

Tema: Estruturas de Aço e Mistas de Aço e Concreto

Conectores de Cisalhamento Constituídos por Parafuso e Rebite Tubular com Rosca Interna em Pilares Mistos de Aço e Concreto com Perfis Formados a Frio

Hermano de Sousa Cardoso¹
Francisco Carlos Rodrigues²
Ricardo Hallal Fakury²
Rodrigo Barreto Caldas³
Ivan Candelma⁴

Resumo

Neste artigo é apresentado um estudo teórico-experimental de pilares curtos preenchidos com concreto, utilizando conectores constituídos por parafusos com cabeça sextavada e rebite tubular com rosca interna. A seção dos perfis tubulares é constituída por dois perfis U enrijecidos (Ue) formados a frio, cada um com dimensões nominais de 175x65x25x3,75 mm. Foram analisados experimentalmente 6 modelos: 3 apresentando 4 conectores de cisalhamento e outros 3 apresentando 8 conectores de cisalhamento. Cada modelo foi submetido a um carregamento centrado sobre o núcleo de concreto, tendo sido adotada uma folga de 50 mm entre a extremidade inferior do tubo de aço e o núcleo de concreto para permitir um deslizamento relativo entre os dois componentes. Os ensaios experimentais seguem os procedimentos de cisalhamento direto (*push-out*) preconizados pela norma europeia EN 1994-1-1:2004. O estudo teórico foi realizado através de simulações numéricas utilizando o software comercial de elementos finitos, ABAQUS v.6.10. A modelagem numérica apresentou uma boa eficiência para se estimar a carga última dos modelos apresentando erros menores que 5%. Os resultados experimentais e numéricos demonstraram que os conectores apresentaram um comportamento flexível e dúctil.

Palavras-chave: *Perfis formados a frio, rebites com rosca interna, parafusos com cabeça sextavada, pilares mistos, ensaios de cisalhamento direto, simulação numérica.*

¹ Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia de Estruturas, Estudante de Doutorado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia, UFMG.

² Doutor em Engenharia Civil. Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG

³ Doutor em Engenharia Civil. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG

⁴ Aluno de Graduação, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università di Bologna.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas de aço e concreto se tornaram nos últimos anos cada vez mais presentes na construção civil. Essas soluções têm sido amplamente empregadas em pontes, shopping centers, edifícios comerciais e também nas reformas dos estádios utilizados na Copa do Mundo do Brasil em 2014. Com essa crescente demanda, há uma grande necessidade pela busca de novas tecnologias no ramo de estruturas mistas.

Na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EEUFMG), está sendo desenvolvido e aperfeiçoado um novo modelo de conector de cisalhamento que tem como principal função garantir o comportamento misto entre os materiais, os conectores de cisalhamento constituídos por parafuso e rebite tubular com rosca interna. Na Figura 1 pode-se observar o procedimento de instalação desses conectores em sistemas de vigas mistas constituídas de perfis formados a frio (PFF) [1]. Esse conector é instalado com o auxílio de uma ferramenta a ar comprimido. Para este tipo de tecnologia permite-se o aperto dos parafusos apenas pela parte externa do perfil de aço, otimizando o processo de fixação do conector com a parede do perfil de aço.



a) Pistola de aplicação do rebite



b) Detalhe do rebite



c) Instalação dos rebites nos furos da viga



d) Detalhe do rebite já instalado

Figura 1 – Procedimento de instalação de conectores de cisalhamento constituídos por parafuso e rebite tubular com rosca interna em PFF [1].

Essa tecnologia quando combinada com sistemas mistos com PFF, apresenta diversas vantagens: montagem por um único acesso em perfis caixa; não requer operador especializado; superfícies acabadas, sem operações secundárias; fixam materiais diferentes, inclusive várias chapas; possibilidade de ligação parafusada em chapa fina; baixo investimento; instalação simples e rápida da ferramenta; pode ser aplicado em linha de montagem;

posicionamento preciso; alta resistência na rosca; baixo consumo de energia; comportamento mais rígido do conector parafuso devido à rebiteagem.

Por ser uma nova tecnologia, ainda não há uma formulação específica para o dimensionamento desses conectores como meios de introdução de carga nos pilares mistos de aço e concreto. No entanto, diversos estudos foram realizados na EEUFMG para estudar a sua concepção estrutural, podendo citar: Bremer [1], Oliveira [2], Oliveira [3] e Quiñonez [4]. Bremer [1] e Oliveira [2] realizaram estudos teórico-experimentais desses conectores em sistemas de laje mista com fôrma de aço incorporada (deck metálico, ou popularmente, *steel deck*), sendo estes modelos em escala natural. Nos estudos de Oliveira [2] foram ensaiados quatro modelos, sendo dois modelos com duas camadas de Teflon entre o perfil metálico e a laje de concreto, e outros dois modelos sem as camadas de Teflon entre os dois perfis, para se analisar a influência do atrito entre o concreto e o aço do perfil. Quiñones [4] estudou o comportamento e a resistência de ligações parafusadas de ligações mistas viga-pilar constituídos por PFF. Oliveira [3] e Bremer [1] realizaram ensaios de cisalhamento direto padrão (*"push-out"*), com o objetivo de analisar o comportamento e a resistência dos conectores de cisalhamento com rebite com rosca interna. Nos ensaios de cisalhamento direto realizados por Bremer [1] foram utilizadas formas de aço incorporadas nas lajes de concreto, enquanto que nos modelos de Oliveira [3] foram analisadas lajes de concreto com e sem armaduras. Os autores verificaram que estes conectores apresentavam um comportamento flexível e dúctil.

Este artigo apresenta um estudo teórico-experimental que tem como objetivo estudar o comportamento de conectores de cisalhamento constituídos por parafuso e rebite tubular com rosca interna em pilares mistos de aço e concreto com perfis formados a frio (PFF). Os modelos experimentais propostos seguem os procedimentos de ensaio de cisalhamento direto padrão, preconizados pela norma europeia EN 1994-1-1:2004 [5]. Contudo, nestes ensaios foram realizadas algumas adaptações que visam obter uma melhor avaliação do uso desses conectores em pilares mistos preenchidos com concreto. O estudo teórico foi realizado através de simulações numéricas dos modelos experimentais, utilizado o software comercial de elementos finitos, ABAQUS. Nessas simulações são consideradas a não linearidade geométrica e a não linearidade física, e também os efeitos de dano no concreto. Com esses modelos numéricos serão realizados estudos paramétricos com o objetivo de propor uma solução analítica para o dimensionamento do conector de cisalhamento como componente de transferência de carga entre vigas e pilares mistos de aço e concreto com PFF.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram ensaiadas e analisadas duas séries de modelos de pilares com perfis formados a frio preenchidos com concreto, utilizando conectores de cisalhamento constituídos por parafuso e rebite tubular com rosca interna. Cada série analisada apresentava três modelos; essas séries eram diferenciadas somente pelo número de conectores de cisalhamento. Os modelos da série B4 apresentavam 4 conectores, enquanto que os modelos da série B8 apresentavam 8 conectores (observar Tabela 1). Cada conjunto de quatro conectores era distribuído em um nível diferente de altura, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3. Os ensaios dos modelos foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da EEUFMG.

Tabela 1 – Quadro resumo dos modelos analisados.

Série de Modelos	Modelo	Número de conectores	Nível dos conectores
Série B4	Modelo B4-1	4 conectores	285 mm / -
	Modelo B4-2	4 conectores	285 mm / -
	Modelo B4-3	4 conectores	285 mm / -
Série B8	Modelo B8-1	8 conectores	340 mm /405 mm
	Modelo B8-2	8 conectores	340 mm /405 mm
	Modelo B8-3	8 conectores	340 mm /405 mm

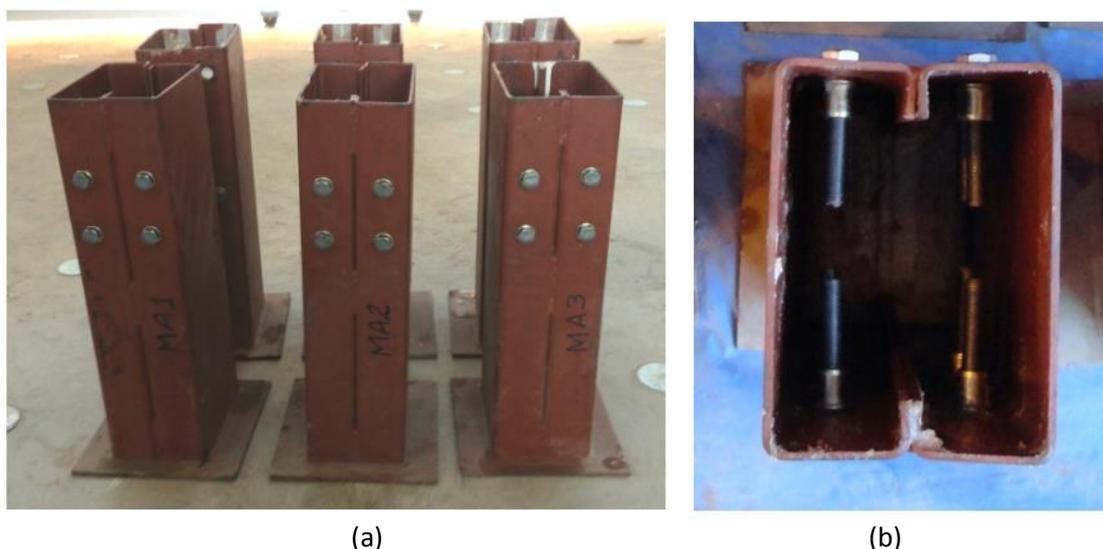


Figura 2 – Modelos antes de serem concretados: (a) vista externa dos modelos, (b) vista interna dos modelos.

Os modelos analisados neste estudo foram fabricados a partir da conformação a frio de chapa fina de aço fabricada pela USIMINAS, especificação USI SAC 300. Após os ensaios de caracterização deste material, obteve-se as seguintes propriedades mecânicas: $f_y = 373,6$ MPa (resistência ao escoamento do aço) e $f_u = 486,2$ MPa (resistência à ruptura do aço na tração). Os perfis de chapa fina, por sua vez, foram fabricados por meio da soldagem de dois perfis U enrijecidos (Ue), utilizando solda de filete intermitente (observar Figura 2) . Estes perfis Ue apresentavam dimensões nominais de 175x65x25x3,75 mm e um comprimento longitudinal de 505 mm (altura dos pilares). A chapa inferior soldada junto à base do pilar apresentava dimensões de 220x220mm e espessura de 6,30 mm.

Para a concretagem dos pilares foi utilizado concreto convencional com f_{ck} de 25 MPa e *slump* de 18 cm. Nos ensaios de caracterização da resistência do concreto foram obtidas as seguintes propriedades mecânicas: $f_{cm} = 36,33$ MPa (resistência média à compressão), $f_{ctm} = 3,47$ MPa (resistência média à tração), $E_{cm} = 29,36$ GPa (módulo de elasticidade médio do concreto à compressão).

Os rebites tubulares com rosca interna eram do tipo RIVKLE M12x1,5 PO300, fabricados pela Bollhoff, com aço SAE1040 temperado. Estes rebites antes de sofrerem o procedimento de fixação, apresentam o comprimento longitudinal total de 30 mm. Contudo após este procedimento, há um encurtamento do corpo rebite. Dessa forma, antes que os pilares fossem concretados, foram realizadas medidas para obter o comprimento longitudinal destes rebites após a sua fixação, apresentando um comprimento médio de 21 mm descontando a espessura do perfil de aço, como pode ser observado na vista A-A representada na Figura 3. Os parafusos utilizados eram sextavados com rosca total, apresentando diâmetros de 12 mm e comprimento do corpo de 70 mm. Estes parafusos eram do tipo DIN960 Classe 5.8.

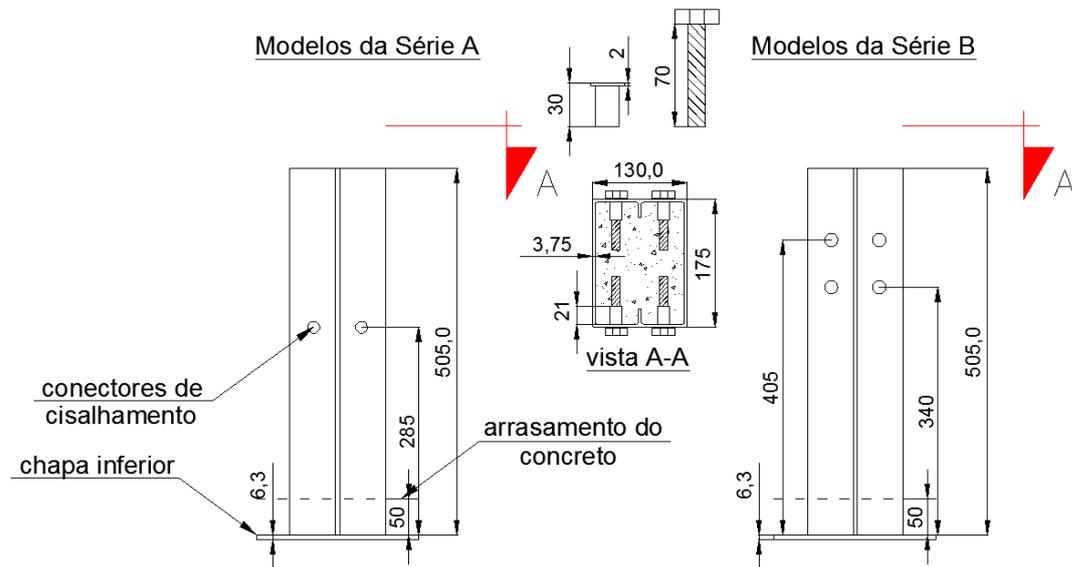


Figura 3 - Desenho representativo dos modelos experimentais, dimensões em mm.

Observando a Figura 3, percebe-se que os pilares ensaiados não estavam totalmente preenchidos, apresentando uma cota de arrasamento de 50 mm entre a extremidade inferior do núcleo de concreto com a base do pilar. Essa folga permite que o núcleo de concreto e o perfil de aço deslizem entre si com uma maior liberdade, sofrendo apenas influência da rigidez e da capacidade resistente dos conectores de cisalhamento. Para evitar que o pilar fosse totalmente preenchido durante a concretagem, foi colocada na base do pilar uma camada de isopor com 50 mm espessura (material de resistência mecânica desprezável). A superfície interna do tubo em perfil caixa foi tratada com aplicação de pintura e cera desmoldante, permitindo uma melhor caracterização da transferência de carga gerada pelo conector de cisalhamento, minimizando a transferência de carga por atrito. Nos estudos realizados por Cardoso [6] verificou-se que quando a cera desmoldante é aplicada em pilares tubulares laminados retangulares preenchidos com concreto, há uma eficiência de redução das tensões de aderência na interface entre o tubo de aço e o núcleo de concreto em mais de 85%.

O carregamento foi aplicado de forma centrada na parte superior do pilar misto, sobre o núcleo de concreto (observar Figura 4). Para medir os deslizamentos relativos entre o perfil de aço e o núcleo de concreto, foram utilizados dois transdutores de deslocamentos (DTs), posicionados na posição vertical. Ao observar Figura 4, percebe-se que estes DTs eram fixados

lateralmente sobre os modelos com o auxílio de uma base magnética. A disposição apresentada na Figura 4b foi utilizada nos últimos modelos ensaiados.

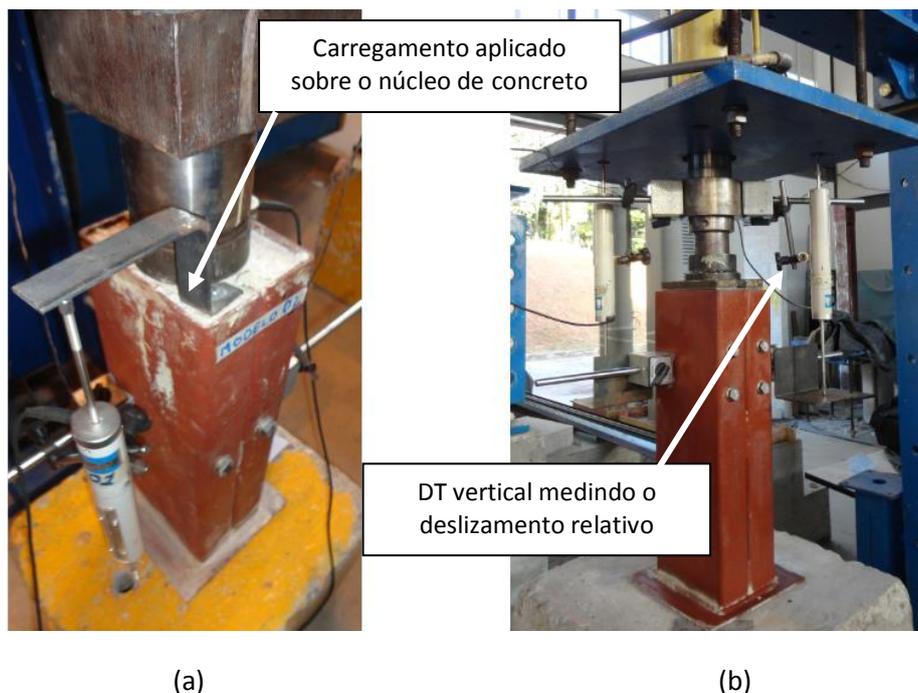


Figura 4 – Montagem e instrumentação dos ensaios de cisalhamento direto realizados nos modelos

(a) B4-1, B4-2, B4-3 e B8-1, (b) B8-2 e B8-3.

A execução dos ensaios foi realizada em duas etapas distintas. Na primeira etapa de cada um dos ensaios foram realizados 25 ciclos de carga e descarga, com o carregamento variando entre 5% e 40% da carga última esperada. A carga última estimada foi baseada nos ensaios de cisalhamento direto realizados por Bremer [1]. Conforme os resultados obtidos pela autora, cada conector de cisalhamento resiste aproximadamente a um carregamento de 40 kN. Na segunda etapa, por sua vez, os modelos são submetidos a um carregamento estático e progressivo até o colapso estrutural. Estes procedimentos descritos seguem as especificações dos ensaios de cisalhamento direto padrão, preconizados pela norma EN 1992-1-1:2004 [5].

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O estudo numérico foi realizado por meio de simulações dos modelos experimentais analisados utilizando o software comercial de elementos finitos, ABAQUS versão 6.10. Neste estudo foi modelado apenas um quarto dos modelos, devido à sua simetria, como pode ser observado na Figura 5. Foram analisados dois modelos numéricos, apresentando as dimensões reais médias dos modelos experimentais das séries B4 (4 conectores) e B8 (8 conectores), sendo estes denominados como modelos B4_n e B8_n, respectivamente. A chapa inferior soldada junto à base do pilar não foi considerada na modelagem, levando em conta que a extremidade inferior do perfil de aço está apoiada. Assim como nos modelos experimentais, o carregamento foi aplicado diretamente na extremidade superior do núcleo de concreto do pilar misto.

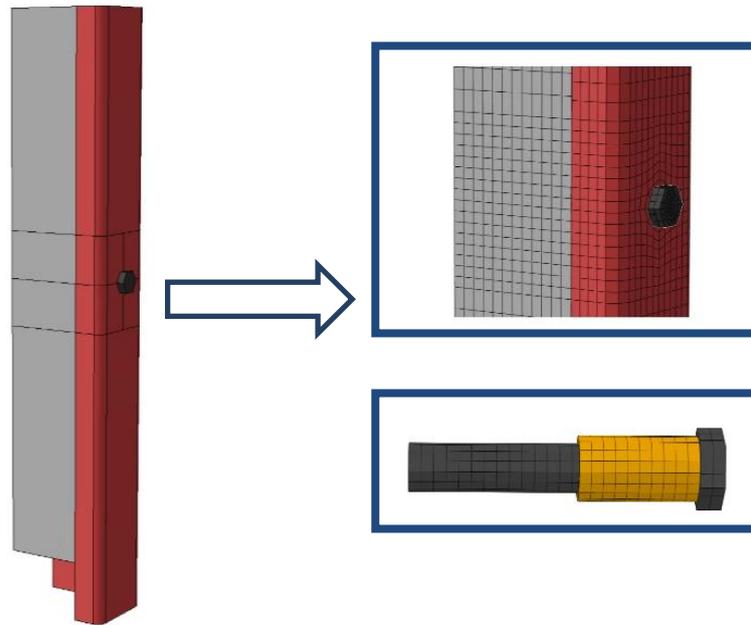


Figura 5 – Simulação numérica dos modelos experimentais realizada pelo software comercial ABAQUS, versão 6.10.

Os componentes estruturais (perfil de aço, núcleo de concreto, parafusos e rebites com rosca interna) foram modelados com elementos do tipo C3D8 (linear, hexaédrico e sólido). Este tipo de elemento possui oito nós e três graus de liberdade por nó (translação segundo os eixos principais x, y e z), como pode ser observado na Figura 6.

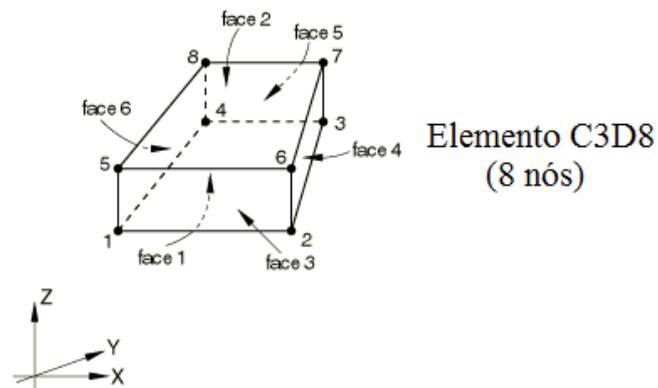


Figura 6 - Elemento C3D8 [7].

Na interface entre o rebite e o corpo do parafuso, foi adotado um alto coeficiente de atrito estático, igual a 1, simulando o efeito de rosqueamento entre os componentes. Para a interação entre o rebite e a parede do tubo de aço foi considerado um engastamento perfeito entre estes componentes, simulando o procedimento de fixação dos rebites. Nas demais interações o coeficiente de atrito estático foi considerado nulo. Para a modelagem foi utilizada malha que continha aproximadamente 19 mil elementos para o modelo B4n e 22 mil elementos para o modelo B8n. Foram adotadas as seguintes restrições de movimento nos modelos: deslocamento lateral na direção y e no plano de simetria x-z, deslocamento lateral na

direção x no plano de simetria y-z, deslocamento vertical na direção do eixo z na extremidade inferior do perfil de aço (base do pilar) e os deslocamentos laterais na direção dos eixos x e y no topo do pilar. As respectivas direções dos eixos e as restrições são representadas na Figura 7.

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na modelagem tem os mesmos valores apresentados no programa experimental, obtidos através de ensaios de caracterização de cada material. Contudo, utilizou-se o valor do módulo de elasticidade do concreto (E_{cm}) obtido da relação tensão *versus* deformação apresentada pela norma EN 1992-1-1:2004, sendo este valor em função do f_{cm} obtido nos ensaios de caracterização do concreto, igual a 36,33 MPa. Dessa forma, foi adotado $E_{cm} = 30197$ MPa (valor próximo ao obtido nos ensaios de caracterização do concreto). Para o rebite e os parafusos utilizaram-se as suas propriedades mecânicas nominais. Todas as propriedades mecânicas dos materiais (aço estrutural, concreto, parafusos e rebite) adotadas na modelagem são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

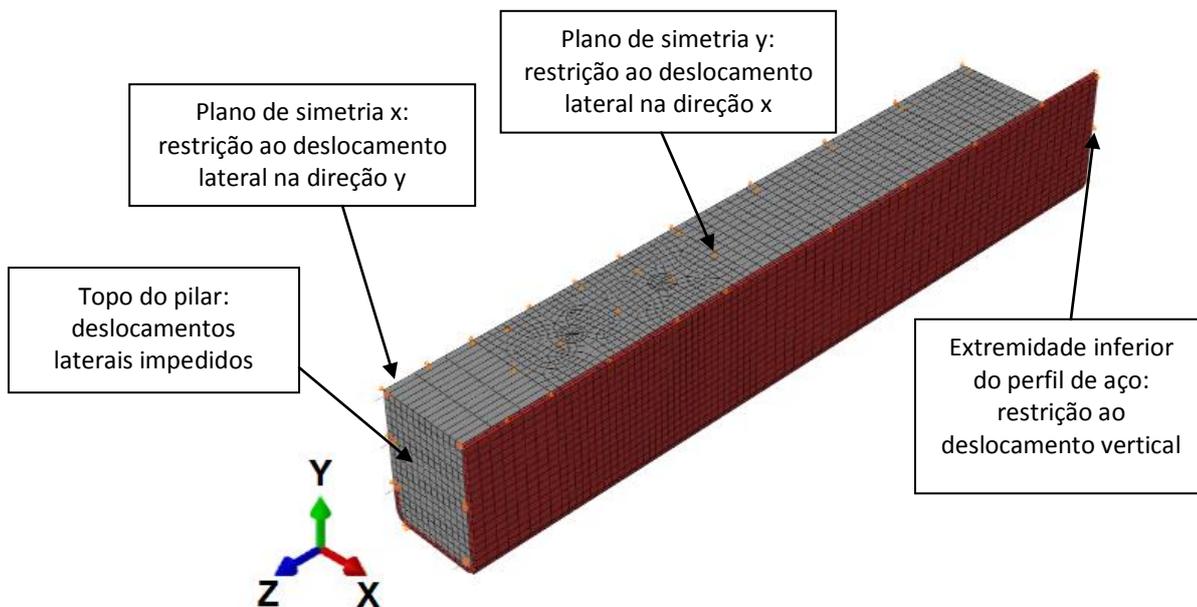


Figura 7 – Representação do modelo numérico B8n indicando as condições de contorno.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais metálicos utilizados na modelagem numérica.

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	Resistência média ao escoamento (MPa)	Resistência média à ruptura (MPa)
Aço estrutural	205000	0,3	373,6	486,2
Parafusos	200000	0,3	400,0	500,0
Rebite	200000	0,3	490,0	590,0

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do núcleo de concreto utilizado na modelagem numérica.

Propriedades mecânicas do núcleo de concreto	
Módulo de elasticidade (MPa)	30197
Coefficiente de Poisson (ν)	0,2
Resistência média à tração (MPa)	3,47
Resistência média à compressão (MPa)	36,3

O método de convergência utilizado nas simulações foi o de Riks modificado, sendo este um método de comprimento de arco. Este método realiza incrementos de carga e deslocamentos, apresentando uma maior facilidade de convergência nos resultados, caso a estrutura torne-se instável em um determinado incremento. Para levar em conta o efeito do confinamento no núcleo de concreto e de dano, foi utilizado o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity*.

4 CLASSIFICAÇÃO DOS CONECTORES DE CISLHAMENTO

Os conectores de cisalhamento podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. Essa classificação está intrinsecamente relacionada com a resposta do conector à ação do fluxo de cisalhamento longitudinal que surge da ação mista entre o perfil de aço e o núcleo de concreto. Essa resposta pode ser demonstrada por meio da relação entre a força do conector e o deslocamento relativo entre o perfil de aço e o núcleo de concreto, como ilustra a Figura 8, sendo δ_u o deslizamento máximo, medido ao nível da resistência característica P_{Rk} , na parte descendente da curva. P_{Rk} deve ser tomada como a carga última mínima de cada conector reduzida em 10%. Conforme a norma europeia EN 1994-1-1:2004, um conector pode ser tomado como dúctil se a capacidade característica de deslizamento (δ_{uk}) for pelo menos de 6 mm, δ_{uk} é tomado como o valor mínimo de δ_u obtido num ensaio, reduzido em 10% .

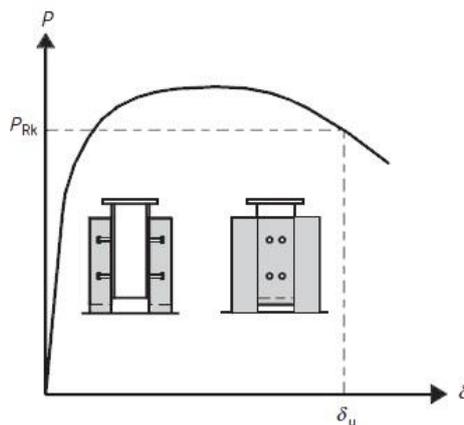


Figura 8 - Determinação da capacidade de deslizamento δ_u [5].

Segundo Almeida [8] não se encontra na literatura vigente uma definição precisa dos limites de rigidez que caracterizam um conector como rígido ou flexível. Contudo, o autor define em seu estudo que os conectores que apresentam uma rigidez secante menor ou igual a 200 kN/mm são classificados como flexíveis, e os restantes como rígidos. A rigidez secante é definida conforme item A.3(3) do EN 1994-1-1:2004, igual a $k_{sc} = 0,7 P_{Rk}/s$, onde s é o deslocamento relativo que ocorre para a força de $0,7 P_{Rk}$.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 9 e 10 são representados os diagramas de força *versus* deslizamento relativo dos modelos experimentais, considerando apenas o carregamento estático e progressivo, realizado após os 25 ciclos de carga e descarga. Analisando estes diagramas, percebe-se que se atinge um patamar de carga nos modelos a partir de um deslizamento relativo de 6 mm, com exceção do modelo B8-3, que apresentou um comportamento mais frágil em relação aos outros modelos. Como não há uma perda de rigidez das curvas após se atingir a carga última do ensaio (P_u), δ_{uk} é definido como o deslizamento relativo medido ao nível de P_u . Dessa forma, os conectores de cisalhamento podem ser considerados como dúcteis, por apresentarem deslizamentos relativos δ_{uk} superiores a 6 mm. O ensaio do modelo B4-1 foi interrompido logo após se atingir um patamar de carga, para que posteriormente se realizar-se um corte no perfil para verificar a causa do colapso estrutural.

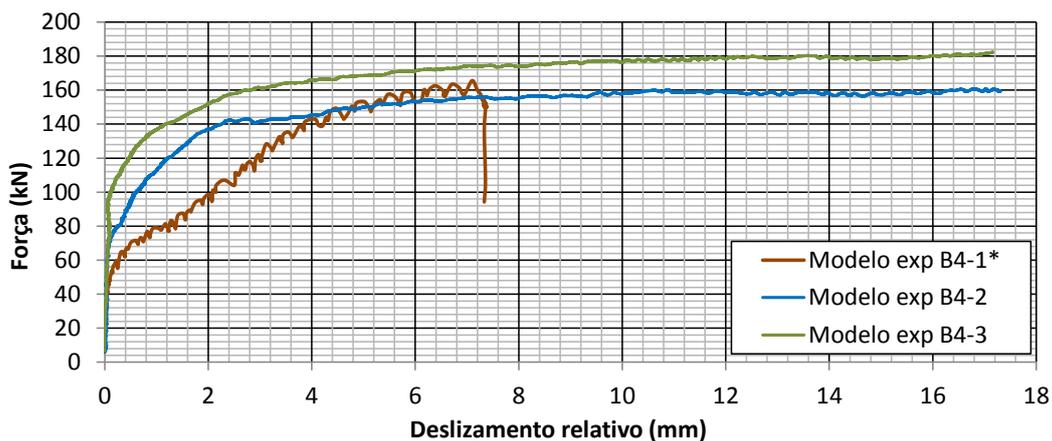


Figura 9 - Força versus deslizamento relativo dos modelos da série B4¹.

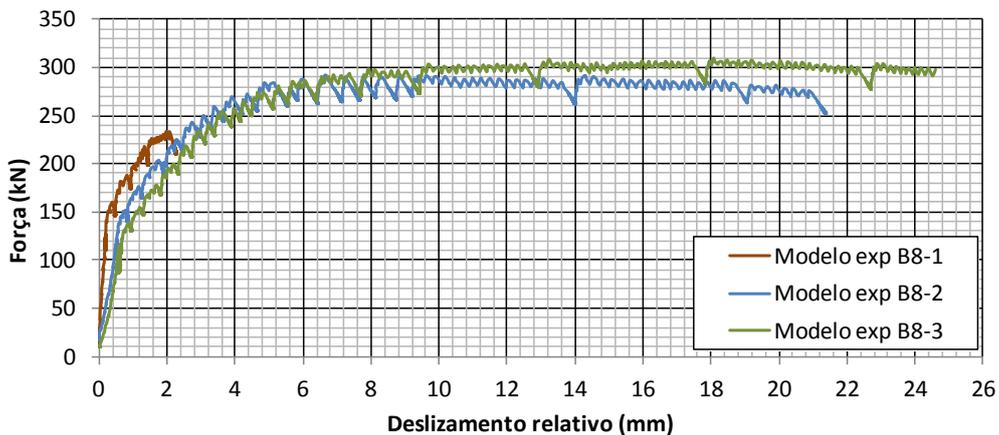


Figura 10 - Força versus deslizamento relativo dos modelos da série B8.

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados parâmetros de resistência dos conectores de cisalhamento dos modelos das séries B4 e B8, respectivamente. Esses parâmetros permitem a classificação destes conectores de cisalhamento, se são flexíveis ou rígidos. São determinadas a carga

¹ O ensaio do modelo B4-1 foi interrompido quando se alcançou um deslizamento relativo superior de 7 mm.

última (P_u), a carga última por conector ($P_{u,con}$), a resistência característica (PR_k) e a rigidez secante (k_{sc}) dos modelos. Observando os resultados, percebe-se que k_{sc} dos modelos é menor que 200 kN/mm (valor limite para caracterizar o conector como flexível). Dessa forma os conectores ensaiados apresentaram um comportamento flexível. Contudo, observa-se que houve uma grande dispersão entre os resultados das rigidezes k_{sc} nos modelos analisados, apresentando desvio padrão para os modelos das séries B4 e B8 de 35,34% e 34,06%, respectivamente.

Tabela 4 – Parâmetros de resistência dos conectores de cisalhamento dos modelos da série B4.

Modelo	P_u (kN)	$P_{u,con}$ (kN)	PR_k (kN)	k_{sc} (kN/mm)
B4-1	165,59	41,40	37,26	12,02
B4-2	160,63	40,16	36,14	38,92
B4-3	182,37	45,59	41,03	82,07
Média	169,53	42,38	38,14	44,34

Tabela 5 - Parâmetros de resistência dos conectores de cisalhamento dos modelos da série B8.

Modelo	P_u (kN)	$P_{u,con}$ (kN)	PR_k (kN)	k_{sc} (kN/mm)
B8-1	223,25	27,90	26,24	73,47
B8-2	291,51	36,44	32,79	17,12
B8-3	308,68	38,59	34,73	12,15
Média	277,81	34,72	31,25	34,25

Nos modelos com 4 conectores (série B4), obteve-se valores de carga última por conector em torno de 40 kN, próximos aos encontrados por Bremer [1] em ensaios do tipo *push-out* padrão. Para se verificar qual estado limite a estrutura estaria sujeita, realizou-se um corte retangular nos perfis dos modelos B4-1 e B4-2, como pode ser observado na Figura 11. Concluiu-se que os modelos começavam a perder rigidez devido à fissuração do núcleo do concreto, ocasionada devido a rotação dos conectores. Observando ainda a Figura 11a, nota-se que essas fissuras se originaram no nível dos conectores e se propagando até a outra extremidade.



(a)

(b)

Figura 11 – Fissuração e ruptura do núcleo de concreto nos modelos: (a) B4-1 e (b) B4-2.

Conforme descrito no item 2, para os modelos B4-1, B4-2, B4-3 e B8-1, a montagem e a instrumentação dos ensaios foram realizadas de acordo com a disposição representada na Figura 4a. Observando ainda essa figura, nota-se que para este procedimento de ensaio foi utilizada uma chapa de aplicação de carga em formato circular. Contudo para o modelo B8-1, ocorreu um esmagamento localizado no núcleo de concreto na região em contato com a chapa de aplicação de carga, como pode-se observar na Figura 12b. Menciona-se também que a carga última obtida neste modelo se apresentou bem abaixo da carga última estimada, igual a 320 kN (40 kN por conector de cisalhamento), além de se apresentar um pequeno deslizamento relativo entre o perfil de aço e o núcleo de concreto. Dessa forma, foram fabricadas duas chapas de aço com dimensões próximas às da seção transversal do núcleo de concreto, atuando sobrepostas, com o intuito de garantir maior uniformidade do carregamento aplicado e menor tensão na seção transversal do núcleo de concreto.

Com o carregamento sendo distribuído de forma mais homogênea sobre a seção transversal do núcleo de concreto nos modelos com 8 conectores, foram obtidos valores superiores de carga última e deslizamentos relativos se comparados com os do modelo M8-1 (observar a Tabela 5). Apesar disto, foi observado também o esmagamento do núcleo de concreto, representado pelo desnível da seção transversal do concreto, como pode ser observado na Figura 12c. Este desnível originou-se devido à folga entre a chapa de aplicação de carga e o perfil de aço. Nos modelos com 4 conectores, por sua vez, não foi observado o esmagamento do núcleo de concreto caracterizado pelo desnível da seção transversal superior do núcleo de concreto (observar Figura 12a).

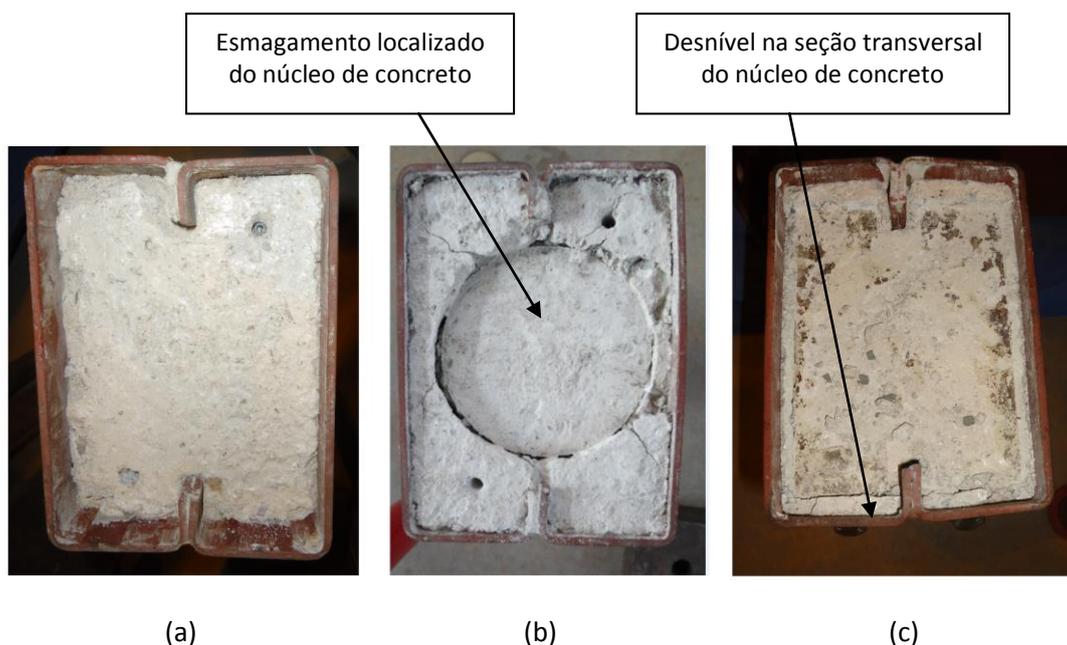


Figura 12 – Vista superior dos modelos após a realização dos ensaios: (a) B4-3, (b) B8-1, (c) B8-2.

Para averiguar a ruptura do bloco do concreto, realizou-se um corte nos perfis dos modelos B8-1 e B8-2, como pode ser observado na Figura 13. Ao observar essa figura, percebe-se que ocorreu a linha de fissuração no primeiro nível de conectores. Averiguou-se também a ruptura do bloco de concreto situado acima dos conectores, devido às bielas de compressão, formando linhas de rupturas a 45° , que se prolongam até o nível dos conectores. Para essa

série, houve uma redução da carga última média por conector de 18% em relação à carga última média obtida na série B4.

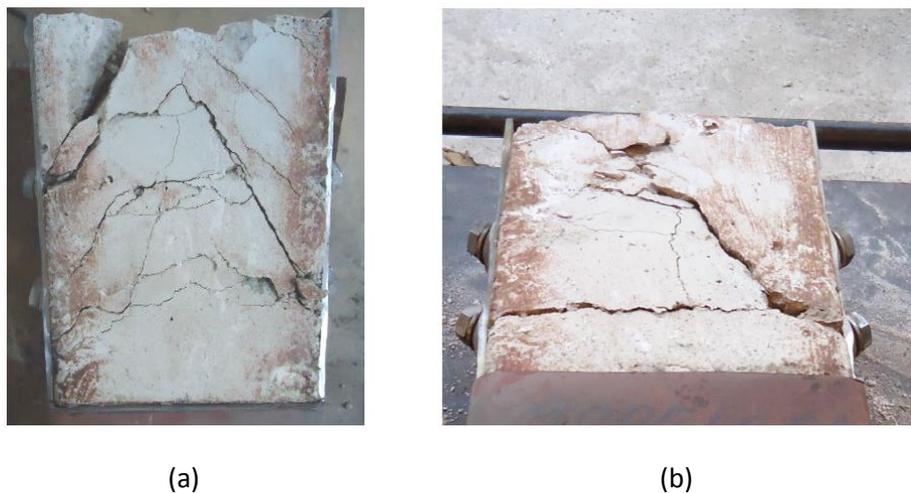


Figura 13 - Fissuração e ruptura do núcleo de concreto nos modelos: (a) B8-1 e (b) B8-2.

Na Figura 14 é mostrada a rotação dos conectores que ocorre com o aumento do carregamento. Nota-se que, com a rotação excessiva dos conectores, há o escoamento local do perfil na região dos furos. Notou-se também um engastamento na extremidade do fuste dos parafusos, provocado pelo núcleo de concreto.



Figura 14 – Representação do giro dos conectores no modelo M8-5: (a) vista externa, (b) vista interna.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

As Figuras 15 e 16 apresentam as curvas de força *versus* deslizamento relativo dos modelos numéricos B4n e B8n, sendo estes modelos comparados com as curvas obtidas experimentalmente (ver item 3). As curvas experimentais representadas neste item foram limitadas a um deslizamento relativo máximo de 12 mm, para uma melhor comparação com as curvas obtidas numericamente. Observando essas figuras, percebe-se que a carga última dos modelos numéricos apresentaram valores próximos aos resultados obtidos experimentalmente. Contudo, algumas curvas experimentais se apresentaram mais flexíveis que as obtidas numericamente. Isto pode ser verificado comparando a curva numérica B4n

com a curva experimental B4-1 e a curva numérica B8n com as curvas experimentais B8-2 e B8-3.

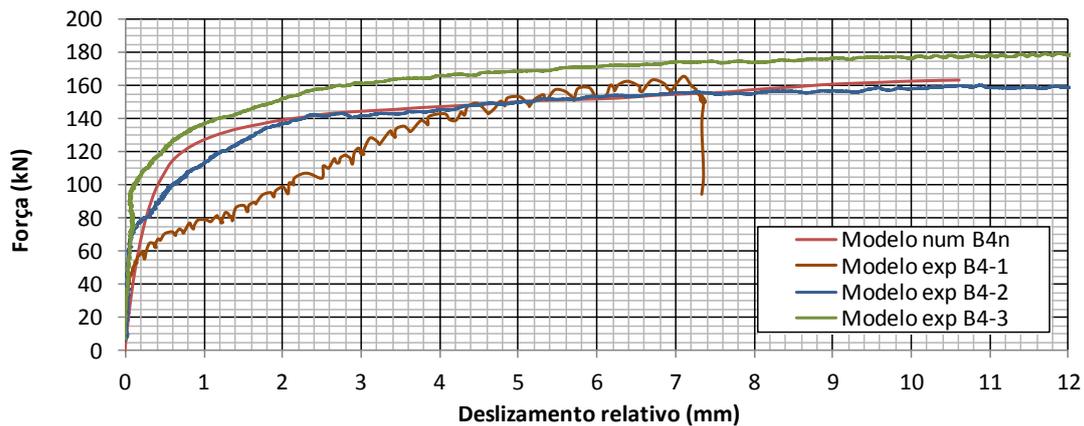


Figura 15 - Força *versus* deslizamento relativo do modelo numérico B4n e os modelos experimentais da série B4, limitado a um deslizamento relativo de 12 mm.

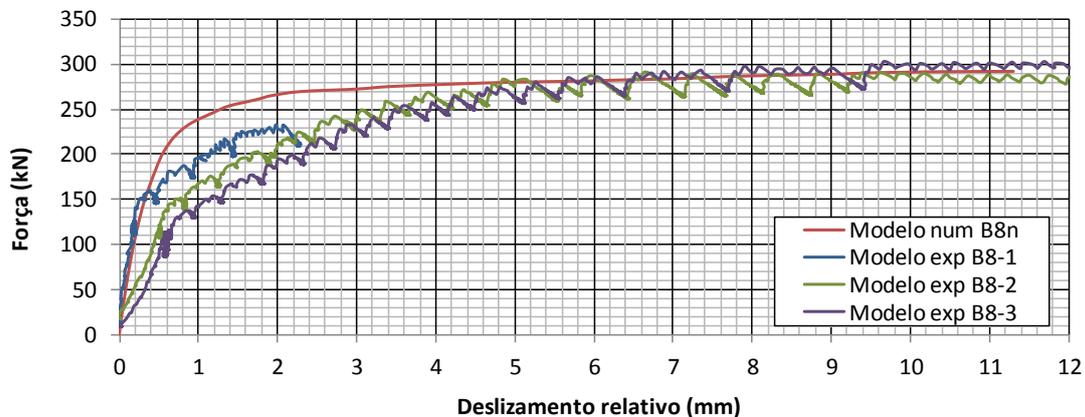


Figura 16 - Força *versus* deslizamento relativo do modelo numérico B8n e os modelos experimentais da série B8, limitado a um deslizamento relativo de 12 mm.

A comparação entre os resultados numéricos e experimentais da carga última dos modelos é apresentada na Tabela 6. Comparando esses resultados obteve-se erros de 3,63% e 4,95% para as séries B4 e B8, respectivamente. Desconsiderando o modelo experimental M8-1, que apresentou um comportamento mais frágil em relação aos outros modelos da série M8, o erro da série B8 é reduzido para 2,81%. Dessa forma, a modelagem numérica apresentou uma grande eficiência para estimar a carga última dos modelos. Na simulação numérica foram obtidos os seguintes valores para a rigidez secante: $k_{sc,B4n} = 7,19$ kN/mm e $k_{sc,B8n} = 3,56$ kN/mm. Conforme descrito no item 3, obteve-se uma grande dispersão entre os valores da rigidez secante k_{sc} determinados experimentalmente, dificultando dessa forma a confiabilidade destes parâmetros obtidos numericamente. Analisando ainda as curvas numéricas apresentadas, obteve-se deslocamentos relativos superiores a 6 mm, caracterizando um comportamento dúctil. Dessa forma, como na análise experimental, os conectores de cisalhamento apresentaram um comportamento flexível e dúctil.

Tabela 6 - Comparação da carga última dos modelos obtida numericamente e experimentalmente.

Série	$P_{u,num}$ (kN)	$P_{u,exp}$ (kN)	Erro (%)
B4	163,38	169,53	3,63
B8	291,57	277,81*	4,95*
Notas: *Desconsiderando o modelo experimental M8-1, que apresentou um comportamento mais frágil em relação aos outros modelos da série M8, obtém-se para a série B8: $P_{u,exp} = 300,10$ kN e Erro (%) = 2,81%			

Na Figura 17 é representada a variação dos esforços solicitantes de tração no núcleo de concreto, sendo representadas apenas as instâncias correspondentes aos conectores e o núcleo de concreto. As tensões S_{33} são no sentido longitudinal (eixo z) e apresentam valores em MPa. A região cinza apresenta tensões superiores à resistência média à tração do concreto, $f_{ctm} = 3,47$ MPa. Essa resistência é superada na altura do nível dos conectores para o modelo B4n e para o primeiro nível de conectores do modelo B8n. Pode-se então concluir que as fissuras observadas nos modelos experimentais na altura destes níveis (observar Figuras 11 e 13) ocorreram devido a esforços de tração no núcleo de concreto, originados devido à rotação dos conectores de cisalhamento.

A variação dos esforços de compressão no núcleo de concreto é representada na Figura 18. As regiões escuras apresentam tensões superiores à resistência à compressão média do concreto, $f_{cm} = 36,33$ Mpa, enquanto que as regiões em cinza representam as partes em que o concreto é tracionado. Observando essa figura, nota-se o esmagamento local do concreto na região acima dos conectores. Observando as tensões de compressão do modelo numérico B8n (Figura 18b), nota-se que a região esmagada de concreto entre os níveis de conectores (região escura representada) se encontram bem próximas e a região esmagada de concreto acima do segundo nível de conectores próximas a superfície do núcleo de concreto. Isto indica que, com o avanço do carregamento, são formadas linhas de rupturas a 45° , como foi observado nos modelos experimentais (ver Figura 13).

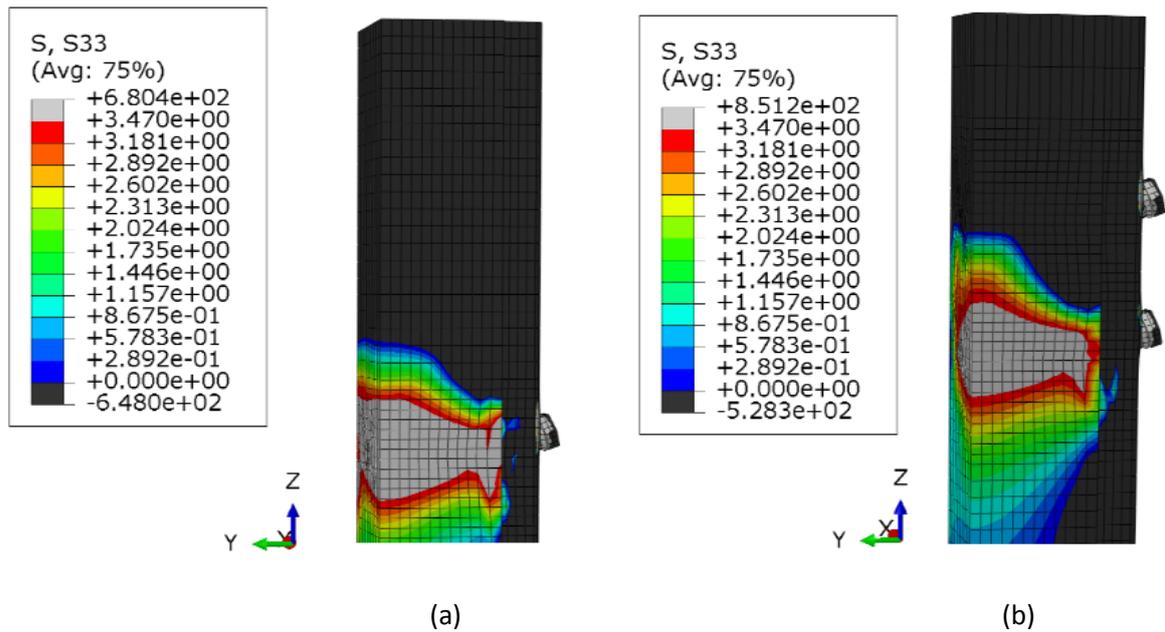


Figura 17 - Tensões longitudinais de tração no núcleo de concreto nos modelos: (a) B4n, (b) B8n.

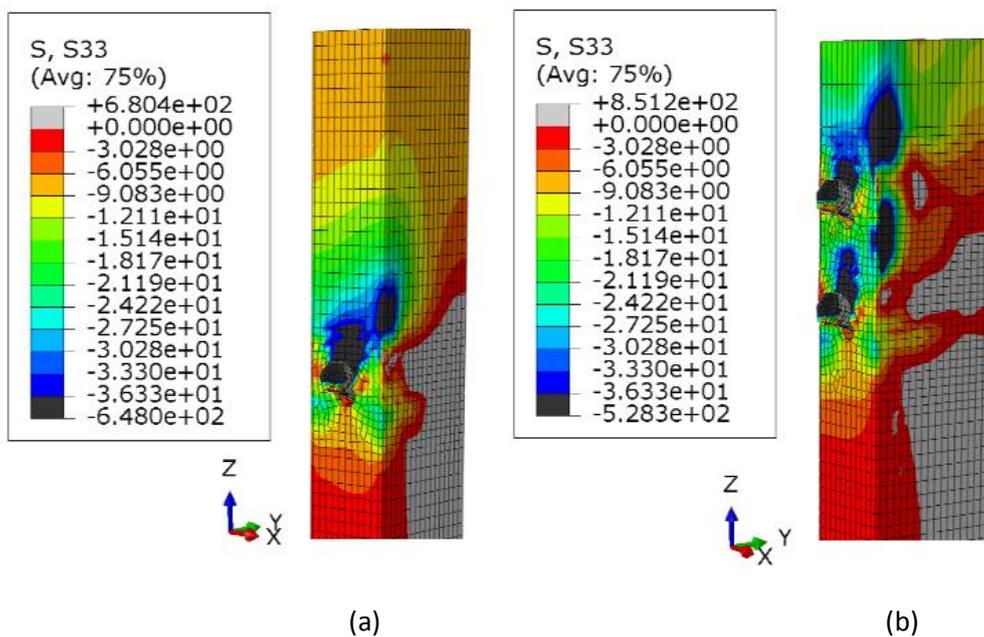


Figura 18 - Tensões longitudinais de compressão no núcleo de concreto nos modelos: (a) B4n, (b) B8n.

O escoamento do aço do perfil é representado pela região cinza da Figura 20a. Essa região apresenta tensões superiores a $f_y = 373,6$ MPa. Para uma melhor análise do escoamento do aço do perfil, são analisadas as tensões de von Mises. Nas simulações notou-se que o escoamento ocorria na região próxima ao nível dos conectores e na mesma face do perfil que estes estão situados.

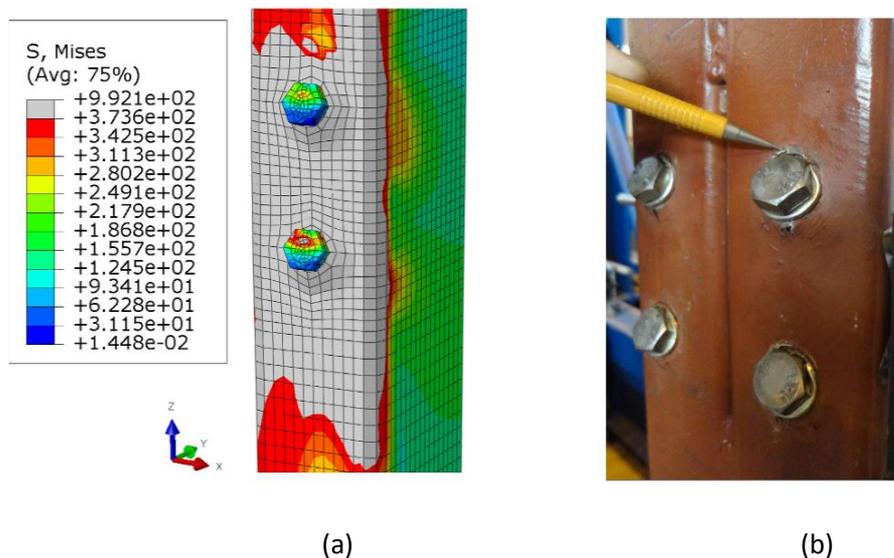


Figura 19 – Escoamento do aço do perfil nos modelos: (a) B8n, (b) B8-2.

Na Figura 21 são apresentadas apenas as instâncias correspondentes aos conectores e ao perfil de aço. O deslocamento U3 indica os deslocamentos na direção longitudinal (eixo z) em mm. Assim como nos modelos experimentais, notou-se que em ambos os modelos M4n e M8n, os conectores eram fletidos, significando o engastamento dos parafusos na extremidade do fuste provocado pelo núcleo de concreto.

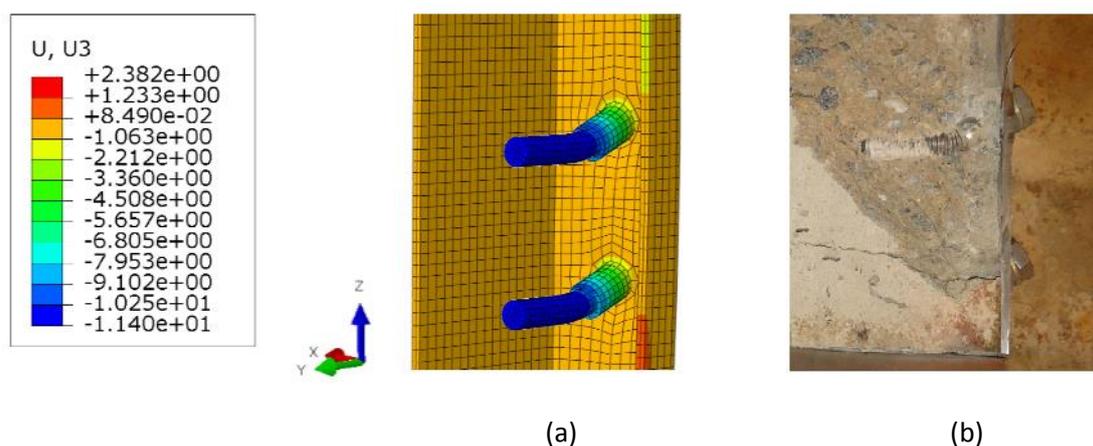


Figura 20 - Representação do giro dos conectores nos modelos: (a) B8n, (b) B8-2.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental de pilares curtos preenchidos com concreto, utilizando conectores de cisalhamento constituídos por parafusos com cabeça sextavada e rebite com rosca interna. Os perfis dos pilares são do tipo caixa composto por dois perfis U enrijecidos (Ue) formados a frio, cada um com dimensões nominais de 175x65x25x3,75 mm. O estudo teórico foi realizado através de simulações numéricas utilizando o software comercial de elementos finitos, ABAQUS. Os resultados obtidos experimentalmente serviram para a calibração dos modelos numéricos. Com esses modelos numéricos estão sendo realizados estudos paramétricos com o objetivo de propor uma solução analítica para o dimensionamento do conector de cisalhamento como componente de

transferência de carga entre vigas e pilares mistos de aço e concreto com perfis formados a frio.

Após a realização dos ensaios e a simulação numérica desses modelos, pode-se concluir que a modelagem retratou bem o comportamento dos conectores de cisalhamento estudados. Em ambas as análises experimentais e numéricas foram observados os seguintes fenômenos: fissuração do núcleo de concreto na altura do primeiro nível de conectores, rompimento do núcleo de concreto para os modelos com 8 conectores (formando linhas de rupturas a 45°), engastamento dos conectores na interface concreto-perfil de aço e o escoamento do perfil de aço na região próxima ao nível dos conectores. A modelagem numérica apresentou uma boa eficiência para se estimar a carga última dos modelos apresentando erros menores que 5%.

Os resultados experimentais e numéricos demonstraram que os conectores apresentaram um comportamento flexível e dúctil quando utilizado em subsistemas de pilares mistos de aço e concreto com perfis formados a frio. Contudo, obteve-se uma grande dispersão entre os valores de rigidezes k_{sc} obtidos experimentalmente, apresentando desvio padrão para os modelos das séries B4 e B8 de 35,34% e 34,06%, respectivamente. Notou-se também que a carga última dos modelos não aumentava com a mesma proporção com o aumento do número de conectores, ocorrendo uma diminuição da carga última por conector.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro neste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Bremer, C. F. *Vigas Mistas em Perfis Formados a Frio Com Lajes Mistas e Lajes Moldadas Sobre Painéis de Concreto Celular*. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.
- 2 Oliveira, C. G. R. *Análise teórico – experimental de vigas mistas com perfis formados a frio, considerando a flexibilidade dos conectores de cisalhamento e a influência do atrito entre o concreto e o aço do perfil*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.
- 3 Oliveira, L. A. F. *Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis formados a frio e lajes pré-fabricadas*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2001.
- 4 Quiñonez, V. F. A. *Comportamento de ligação mista viga – pilar em perfis formados a frio com conectores de parafuso e rebite com rosca interna*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.

- 5 EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium; 2004.
- 6 Cardoso, H. S. *Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2014.
- 7 SIMULIA. Software ABAQUS 6.10. Dassault Systèmes, USA; 2010.
- 8 Almeida, P. H. F. *Estudo numérico de um dispositivo de transferência de cargas em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto*. Dissertação (Mestrado) Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.