da carga final. A carga final do ensaio foi estabelecida em 50 tf. Esta carga foi calculada a partir da carga resistente esperada para cada conector individualmente, de 12 tf. Foram simulados 4 conectores, referentes à metade do modelo experimental de *push-out*, o que resulta numa resistência final de 48 tf, e o valor foi arbitrado em 50 tf, com uma pequena margem de segurança. Neste sistema automático de incremento de cargas, baseado no método numérico de convergência de Newton-Raphson, o *software* aplica inicialmente o incremento máximo de 10%. Caso não haja convergência, a carga é aplicada novamente com novo incremento somado ao anterior, de metade do daquele, ou seja, de 5%, e assim sucessivamente, até que o passo seja aplicado com convergência bem sucedida do modelo, conforme a Figura 19. A partir deste ponto de convergência o mesmo procedimento é retomado iterativamente, até que se alcance a carga final de 50tf.

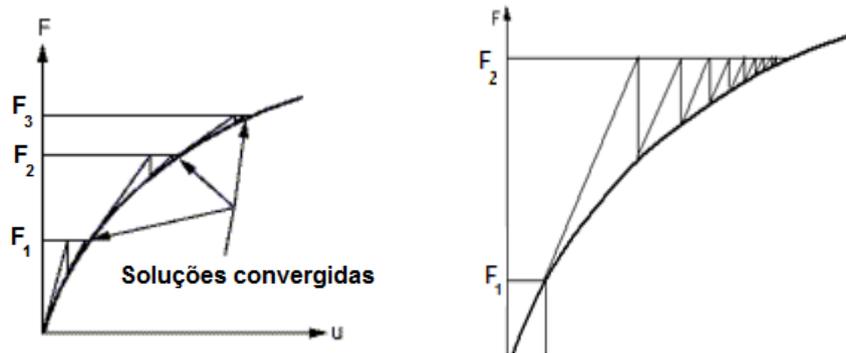


Figura 19. Ilustrações do procedimento e passos de interação para convergência por Newton-Raphson extraídas e adaptadas do manual do software (ANSYS v.11), sendo F1, F2 e F3 os passos de carga com convergência que constarão na curva final.

4 RESULTADOS

A seguir estão dispostos os resultados das análises numéricas para os conectores *stud bolt* e conectores treliçados com diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16,0 mm.

4.1 Deslizamento vertical em relação à laje

O deslizamento vertical permite avaliar a ductilidade do conector, além da sua capacidade de carga. A Figura 20 traz os resultados de deslizamentos verticais para todos os modelos simulados.

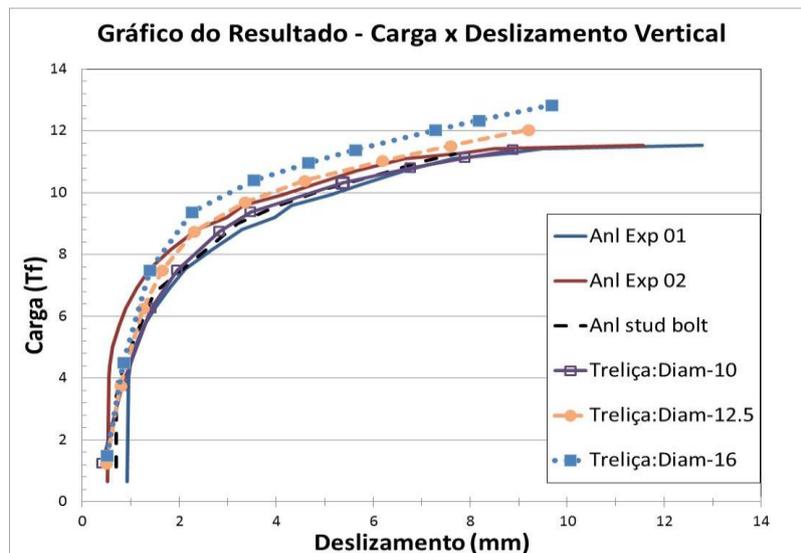


Figura 20. Resultados de ensaios *push-out* experimentais do conector *stud bolt* realizados por Cavalcante (2010) e numéricos para o *stud bolt* e para os conectores treliçados

Analisando estes resultados é possível observar que o conector treliçado apresenta deslizamentos semelhantes ao *stud*. O conector treliçado de diâmetro 10,0 mm apresenta carga resistente final 1,15% inferior ao *stud* com 11,52 tf de carga final por conector. A carga final dos conectores treliçados de 12,5 mm e 16,0 mm foi respectivamente 4,29% e 10,21% superior ao *stud*.

Estabelecendo uma análise mais criteriosa, com base na Figura 21, observa-se que o conector treliçado com diâmetro de 10 mm apresenta deslizamento semelhante ao modelo numérico do conector *stud* de 19 mm de diâmetro. O reforço proporcionado pela barra

inclinada garante um maior desempenho do conector treliçado, permitindo uma maior ligação entre o perfil metálico e a laje de concreto. O conector treliçado permite uma redução considerável da seção transversal do conector.

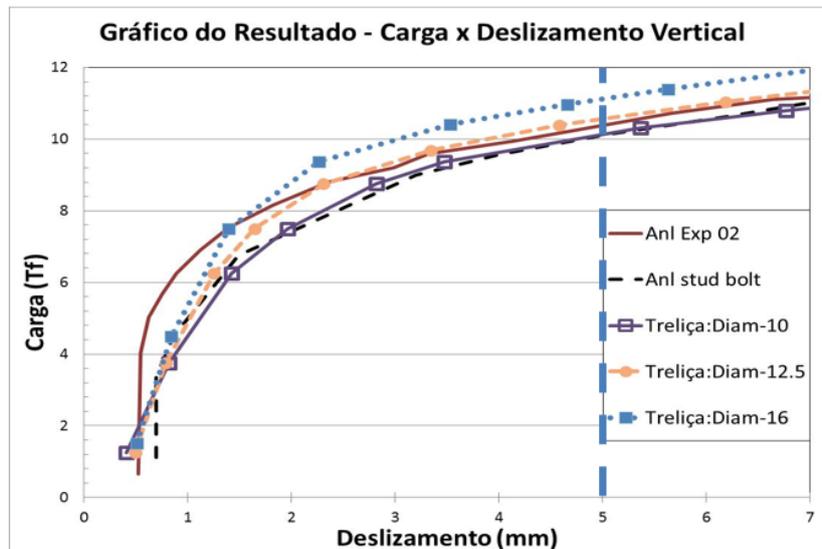


Figura 21. Análise mais detalhada do conector treliçado e stud.

Arbitrando-se como referência um deslizamento de 5,0 mm, observa-se que a carga de ensaio para os conectores treliçados varia aproximadamente de 10,0 tf a 11,2 tf para os conectores de 10,0 e 12,5 mm de diâmetro. Fixando a carga de ensaio em 10 tf, o conector *stud* apresentou deslizamento em relação ao conector treliçado de aproximadamente 9 % e 29 % superior aos de diâmetro de 12,5 mm e 16 mm, como está apresentado na Figura 21 e na Tabela 2.

Tabela 2. Deslizamentos verticais para os modelos com conectores *stud* e treliçados considerando uma carga de 10 tf.

Análise comparativa para uma carga de 10 tf por conector		
Conector	Carga (tf)	Deslizamento (mm)
<i>Stud</i> - Numérico	10,13	5,04
Treliçado: Diam-10 mm	10,31	5,37
Treliçado: Diam-12,5 mm	10,39	4,58
Treliçado: Diam-16 mm	10,41	3,54

A distribuição das tensões foi verificada tanto no perfil quanto nos conectores. Os conectores foram avaliados pela tensão equivalente de Von Mises. A distribuição das tensões foi averiguada para duas situações de carregamento. Na primeira situação para uma carga de aproximadamente 60% da carga final de ensaio (7,5 tf por conector) e em um segundo instante para a carga máxima suportada pelo conector treliçado de 10,0 mm (10,9 tf por conector).

4.2 Distribuição das tensões no perfil

No perfil metálico foi dada ênfase à mesa, onde foi verificada a distribuição de tensões na direção do eixo 'Z'. Através da Figura 22, observa-se que os dois conectores superiores dos modelos são os mais solicitados. A distribuição de tensões no perfil segue valores muito semelhantes para os conectores treliçados.

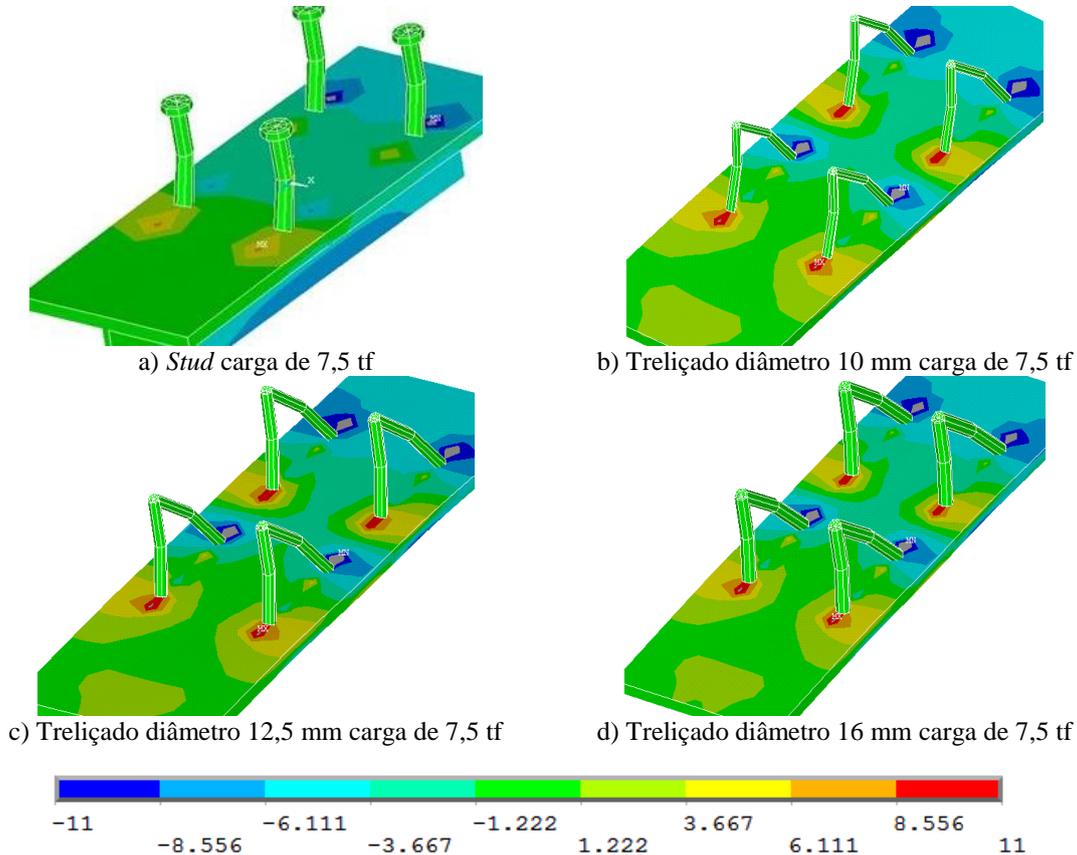


Figura 22. Distribuição de tensões (kN/cm²) no sentido de 'Uz' para 7,5 tf por conector, com a compressão arbitrada com sinal negativo e gravidade $g = 9,80\text{m/s}^2$.

O conector *stud* apresentou menores concentrações de tensões no perfil, contudo apresentou maior deslizamento do perfil para este nível de carregamento, em comparação aos modelos com conectores treliçados. Quanto maiores os deslizamentos do perfil, maiores serão as deformações dos conectores.

No segundo nível de carregamento, apresentado na Figura 23, os conectores treliçados aplicam maior nível de tensão no perfil. Os conectores com maiores diâmetros garantem maior inércia na ligação do perfil com a laje e maior transferência de esforços para a mesa do perfil. O conector treliçado de 10,0 mm apresentou pouco acréscimo de tensões na mesa do perfil, porém o deslizamento do perfil foi elevado em comparação com os demais conectores. Elevados níveis de deslizamento do perfil, implicam em maiores deformações e empenamentos do conector, que ocasionam uma redução do momento fletor atuante na base do conector e na mesa do perfil. Como resultado o conector absorve uma maior parcela do carregamento.

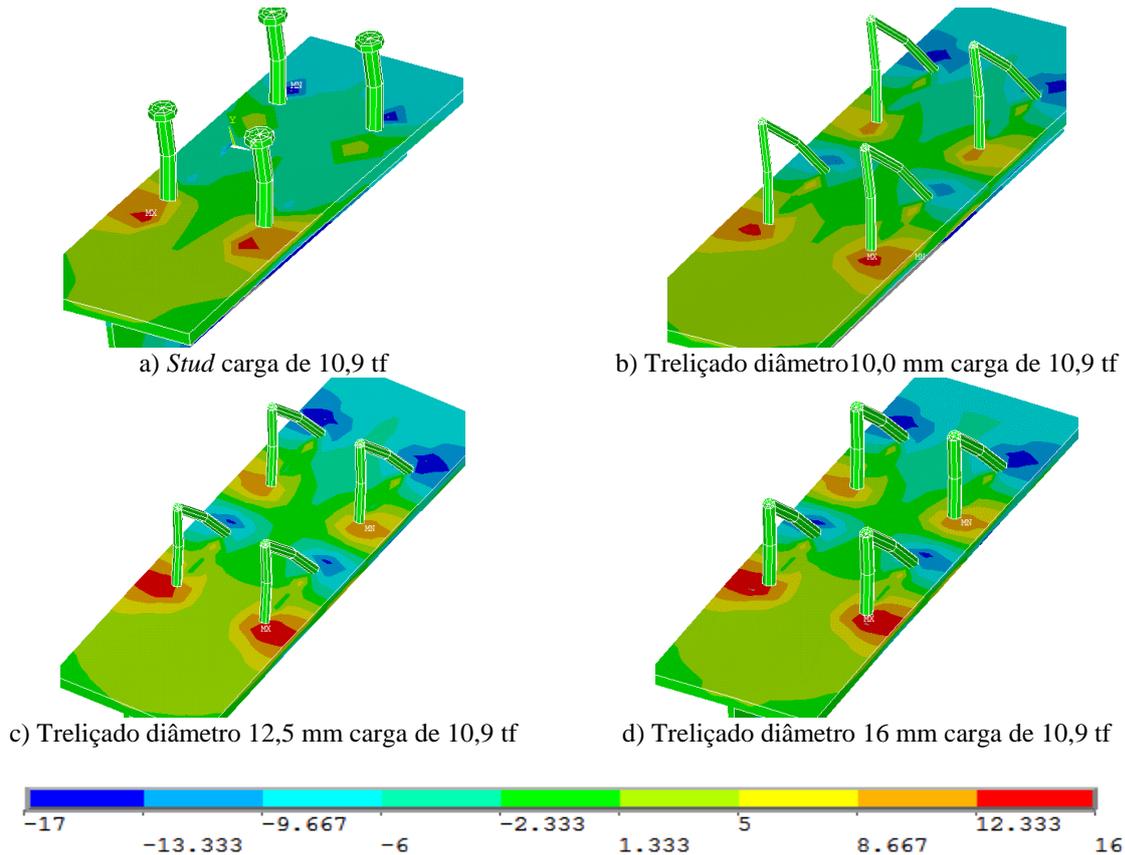


Figura 23. Distribuição de tensões (kN/cm²) no sentido de 'Uz' para 10,9 tf por conector, com a compressão arbitrada com sinal negativo e gravidade $g = 9,80\text{m/s}^2$.

4.3 Distribuição das tensões nos conectores

Na análise dos conectores em ambas as situações de carregamento foi observado que quanto menor o diâmetro do conector, maior é a concentração de tensões no conector, conforme as Figuras 24 e 25. Verifica-se também nestas figuras que quanto maior é o diâmetro do conector treliçado, maior é o nível de carregamento aplicado na mesa do perfil. Uma maior inércia na ligação perfil laje implica em um maior momento fletor atuante na mesa do perfil. Analisando a distribuição de tensões na mesa do perfil para esta situação, observa-se que no conector treliçado os esforços se distribuem em uma maior área do que o conector *stud*, visto que o conector se apoia em dois pontos distintos na mesa do perfil.

A configuração de deformação final dos conectores é obtida no modelo numérico devido ao deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto. Analisando-se o contato dos conectores de cisalhamento com o concreto das lajes, observa-se que com o progressivo aumento do carregamento ocorre o desprendimento da parte posterior dos conectores, e o contato do concreto da laje com os conectores na parte anterior ocasiona a conformação final tanto da parte tracionada como da parte comprimida dos conectores. A flambagem da parte comprimida dos conectores é restringida pela contenção lateral proporcionada pelo concreto das lajes nas hastes dos conectores, predominando os efeitos de flexão devido a força atuante da laje nos conectores e as restrições observadas na parte inferior soldada e na parte superior dos conectores devido à ancoragem mecânica, assim como pode ser observado no modelo idealizado por Oehlers e Park (1998) e no trabalho de Salari (2001).

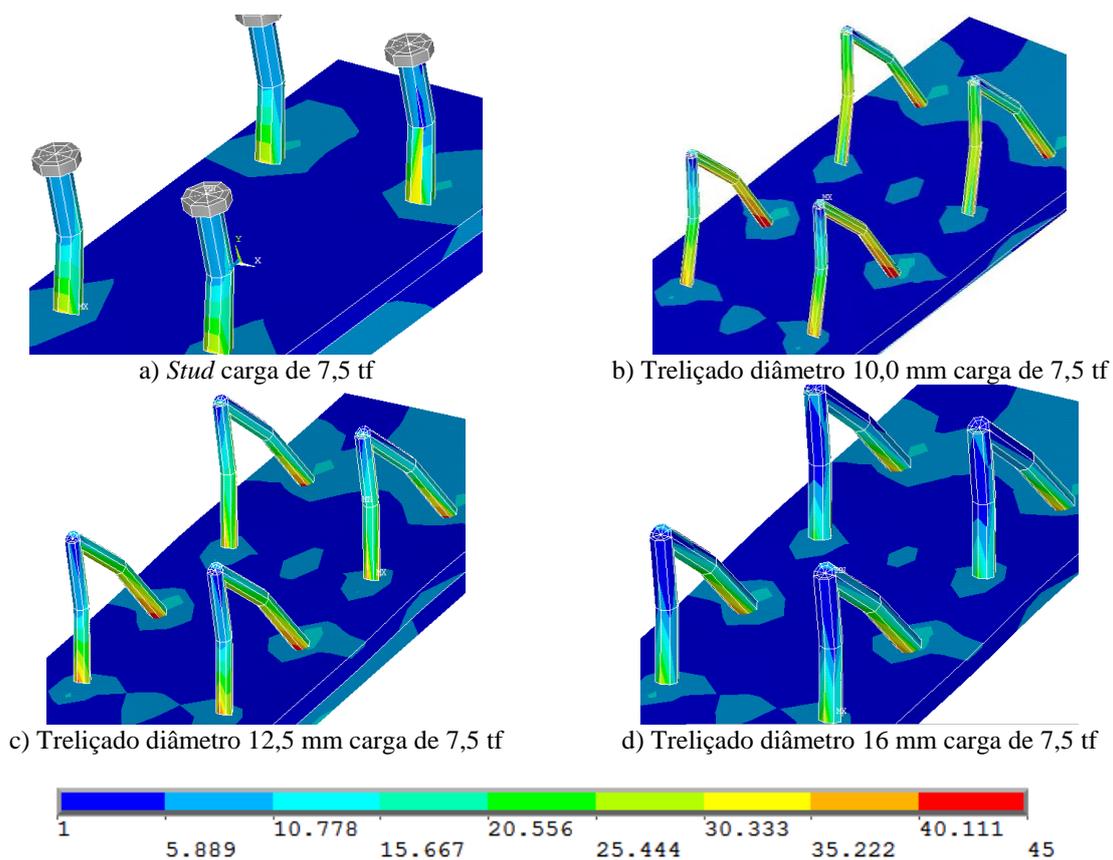


Figura 24. Tensão equivalente de Von Mises (kN/cm^2) para uma carga 7,5 tf por conector e gravidade $g = 9,80\text{m/s}^2$.

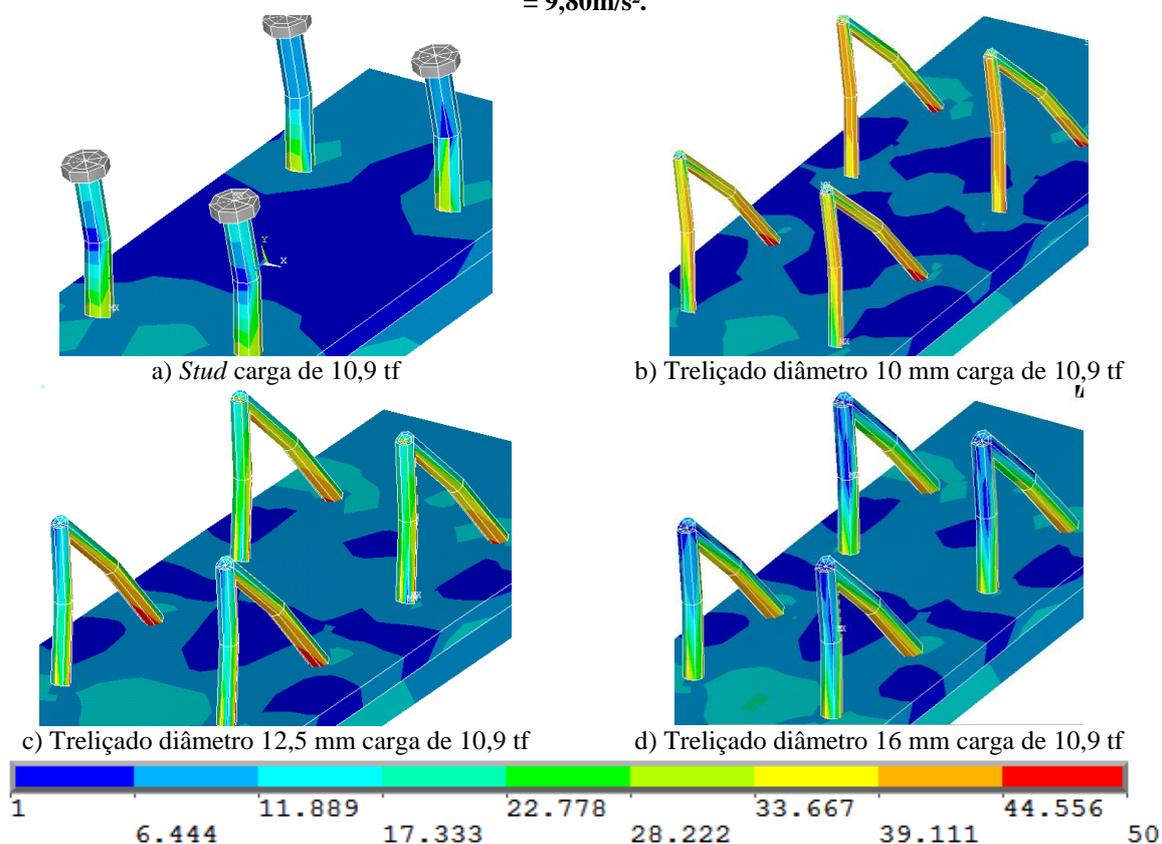


Figura 25. Tensão equivalente de Von Mises (kN/cm^2) para uma carga 10,9 tf por conector e gravidade $g = 9,80\text{m/s}^2$.

Os resultados positivos da análise numérica em elementos finitos, especialmente do ponto de vista do deslizamento vertical relativo entre perfil e laje, que demonstrou um comportamento bastante próximo ao do conector *stud bolt*, creditou o conector treliçado para ser avaliado experimentalmente.

5 CONCLUSÕES

O trabalho realizado para o estudo deste novo tipo de conector, denominado conector treliçado, permitiu concluir que este conector, de fácil produção e aquisição, apresenta considerável resistência mecânica, sendo de larga aplicabilidade em projetos de engenharia civil, representando uma solução construtiva e estrutural para as mais diversas aplicações no uso de estruturas mistas. A seguir são apresentadas as conclusões alcançadas através deste estudo.

5.1 Conclusões do estudo numérico

O estudo numérico foi realizado através do método dos elementos finitos com a finalidade de obter parâmetros e resultados que justificassem um estudo experimental do conector treliçado, e que fundamentassem a escolha do diâmetro a ser ensaiado. Este estudo permitiu extrair, no entanto, diversas outras informações sobre o possível comportamento deste conector:

- O comportamento do conector treliçado quanto ao deslizamento vertical se mostrou bastante análogo e próximo ao do *stud bolt*.
- O conector treliçado de 10 mm apresentou carga resistente final 1.15% inferior a carga resistente do *stud*. Os conectores treliçados de 12,5 mm e 16 mm apresentaram cargas finais 4,29% e 10,21% maiores, respectivamente, que a do *stud bolt* de 19 mm de diâmetro.
- O deslizamento vertical dos conectores treliçados em relação ao *stud bolt* para uma carga de 10 tf foi 6% maior para o diâmetro de 10 mm; para os diâmetros de 12,5 mm e 16 mm, foram 9% e 29% menores, respectivamente.
- Os conectores superiores, no modelo *push-out*, são os mais solicitados.
- O conector *stud bolt* apresentou menor concentração de tensões na mesa do perfil metálico, mas com maior deslizamento vertical em relação aos treliçados.
- Quanto maior o diâmetro do conector treliçado, maior a transferência de esforços para a mesa pela maior rigidez da ligação, menor o esforço absorvido pelo conector e menores os deslizamentos verticais da laje. Assim, para diâmetros menores, há maior concentração de esforços no conector e menor concentração na mesa do perfil metálico.
- Os conectores treliçados funcionam com a haste diagonal comprimindo a mesa e a haste vertical tracionando-a.

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 e execução de estruturas de aço e de mistas aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, P. C., 2000. *Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com vigas de concreto armado*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP/São Carlos.
- 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.
- 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.
- Kotinda, T. I., 2006. *Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP/São Carlos.
- Oehlers, Deric J. Park, Sung M., 1998. Shear connectors composite Beams with longitudinally crack slabs, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, Paper No. 03.
- Salari, M. R. Sapacone, E., 2001. Analysis of steel-concrete composite frames with Bond-slip, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, Paper No. 11.
- Tristão, Gustavo 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.