

Experimental analysis of bolts employed as shear connectors in circular concrete-filled tube columns

Análise experimental do uso de parafusos como conectores de cisalhamento em pilar misto circular preenchido com concreto

E. M. XAVIER^a
ellen.mxavier@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8069-5866>

J. G. R. NETO^b
julianogeraldo.eng@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5448-7518>

A. M. C. SARMANHO^a
arlene.sarmanho@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6900-8551>

L. ROQUETE^c
lucasroquete@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7937-822X>

L. G. C. DE PAULA^a
leticiagualberto10@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0437-9989>

Abstract

This paper presents experimental and theoretical analysis of bolts employed as shear connectors in circular concrete-filled steel tube columns (CFTs). The theoretical results, obtained from ABNT NBR 16239:2013 formulations, were compared with the experimental results. A series of push-out tests were carried out, where the diameter and length of the bolts, the number of connectors and the concrete strength were varied. From the experimental results, it was observed that the equations from ABNT NBR 16239:2013 are conservative. Therefore, it is proposed an adjustment to the formulations in order to consider the concrete confinement. It was also verified that increments in the diameter and the length of the bolt increase the load capacity of the connector. However, the variation of the quantity of bolts and the concrete strength did not interfere in the load capacity.

Keywords: concrete-filled tube columns, circular tubular section, shear connector, bolt.

Resumo

Este estudo apresenta análises experimentais e teóricas do uso de parafusos como conectores de cisalhamento em pilares mistos de aço em seção tubular circular preenchidos com concreto (PMPs). Os resultados obtidos experimentalmente são comparados com os resultados das formulações propostas pela norma ABNT NBR 16239:2013. Os ensaios são de cisalhamento direto, variando parâmetros como diâmetro e comprimento dos parafusos, quantidade de conectores e resistência do concreto. A partir dos resultados experimentais observou-se que as equações da ABNT NBR 16239:2013 estão a favor da segurança, e é proposta uma adequação das formulações da norma para considerar o efeito do confinamento do concreto. Verificou-se também que o aumento do diâmetro e comprimento do parafuso aumenta a capacidade de carga do conector, porém a variação da quantidade de parafusos e da resistência do concreto não interferem na sua capacidade de carga.

Palavras-chave: pilar misto preenchido com concreto, seção tubular circular, conector de cisalhamento, parafuso.

^a Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto, MG, Brasil;

^b Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO – Brasil;

^c Universidade Federal de São João del Rei, Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação e Humanidades, Ouro Branco, MG, Brasil.

Received: 28 Jul 2017 • Accepted: 01 Nov 2017 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

Os pilares mistos preenchidos com concreto (PMPCs) são elementos estruturais submetidos a compressão ou flexo-compressão, formados por um perfil tubular circular, quadrado ou retangular preenchidos com concreto (Figura 1).

A associação dos dois materiais, aço e concreto, traz vantagens em comparação com os pilares usuais que utilizam apenas aço ou concreto armado em sua composição. Comparando os PMPCs com aqueles constituídos apenas por perfil de aço, pode-se afirmar que a utilização do PMPC reduz consideravelmente o consumo de aço, auxilia na proteção do elemento contra incêndio e aumenta a capacidade resistente do elemento estrutural, reduzindo os efeitos de flambagem local e global do pilar de aço. Já com relação aos pilares convencionais de concreto armado, os PMPCs possuem como benefício a dispensa de fôrmas e escoramentos durante o processo de concretagem e cura do concreto, o que facilita a construção e reduz o tempo e os custos de trabalho [2], [3]. Além das vantagens já citadas os PMPCs apresentam excelente desempenho em edifícios sujeitos a abalos sísmicos, pois a interação do aço com o concreto aumenta a resistência e ductilidade do pilar misto [3], [4].

Outra característica importante que auxilia no aumento da resistência do PMPCs é o efeito do confinamento. Segundo [5], o comportamento frágil do concreto é minimizado pela ação das pressões laterais que o perfil tubular em aço exerce sobre o concreto em seu interior. Essa pressão do aço proporciona resistência à tentativa de expansão do concreto quando comprimido, surgindo assim o efeito de confinamento do perfil tubular de aço sobre o núcleo de concreto. A norma ABNT NBR 8800:2008 [6] determina algumas hipóteses básicas para a aplicação do método simplificado para dimensionamento de pilares mistos. Dentre as hipóteses básicas, a norma prevê que deve haver interação completa entre o aço e o concreto no pilar misto, permitindo que ocorra a transferência de tensões cisalhantes na interface dos dois materiais.

Naturalmente, na região de contato entre o aço e o concreto existem três mecanismos de transferência de tensões distintos: a adesão; a aderência mecânica e o atrito (Figura 2). Esses três mecanismos juntos formam a aderência natural entre o aço e o concreto [8].

Segundo Silva [8], a adesão é um mecanismo elasto-frágil que surge no momento de concretagem, quando o concreto fresco entra em contato com o aço do PMPC, sendo desprezível para efeitos de resistência por se romper nos estágios iniciais de deslocamento para baixos níveis de carga.

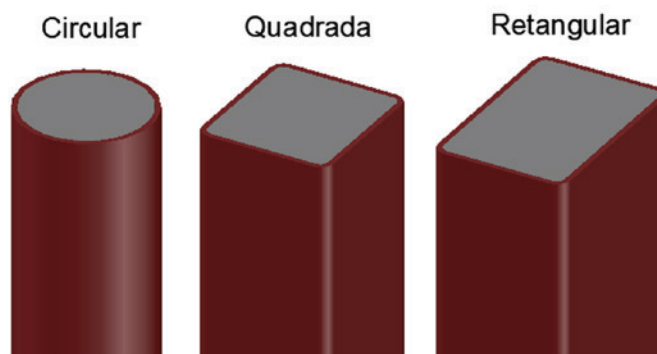


Figura 1

Tipos de seções transversais de pilares mistos preenchidos com concreto

Já a aderência mecânica é o resultado da interação mecânica do núcleo de concreto e a superfície rugosa do perfil tubular de aço. Com o aumento da carga aplicada, aumenta-se também a tendência de deslizamento na interface aço-concreto, porém a separação dos materiais é impedida devido ao efeito de confinamento, que faz surgir tensões normais resistentes ao deslizamento entre o aço e o concreto. Por esse motivo, a aderência mecânica pode ser considerada um mecanismo parcial do atrito [8].

O atrito é um mecanismo da aderência natural que depende da força normal aplicada na interface aço-concreto e do coeficiente de atrito da superfície. O coeficiente de atrito, por sua vez, depende do grau de rugosidade da superfície interna do perfil tubular de aço e das condições da interface aço-concreto, ou seja, se a superfície interna do aço possui lubrificação com óleos, graxas, etc. Sendo assim, o coeficiente de atrito pode variar de zero, em superfícies lubrificadas, a 0,6, em superfícies normais [8].

Para baixos valores de cargas solicitantes no PMPC, o cisalhamento longitudinal é transferido pela aderência natural que surge nas superfícies entre o aço e o concreto. Porém, com o aumento da carga solicitante essa aderência pode ser rompida, não podendo ser restaurada novamente. Nesse caso, faz-se necessária a utilização de dispositivos de transferência de carga utilizados para absorver e transmitir os esforços cisalhantes na interface aço-concreto, dispositivos estes chamados de conectores de cisalhamento [9].

Nos PMPCs é evidente a importância dos conectores de cisalhamento para transmitir os esforços que são introduzidos no pilar, de forma a não sobrecarregar somente o perfil em aço ou núcleo de concreto, possibilitando o comportamento misto da estrutura [10].

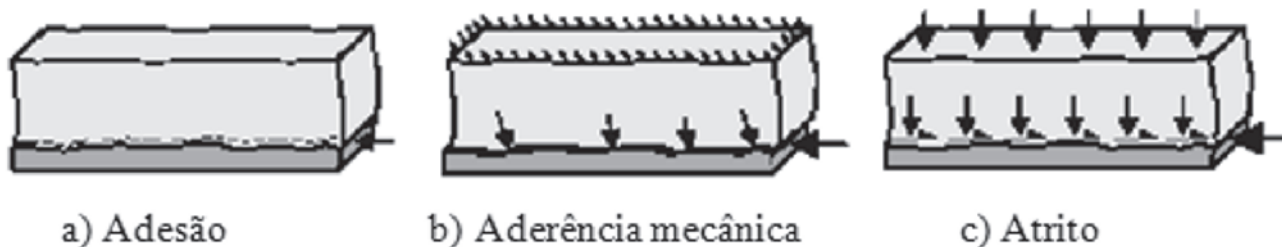


Figura 2

Mecanismos de transferência de tensões na interface aço-concreto. Fonte: [18] apud [7]

A ABNT NBR 8800:2008 [6] determina que as regiões de introdução de carga em pilares mistos são locais onde ocorrem variações localizadas dos esforços solicitantes, que surgem como consequência de ligações tipo viga-pilar ou quando há interrupção da armadura longitudinal do pilar (como em regiões de emenda de pilar ou em ligações do pilar com a base). Nas regiões de introdução de cargas pode ser difícil garantir que ocorra a distribuição das tensões cisalhantes do perfil tubular de aço para o núcleo de concreto. Para evitar que ocorra o deslizamento relativo na interface aço-concreto e permitir a distribuição de tensões entre os materiais nessas regiões, a norma brasileira determina a utilização de conectores de cisalhamento [6].

A norma ABNT NBR 16239:2013 [1] indica a utilização de dois tipos de dispositivos utilizados como conectores de cisalhamento em PMPC. Esses dispositivos podem ser similares ao parafuso (comum ou de alta resistência) ou conector tipo pino com cabeça (conhecido também como *stud bolt*).

Neste trabalho tem-se o estudo do conector de cisalhamento tipo parafuso em pilar misto tubular circular em aço preenchido com concreto simples. De acordo com a ABNT NBR 16239:2013 [1], os parafusos utilizados como conectores de cisalhamento devem ser instalados no perfil tubular com espaçamento entre os eixos, em qualquer direção, maior ou igual a seis vezes o diâmetro do parafuso, conforme ilustrado na Figura 3.

De acordo com a ABNT NBR 16239:2013 [1] é possível calcular a força resistente de cálculo para cada parafuso como o menor valor encontrado nas Equações (1) e (2), apresentadas a seguir:

$$V_{Rd} = l_b d_b \sigma_{c,Rd} \leq 5 d_b^2 \sigma_{c,Rd} \tag{1}$$

$$V_{Rd} = 0,4\pi \frac{d_b^2 f_{ub}}{4 \gamma_{a2}} \leq 2,4 d_b t \frac{f_u}{\gamma_{a2}} \tag{2}$$

Onde: l_b é o comprimento líquido do parafuso conector (descontando a espessura da parede do tubo); d_b é o diâmetro do parafuso;

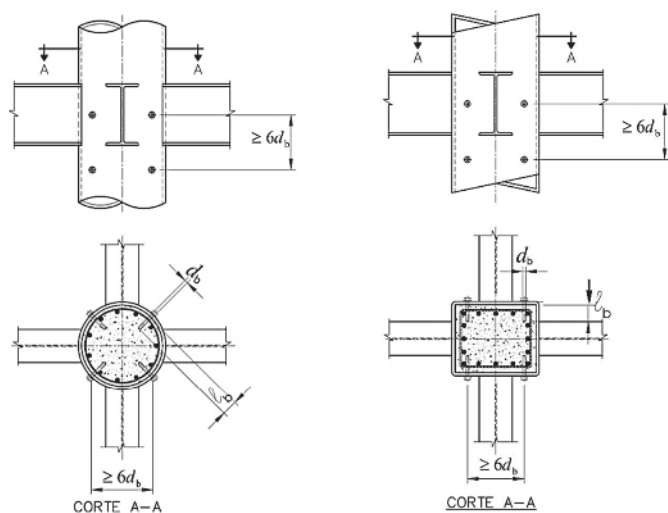


Figura 3
Configuração do conector de cisalhamento tipo parafuso instalado em PMPC de seção circular e retangular. Fonte: [1]

so; t é a espessura da parede do tubo; f_u é a resistência à ruptura do aço do perfil tubular; f_{ub} é a resistência à ruptura do parafuso conector; γ_{a2} é o coeficiente de ponderação da resistência do aço estrutural à ruptura; e $\sigma_{c,Rd}$ é a tensão resistente de cálculo do concreto à pressão de contato, obtida pela Equação (3):

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \tag{3}$$

Onde: f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão; γ_n é o coeficiente de comportamento, igual a 1,40; γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto; A_2 é a área carregada e A_1 é a área de apoio, tomando-se A_2/A_1 igual a 4 de acordo com a ABNT NBR 16239:2013 [1].

As Equações (1) e (2) baseiam-se em uma avaliação analítica dos possíveis modos de ruptura que podem ocorrer no PMPC utilizando o conector tipo parafuso. A Equação (1) verifica o esmagamento do concreto na região de contato abaixo do conector tipo parafuso. Essa área de contato entre o concreto e o parafuso é correspondente ao diâmetro do parafuso multiplicado pelo seu comprimento, limitado a um valor máximo igual a cinco vezes o diâmetro do parafuso. Já a Equação (2) refere-se a força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso, limitada pela força resistente de cálculo ao esmagamento da parede do tubo [11].

Para possibilitar a comparação entre os resultados experimentais e teóricos encontrados nas formulações analíticas da ABNT NBR 16239:2013 [1], faz-se uso das Equações (1) e (2) sem a utilização dos coeficientes de ponderação. Por esse mesmo motivo, utiliza-se o valor de f_{cm} no lugar de f_{ck} na Equação (3).

Segundo [1] e [11], limitando-se o espaçamento entre furos em no mínimo seis vezes o diâmetro do parafuso, não é necessário considerar a sobreposição de tensões na Equação (1) e nem o rasgamento entre furos consecutivos na Equação (2).

Para verificação da análise experimental do comportamento de conectores de cisalhamento, a norma europeia EN 1994-1-1:2004 [12] determina a realização do ensaio de cisalhamento direto, *push-out*. A EN 1994-1-1:2004 padroniza a realização do ensaio de cisalhamento direto, verificando a resistência a carga e a fadiga dos conectores de cisalhamento utilizados em estruturas mistas de aço e concreto.

O ensaio experimental tipo *push-out* descrito pela EN 1994-1-1:2004, foi desenvolvido para determinar o comportamento de dispositivos tipo *stud bolt*, utilizados como conectores de cisalhamento em vigas mistas de aço e concreto, sendo esse tipo de ensaio mais indicado para representar o comportamento de vigas mistas. Para simular o comportamento de um pilar misto preenchido com concreto, este tipo de ensaio pode sofrer algumas variações a fim de adequá-lo ao elemento analisado [13].

Apesar de a ABNT NBR 16239:2013 fazer referência e apresentar formulações para o cálculo da força resistente dos parafusos utilizados como conectores de cisalhamento, há poucas pesquisas desenvolvidas com relação ao uso desse simples e barato dispositivo utilizado em PMPC. Porém, existem algumas pesquisas que se destacam, como [13]-[19], onde esses autores analisaram de forma experimental e/ou numérica a utilização do parafuso como conector de cisalhamento em PMPC. As pesquisas realizadas por [16], [17] e [18], indicam que as expressões analíticas da ABNT NBR 16239:2013 estão excessivamente a favor da segurança.

Com relação as pesquisas citadas anteriormente esse trabalho tem



Figura 4
Detalhe do vazio de 50 mm deixado durante a concretagem

como principal inovação a obtenção de resultados experimentais associados ao desenvolvimento de uma nova técnica de ensaio. Os resultados propiciam a avaliação do efeito do confinamento do concreto quando submetido a carga axial de compressão, considerando arranjos diametrais de conectores em diferentes alturas, variando diâmetros de parafusos e resistências de concreto.

O programa experimental desenvolvido utiliza técnica experimental baseada em trabalhos anteriores dos autores e em ensaios *push-out* e possibilita a verificação da influência dos parâmetros físicos e geométricos do parafuso e do pilar misto no comportamento da conexão.

Com a técnica experimental desenvolvida e os protótipos ensaiados pode-se analisar o comportamento do parafuso quando utilizado como conector de cisalhamento em pilar misto tubular circular preenchido com concreto, e avaliar a aplicabilidade das expressões analíticas da norma ABNT NBR 16239:2013. Alguns parâmetros como: a quantidade de parafusos; o diâmetro dos parafusos; o comprimento dos conectores e o valor de f_{ck} do concreto, foram variados a fim de se analisar a interferência desses na capacidade do parafuso em transmitir esforços cisalhantes na interface aço concreto.

2. Materiais e programa experimental

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

2.1 Técnica experimental

A técnica experimental utilizada neste trabalho foi desenvolvida pelos autores dessa pesquisa no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Ouro Preto e empregada em estudos anteriores de [17], [19]. Essa técnica é baseada nas recomendações do ensaio *push-out* da EN 1994-1-1:2004, porém adaptada ao elemento estrutural que será analisado, o PMPC. A seguir, será descrito o passo a passo para a fabricação dos protótipos de PMPC e execução da técnica experimental desenvolvida.

Como o objetivo do ensaio de cisalhamento direto é verificar a capacidade de carga e o comportamento do parafuso como conector de cisalhamento, antes da concretagem dos protótipos, a superfície interna do perfil tubular foi lubrificada com graxa a fim de eliminar os efeitos da aderência natural na transferência de carga entre o aço e o concreto. A técnica de lubrificar a parede interna do perfil com graxa é a mais adequada, visto que no trabalho desenvolvido por [17] foram analisadas outras técnicas e comprovada a eficiência desse mecanismo de isolamento da aderência.

A concretagem foi realizada deixando um vazio de aproximadamente 50 mm na extremidade inferior dos protótipos, conforme ilustrado na Figura 4, para possibilitar o deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto durante a realização do ensaio experimental. Para deixar esse vazio, as peças foram concretadas na posição invertida à posição de ensaio.

A carga de compressão foi aplicada diretamente no núcleo de concreto por meio de uma rótula. Para que a carga estivesse distribuída uniformemente no núcleo de concreto foi utilizada uma chapa usinada com seção transversal aproximadamente igual a seção interna do perfil tubular em aço. Na Figura 5 é ilustrada a configuração do protótipo após a concretagem, já na posição de ensaio.

O procedimento de ensaio foi realizado por controle de deslocamento, conforme descrito a seguir:

- Aplicação de 5 ciclos de pré-cargas. Em cada ciclo a carga foi aplicada no núcleo de concreto com controle de carregamento de 10 kN/min, onde o protótipo é descarregado somente após atingir 40% da carga teórica por conector, calculada de acordo com as formulações da ABNT NBR 16239:2013;
- Finalizados os ciclos de pré-cargas, os modelos foram carregados continuamente por controle de deslocamento de 0,0025 mm/s até o fim do ensaio.

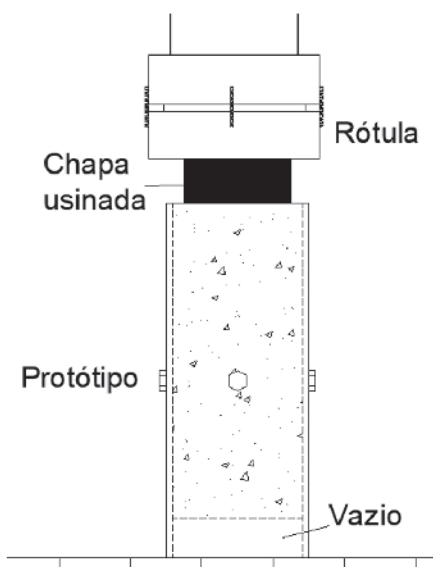


Figura 5
Representação esquemática do protótipo para a realização do ensaio de cisalhamento direto de acordo com a técnica experimental

Tabela 1
Nomenclatura e características dos protótipos, série P

Nomenclatura $P_i(j)_{-i-n-d_b-l_b-f_{cm}}$	D x t do tubo (mm)	Número de parafusos n	Diâmetro do parafuso d_b (pol.)	Comprimento do parafuso l_b (pol.)	f_{cm} (MPa)
P1(j)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	219x8,2	4	1/2"	2"	19,7
P2(j)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	219x8,2	4		4"	19,7
P3(j)-8,-4P-1/2"-2"-28,7	219x8,2	4		2"	28,7
P4(j)-9,5-4P-1/2"-4"-28,7	219x9,5	4		4"	28,7
P5(j)-9,5-8P-1/2"-2"-19,7	219x9,5	8		2"	19,7
P6(j)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	219x9,5	8		4"	19,7
P7(j)-8,-4P-5/8"-2"-19,7	219x8,2	4	5/8"	2"	19,7
P8(j)-8,-4P-5/8"-4"-19,7	219x8,2	4		4"	19,7
P9(j)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	219x8,2	4		2"	28,7
P10(j)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	219x8,2	4		4"	28,7
P11(j)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	219x9,5	8		2"	19,7
P12(j)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	219x9,5	8		4"	19,7
P13(j)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	219x8,2	4	3/4"	2"	19,7
P14(j)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	219x9,5	4		4"	19,7
P15(j)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	219x9,5	4		2"	28,7
P16(j)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	219x9,5	4		4"	28,7
P17(j)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	219x9,5	8		2"	19,7
P18(j)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	219x9,5	8		4"	19,7

2.2 Configuração dos protótipos

Foram realizados trinta e seis ensaios experimentais de cisalhamento direto em protótipos com 500 mm de altura, utilizando duas seções de perfis tubulares circulares em aço com diâmetro (D) de 219 mm e espessuras (t) iguais a 8,2 mm e 9,5 mm. A variação da espessura do perfil tubular ocorreu em função da disponibilidade de material para a fabricação dos protótipos, sendo a diferença entre as espessuras de 1,3 mm, o que não torna essa uma variável significativa para as análises.

Foram analisadas a interferência da quantidade de parafusos instalados (4 ou 8, utilizando-se uma ou duas linhas de parafusos); do diâmetro dos parafusos, d_b , adotando-se 1/2" (12,7 mm), 5/8" (16 mm), e 3/4" (19 mm); do comprimento dos parafusos, l_b , usando-se comprimentos de 2" (50,8 mm) e 4" (101,6 mm); e o valor de f_{ck} do concreto de 20 MPa e 30 MPa.

Para cada tipologia de protótipo foram fabricadas duas peças idênticas, diferenciadas na nomenclatura por (1) e (2). Sendo assim, em função da repetição dos pares de protótipos de mesma tipologia, foram analisadas dezoito configurações diferentes de protótipos de PMPC com conectores tipo parafuso.

Na Tabela 1 estão apresentadas a nomenclatura e as características geométricas e mecânicas dos protótipos identificados como série P. A Tabela 1 apresenta a nomenclatura das dezoito configurações de protótipos, onde "j" tem valor 1 ou 2 para diferenciar os protótipos

com tipologias idênticas. Observa-se que os valores da resistência média à compressão (f_{cm}) são iguais para todos os protótipos que estão dentro de uma mesma classe de concreto, C20 ou C30. Isso porque na determinação da resistência à compressão do concreto, aos 28 dias de idade, os corpos de prova atingiram f_{cm} de 19,7 MPa e 28,7 MPa. Esses valores de f_{cm} foram utilizados na Equação (1) para a verificação do modo de falha do esmagamento do concreto. Nos protótipos com uma linha de conectores os 4 parafusos foram posicionados a meia altura do perfil tubular de aço e dispostos simetricamente, conforme ilustrado na Figura 6. Nos protótipos com duas linhas de conectores, 8 parafusos, foi respeitada a distância mínima entre a linha de eixos dos parafusos igual a seis vezes o diâmetro do parafuso, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 16239:2013. Nesses protótipos os parafusos também foram dispostos simetricamente a partir da meia altura do tubo, de acordo com os diâmetros dos conectores de 1/2" (Figura 7-a); 5/8" (Figura 7-b); e 3/4" (Figura 7-c).

2.3 Concretagem

A concretagem dos protótipos foi realizada de acordo com as recomendações descritas na técnica experimental considerando dois valores de f_{cm} do concreto (19,7 MPa e 28,7 MPa), sendo utilizado concreto usinado. Antes das concretagens, os perfis tubulares foram limpos e lubrificadas internamente com uma camada de graxa.

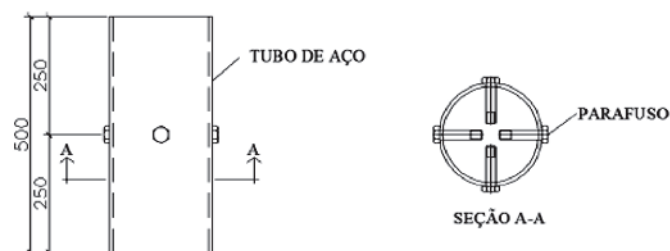


Figura 6
Representação dos protótipos com quatro parafusos

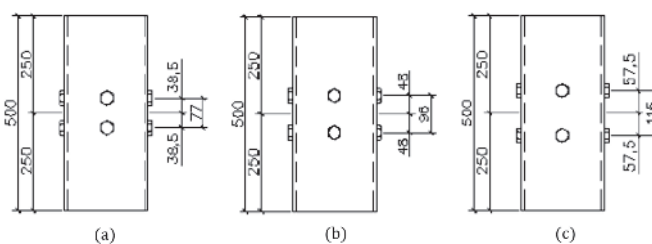


Figura 7
Representação dos protótipos com oito parafusos, com parafusos de diâmetro de (a) 1/2"; (b) 5/8"; e (c) 3/4"

Tabela 2

Propriedades mecânicas dos aços dos tubos

D x t do tubo (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Alongamento (ΔL) (%)
219 x 8,2	385	582	33
219 x 9,5	398	570	40

Tabela 3

Propriedades mecânicas dos aços dos parafusos

d_b do parafuso (pol.)	f_{ub} (MPa)
1/2"	660
5/8"	650
3/4"	665

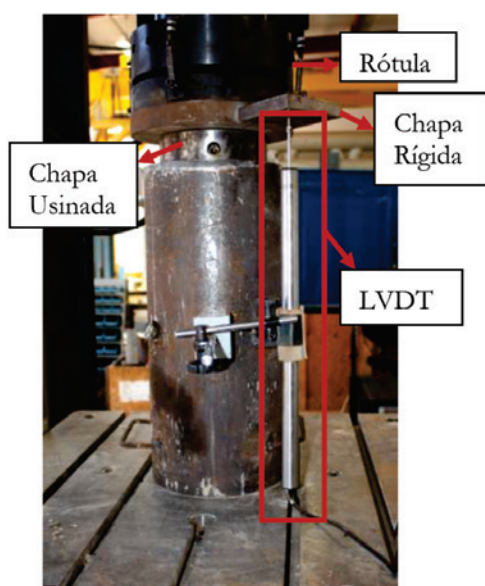
2.4 Caracterização do aço

Os perfis tubulares estruturais são laminados de aço ASTM A 501 grau B [6] com valores nominais iguais a $f_y \geq 350$ MPa e $f_u \geq 485$ MPa, os resultados experimentais da caracterização mecânica são apresentados na Tabela 2.

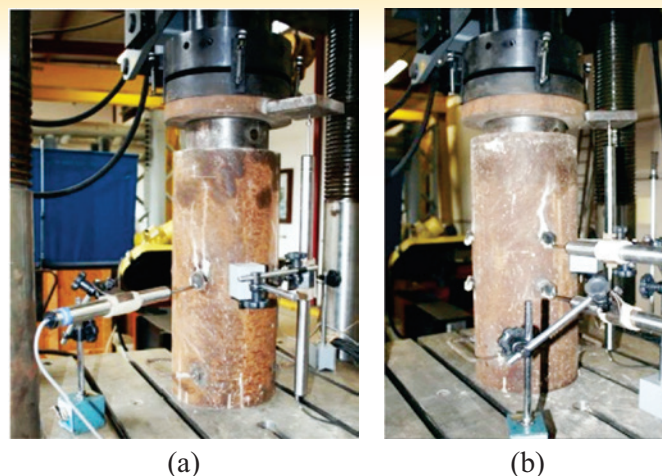
Os parafusos utilizados são em aço SAE J429 ($f_{ub} \geq 414$ MPa, norma dimensional ASME B18.2.1), equivalente ao aço ASTM A307. Os resultados dos ensaios de caracterização mecânica dos parafusos são apresentados na Tabela 3.

2.5 Instrumentação

Todos os protótipos foram instrumentados com um transdutor linear de deslocamento (LVDT) posicionado na extremidade do pilar, visando a medição do deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto. Para possibilitar a medição do deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, a haste do LVDT foi posicionada em uma chapa rígida, estando essa chapa rígida situada entre a chapa usinada de transmissão dos esforços para o núcleo de concreto e a rótula de aplicação de carga, conforme apresentado na Figura 8.

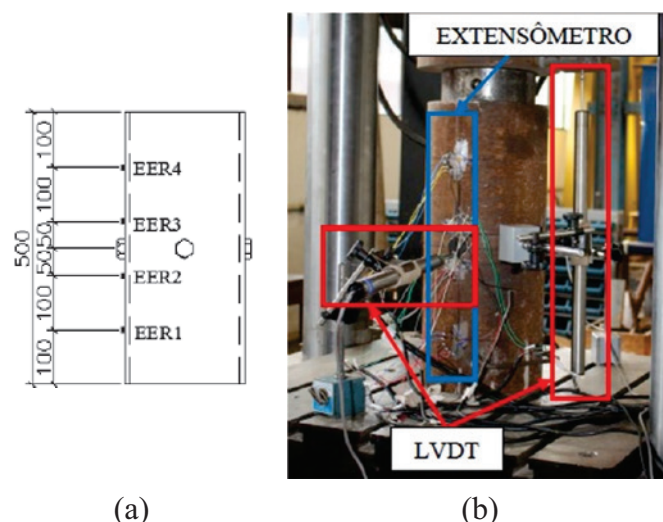
**Figura 8**

Representação do LVDT fixado para medição do deslocamento relativo durante a realização dos ensaios

**Figura 9**

Representação dos LVDT's perpendiculares a cabeça dos parafusos para os protótipos: (a) com 4 parafusos; e (b) com 8 parafusos

Durante a realização do primeiro ensaio foi observada a rotação dos parafusos na face externa do perfil tubular. A fim de verificar o início da rotação e sua possível interferência no comportamento ou na resistência dos parafusos, foram posicionados mais dois LVDT's perpendiculares a cabeça dos parafusos. Nos protótipos com quatro parafusos, os LVDT's foram posicionados simetricamente, conforme ilustrado na Figura 9-a. Para os protótipos com oito parafusos, os LVDT's foram posicionados do mesmo lado (ver Figura 9-b). Para medir a deformação específica na parede dos perfis tubulares durante a realização dos ensaios foram utilizados extensômetros de resistência elétrica (EER) tipo roseta biaxial de 90°, modelo KFG-2-D16-11 da marca KYOWA. A extensometria e a posição das rosetas nos protótipos foi a mesma para todas as peças instrumentadas, conforme representado na Figura 10-a. Foram instrumentados quatro protótipos com extensômetros, sendo esses os protótipos P1(2), P2(2), P13(2) e P14(2). Na Figura 10-b é ilustrada a posição dos extensômetros no tubo de aço e a instrumentação geral dos protótipos.

**Figura 10**

Representação dos protótipos instrumentados com extensômetros: (a) posicionamento das rosetas nos protótipos; (b) esquema geral da instrumentação dos protótipos

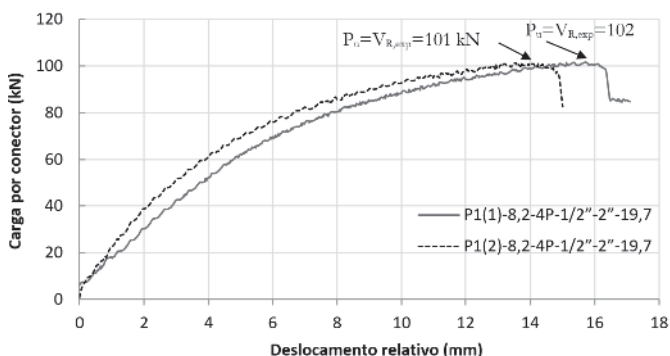


Figura 11
Curva de carga por conector versus deslocamento relativo para os protótipos P1(1) e P1(2)

2.6 Procedimento experimental

Para a realização dos ensaios foi utilizada prensa servo-hidráulica com capacidade de 2.000 kN e precisão de +/- 0,5% de carga. O procedimento de ensaio adotado para os protótipos é descrito na técnica experimental.

Os valores do carregamento e dos deslocamentos relativos entre o núcleo de concreto e o perfil tubular de aço, foram medidos pelo sistema de aquisição de dados da prensa de ensaio, (*software* Partner 8.4a). Os valores dos deslocamentos medidos pelos LVDT's posicionados nos parafusos, e das deformações medidas pelos extensômetros, foram medidos pelo sistema de aquisição de dados Spider 8, controlado pelo *software* Catman 4.5 da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003).

3. Resultados e discussões

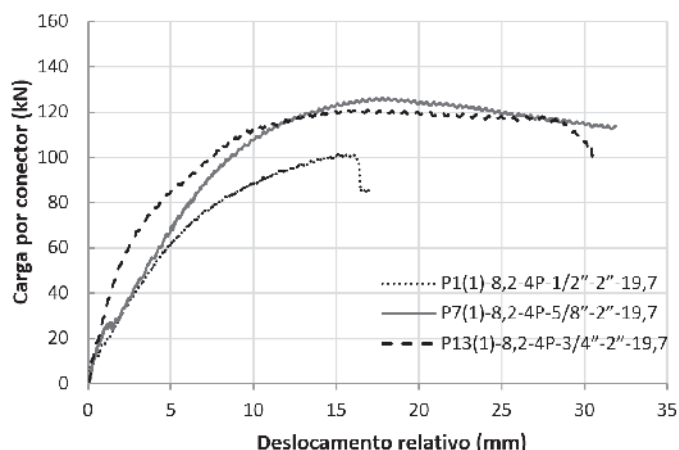
Devido a problemas ocorridos durante a execução do ensaio do

protótipo P5(2), os resultados dessa análise foram descartados. Comparando os resultados de dois protótipos de modelos idênticos, diferenciados entre si na nomenclatura pelos números (1) e (2), percebeu-se que há pouca variabilidade entre as curvas de carga por conector versus deslocamento relativo. Na Figura 11 são apresentadas as curvas dos protótipos P1(1) e P1(2), para exemplificar a pouca variabilidade entre os resultados de dois modelos idênticos.

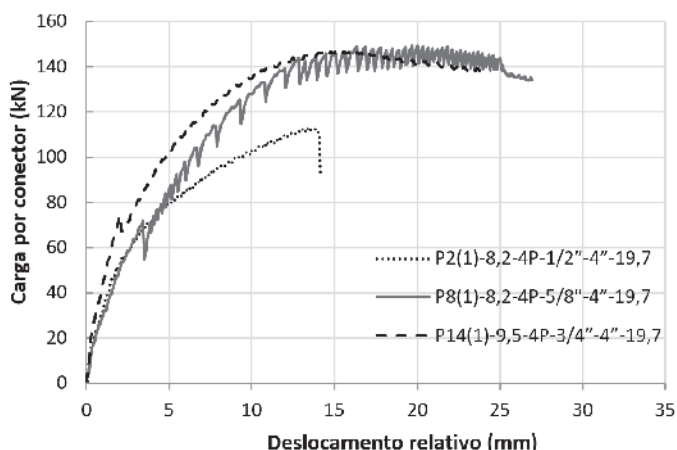
O valor da capacidade de carga por parafuso ($V_{R,exp}$) é igual a carga máxima (P_u) resistida por conector durante o ensaio. Os valores de P_u referem-se a capacidade de carga de um único parafuso, ou seja, a carga aplicada no núcleo de concreto foi dividida pela quantidade de conectores existentes no protótipo.

Na Figura 12-a são apresentadas as curvas de carga versus deslocamento relativo para três protótipos variando os diâmetros dos parafusos, de 1/2", 5/8" e 3/4". Os demais parâmetros permaneceram constantes, sendo estes o comprimento do parafuso (2" para a Figura 12-a e 4" para a Figura 12-b), número de conectores (4 parafusos) e resistência do concreto ($f_{cm} = 19,7$ MPa).

Analisando a Figura 12, observa-se que há um aumento de capacidade de carga do parafuso com a variação do seu diâmetro de 1/2" para 5/8". Este resultado está de acordo com as Equações (1) e (2), onde quanto maior o diâmetro maior será a capacidade de carga do parafuso. Entretanto, quando se aumenta de 5/8" para 3/4", praticamente não há alteração na capacidade de carga. Isto indica, possivelmente, que o modo de falha nesses protótipos é o esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso, pois segundo as Equações (1) e (2), o diâmetro do conector tem maior interferência na capacidade resistente do parafuso ao cisalhamento em comparação ao esmagamento do concreto. Observa-se uma variação brusca de carregamento para os parafusos de comprimento de 4" e diâmetros de 5/8" e 3/4" que se justifica pelo esmagamento do concreto causado pela rigidez desses parafusos. Na Figura 13 são apresentadas as curvas de carga versus deslocamento relativo em função da variação do comprimento e do



(a)



(b)

Figura 12
Curvas de carga versus deslocamento relativo – influência do diâmetro do parafuso na capacidade resistente dos protótipos: (a) P1(1), P7(1) e P13(1); (b) P2(1), P8(1) e P14(1)

diâmetro do parafuso. Na Figura 13-a tem-se a comparação da capacidade de carga para o parafuso de diâmetro de 1/2" e diferentes comprimentos, na Figura 13-b compara-se o parafuso de diâmetro de 5/8", e por fim o parafuso de diâmetro de 3/4" tem seu comportamento experimental representado na Figura 13-c. Observa-se nos três gráficos que a capacidade de carga do parafuso com comprimento de 2" é menor que a obtida com comprimento de 4". Na Tabela 4 tem-se a comparação dos valores de $V_{R,exp}$ dos protótipos ensaiados nessa pesquisa de acordo com o comprimento do parafuso.

Analisando os resultados da Tabela 4, verifica-se que a proporção do aumento da capacidade de carga é maior para os parafusos de diâmetro de 3/4", seguidos pelos de 5/8" e por fim pelos parafusos de 1/2". Os resultados apresentados na Figura 13 e na Tabela 4 indicam que nos protótipos com parafusos de diâmetros de 5/8" e 3/4" ocorre o modo de falha do esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso, pois, de acordo com a Equação (1), este é o único modo de falha associado ao comprimento do conector, no entanto não se pode afirmar que este seja o primeiro modo a ocorrer. Para os parafusos de diâmetro de 1/2", observa-se em um dos casos um aumento da capacidade de carga com o

aumento do comprimento do parafuso, enquanto que nos outros casos há uma diminuição da capacidade de carga. Pode-se afirmar, portanto, que a associação do maior comprimento, 4", com o menor diâmetro, 1/2", conduz à uma maior flexibilidade do parafuso o que reduz a eficiência do conector.

Na Figura 14 tem-se a comparação da capacidade de carga dos parafusos para os protótipos com 4 e 8 conectores para um mesmo diâmetro de parafuso. Analisando os resultados da Figura 14, verifica-se que a utilização de duas linhas de conectores (protótipos com 8 parafusos instalados) não interfere significativamente na capacidade de carga em cada conector. Esse resultado confirma que a distância mínima entre conectores determinada pela ABNT NBR 16239:2013 é segura e não provoca concentração de tensões no concreto situado entre as duas linhas de parafusos. Observa-se também que nos protótipos com 8 parafusos há uma redução dos deslocamentos relativos quando comparados com 4 parafusos. A redução observada é função do aumento da rigidez da conexão ao se adicionar mais uma linha de conectores.

Verificou-se também a interferência da resistência média do concreto, f_{cm} , na capacidade de carga do parafuso. Foram utilizados concretos com duas resistências médias, de 19,7 MPa

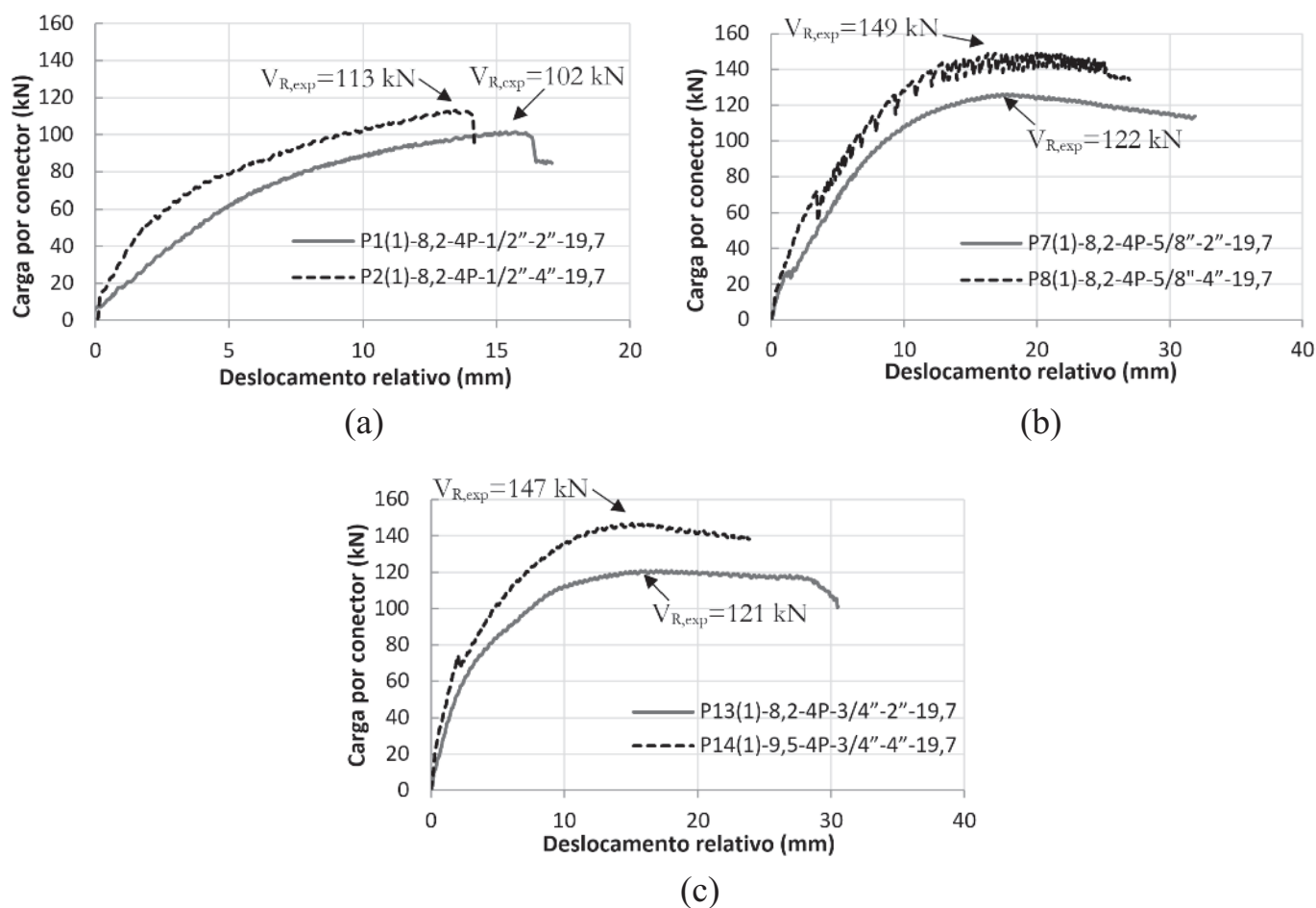


Figura 13

Curvas de carga versus deslocamento relativo – influência do comprimento dos parafusos nos protótipos: (a) P1(1) e P2(1); (b) P7(1) e P8(1); (c) P13(1) e P14(1)

Tabela 4

Comparação entre os valores de $V_{R,exp}$ para os comprimentos dos parafusos de 2" e 4", considerando diferentes diâmetros de parafusos

Comprimento do parafuso (l_b) de 2"			Comprimento do parafuso (l_b) de 4"			Comparação percentual da média de $V_{R,exp}$ (%)
Protótipo	$V_{R,exp}$ (kN)	Média $V_{R,exp}$ (kN)	Protótipo	$V_{R,exp}$ (kN)	Média $V_{R,exp}$ (kN)	
P1(1)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	102	102	P2(1)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	113	109	7,4
P1(2)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	101		P2(2)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	105		
P3(1)-8,2-4P-1/2"-2"-28,7	122	109	P4(1)-9,5-4P-1/2"-4"-28,7	107	105	-3,7
P3(2)-8,2-4P-1/2"-2"-28,7	95		P4(2)-8,2-4P-1/2"-4"-28,7	102		
P5(1)-9,5-8P-1/2"-2"-19,7	98	98	P6(1)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	94	94	-4,6
P5(2)-9,5-8P-1/2"-2"-19,7	-		P6(2)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	93		
P7(1)-8,2-4P-5/8"-2"-19,7	126	124	P8(1)-8,2-4P-5/8"-4"-19,7	149	133	7,3
P7(2)-8,2-4P-5/8"-2"-19,7	122		P8(2)-8,2-4P-5/8"-4"-19,7	117		
P9(1)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	122	117	P10(1)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	119	119	1,3
P9(2)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	112		P10(2)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	118		
P11(1)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	129	127	P12(1)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	138	137	7,9
P11(2)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	125		P12(2)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	136		
P13(1)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	121	119	P14(1)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	147	146	23,2
P13(2)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	116		P14(2)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	145		
P15(1)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	154	147	P16(1)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	154	153	3,7
P15(2)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	140		P16(2)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	151		
P17(1)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	121	129	P18(1)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	136	139	7,8
P17(2)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	136		P18(2)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	141		

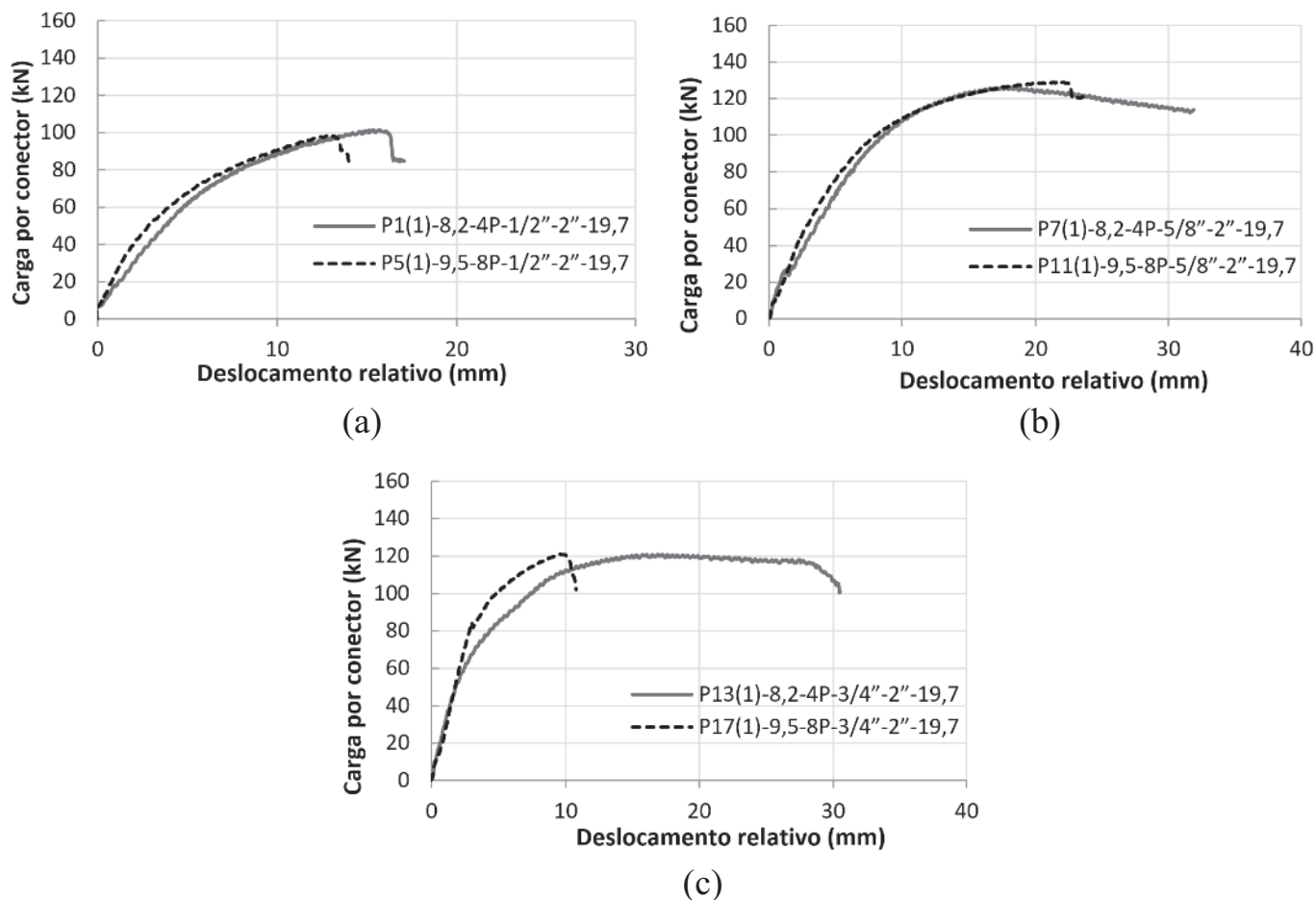


Figura 14

Curvas de carga por conector versus deslocamento relativo – influência do número de parafusos para os protótipos: (a) P1(1) e P5(1); (b) P7(1) e P11(1); (c) P13(1) e P17(1)

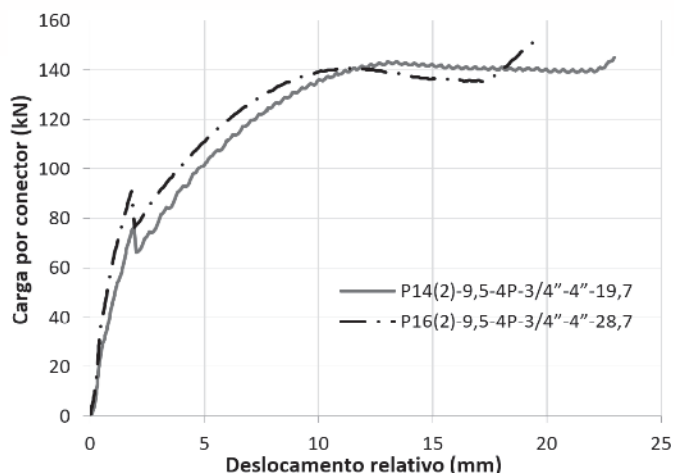


Figura 15
Curvas de carga por conector versus deslocamento relativo - influência da resistência do concreto para os protótipos P14(2) e P16(2)

e 28,7 MPa. No gráfico da Figura 15 foram sobrepostas as curvas de carga por conector versus deslocamento relativo dos protótipos P14(2) e P16(2), para diferentes valores de resistência média do concreto. A partir desse gráfico verificou-se que o carregamento por conector é semelhante, e, portanto, a variação da resistência média do concreto não interfere na capacidade de carga do parafuso. Devido a rotação dos parafusos durante o ensaio, foram colocados dois LVDT's perpendiculares a cabeça dos conectores, como ilustrado na Figura 9. A partir dos valores de deslocamentos medidos tem-se a representação gráfica dos valores da carga por conector versus deslocamento do parafuso (Figura 16-a e Figura 16-c). Comparando em um mesmo protótipo as curvas de carga por conector versus deslocamento do parafuso (Figura 16-a) com as curvas de carga por conector versus deslocamento relativo (Figura 16-b), observa-se que o comportamento das duas curvas durante a realização do ensaio é semelhante. Esse aspecto evidencia a eficácia do parafuso em transmitir os esforços do núcleo de concreto para o perfil tubular de aço. O mesmo comportamento é

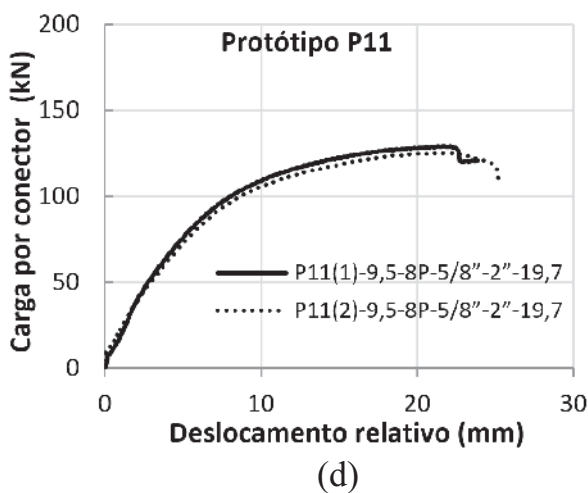
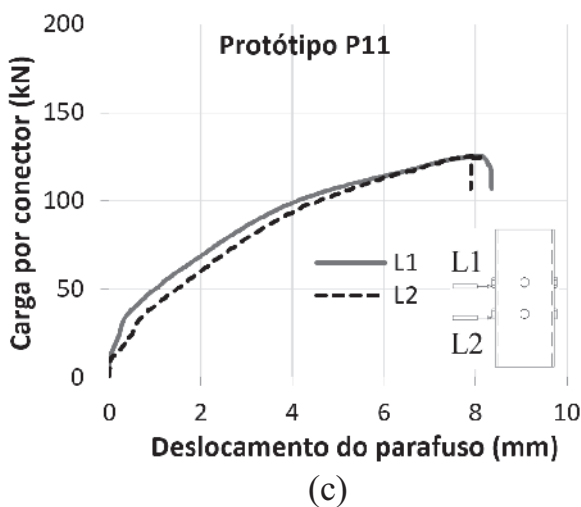
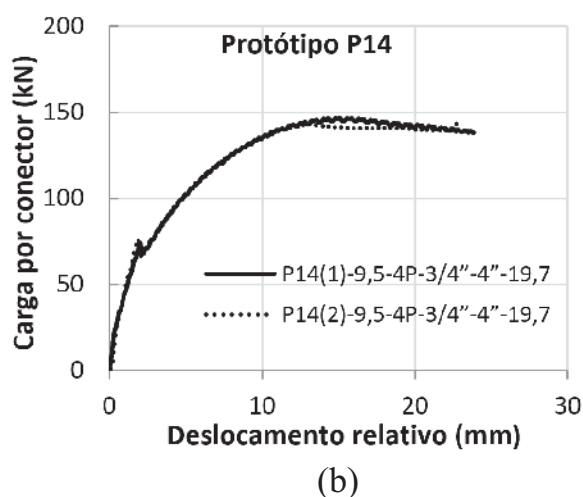
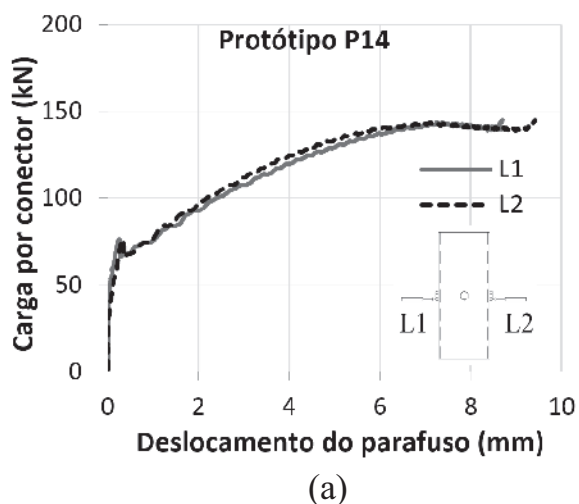


Figura 16
(a) e (c) Curvas de carga por conector versus deslocamento do parafuso;
e (b) e (d) curvas de carga por conector versus deslocamento relativo

verificado nos protótipos com 8 parafusos, como ilustra a Figura 16-c e a Figura 16-d.

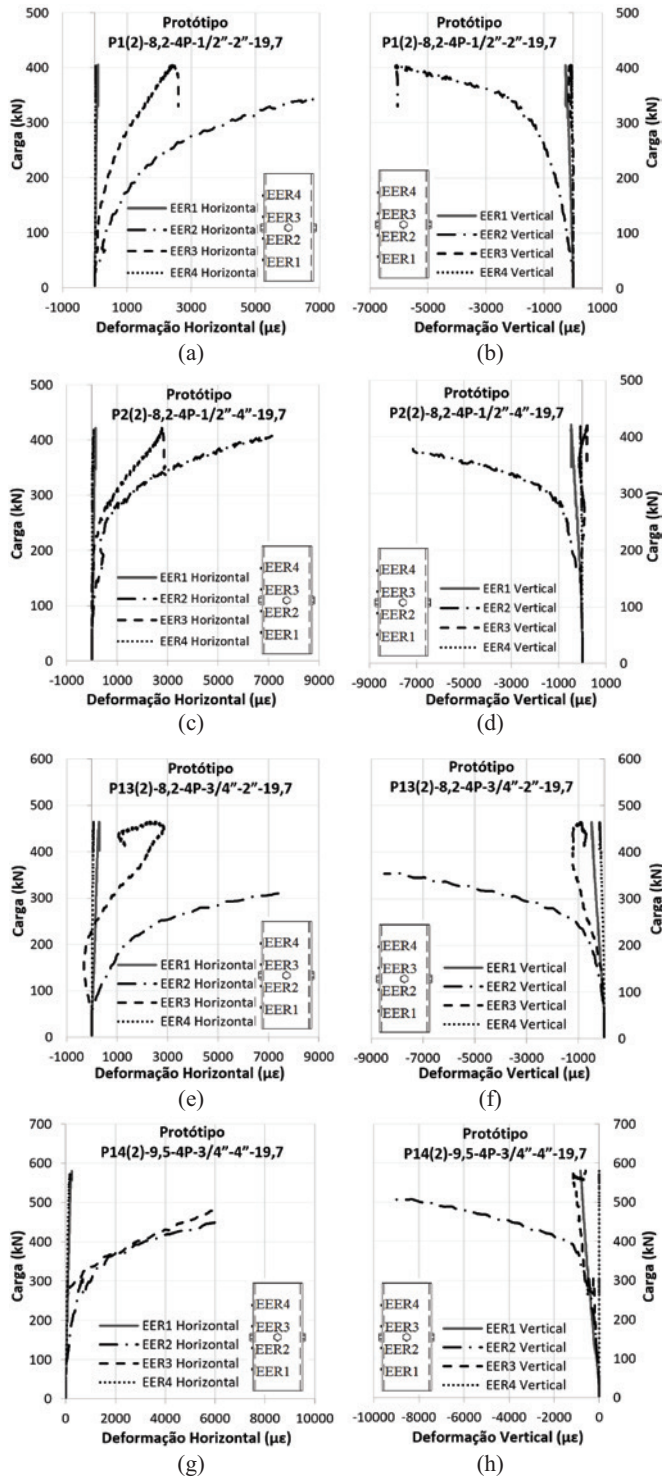


Figura 17
 (a), (c), (e) e (g) Curvas de carga versus deformação horizontal; e (b), (d), (f) e (h) curvas de carga versus deformação vertical

Comparando os gráficos da Figura 16-a e Figura 16-c observa-se que o comportamento das curvas de carga por conector versus deslocamento dos parafusos dos LVDT's L1 e L2 são iguais, indicando que esses conectores foram solicitados de forma similar durante todo o ensaio. Essa constatação evidencia a uniformidade da distribuição do carregamento no núcleo de concreto e consequentemente nos conectores, independentemente da existência de uma ou duas linhas de conectores.

Os resultados obtidos a partir dos extensômetros nos protótipos P1(2), P2(2), P13(2) e P14(2) estão apresentados da Figura 17. Analisando os gráficos dessas figuras, percebe-se que as deformações específicas verticais e horizontais são maiores nas rosetas EER2, localizadas 50 mm abaixo dos parafusos; enquanto que as menores leituras foram verificadas nos extensômetros EER1 e EER4, localizados a 150 mm acima e abaixo do parafuso. Sendo assim, pode-se concluir que a restrição causada pelo parafuso influencia diretamente na deformação da parede do perfil tubular na região próxima ao conector. Os resultados de EER2 indicam a ocorrência de escoamento do aço na região abaixo do conector para todos os protótipos instrumentados, já que as deformações específicas verticais e horizontais nessa região excedem 2000 µε, correspondente a deformação específica limite para o escoamento do tubo de aço.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados experimentais e teóricos de todos os protótipos ensaiados. A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, pode-se afirmar que o mecanismo de falha dominante, de acordo com as formulações da ABNT NBR 16239:2013, é o esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso (valores destacados na tabela). Comparando os resultados experimentais com os teóricos, observa-se que os valores experimentais apresentam variação de 3,00 a 9,99 vezes maior que os teóricos. Isso indica que as formulações analíticas propostas pela ABNT NBR 16239:2013 estão a favor da segurança e conduzem a resultados conservadores quando comparados aos resultados experimentais.

A análise experimental sugere a ocorrência de um acréscimo na capacidade resistente do parafuso, o que indica que o concreto contido no núcleo do PMPC encontra-se confinado pelas paredes do tubo de aço. O efeito desse confinamento aumenta a resistência do concreto e consequentemente, a capacidade de carga do parafuso.

A EN 1994-1-1:2004 determina a utilização da Equação (4) para o cálculo da tensão resistente do concreto confinado localmente na região de contato com o parafuso ($\sigma_{c,Rd}$) [12].

$$\sigma_{c,Rd} = f_{cd} \left(1 + \eta_{cl} \frac{t f_y}{D f_{ck}} \right) \sqrt{\frac{A_c}{A_1}} \leq \frac{A_c f_{cd}}{A_1} \leq f_{yd} \quad (4)$$

Onde: f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão; η_{cl} é o fator de confinamento, igual à 3,5 para as seções quadradas e 4,9 para as seções circulares; D é o diâmetro do tubo ou a largura da seção quadrada; A_c é a área da seção transversal do núcleo de concreto considerada para o conector; A_1 é a área do concreto carregada abaixo do fuste do parafuso, área de contato; f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço; $\frac{A_c}{A_1}$ deve ser ≤ 20 .

De acordo com [18], A_1 pode ser definido conforme apresentado na Equação (5):

$$A_1 = 0,70 \cdot l_b \cdot d_b \leq 0,70 \cdot 5 \cdot d_b \quad (5)$$

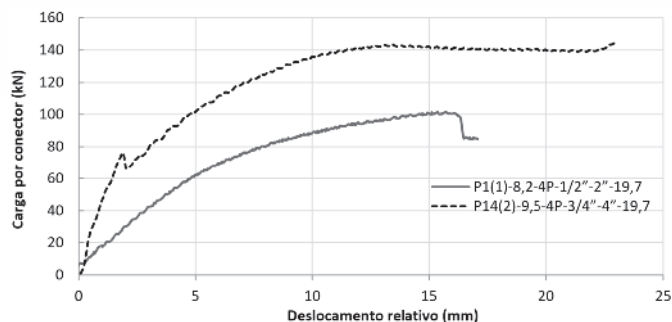


Figura 18
Curvas de carga *versus* deslocamento relativo para os protótipos P1(1) e P14(2)

A partir das recomendações da EN 1994-1-1:2004, optou-se por realizar uma análise analítica com as equações da ABNT NBR 16239:2013, porém utilizando os valores de $\sigma_{c,Rn}$ encontrados no cálculo da Equação (4).

A Tabela 6 apresenta os resultados dessa análise utilizando as Equações (1) e (2). Analisando os resultados da Tabela 6, percebe-se que quando o confinamento do concreto na região de contato com o parafuso é considerado, o valor da força resistente teórica do concreto aumenta, e, portanto, o modo de falha dominante passa a ser o cisalhamento do parafuso. Comparando os resultados experimentais com os teóricos, observa-se que os

Tabela 5
Comparação entre as resistências teóricas e experimentais dos conectores de cisalhamento

Protótipo	Esmagamento do concreto (kN)		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo (kN)	$V_{R,teo}$ (kN)	$V_{R,exp}$ (kN)	$V_{R,exp} / V_{R,teo}$
	$l_b d_b f_{cm}$	$5d_b^2 f_{cm}$	$0,4\pi \frac{d_b^2 f_{ub}}{4}$	$2,4d_b t f_u$			
P1(1)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	11	16	33	145	11	102	9,57
P1(2)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	11	16	33	145	11	101	9,48
P2(1)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	23	16	33	145	16	113	7,11
P2(2)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	23	16	33	145	16	105	6,61
P3(1)-8,2-4P-1/2"-2"-28,7	16	23	33	145	16	122	7,86
P3(2)-8,2-4P-1/2"-2"-28,7	16	23	33	145	16	95	6,12
P4(1)-9,5-4P-1/2"-4"-28,7	34	23	33	165	23	107	4,62
P4(2)-8,2-4P-1/2"-4"-28,7	34	23	33	145	23	102	4,41
P5(1)-9,5-8P-1/2"-2"-19,7	10	16	33	165	10	98	9,48
P5(2)-9,5-8P-1/2"-2"-9,7	10	16	33	165	10	-	-
P6(1)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	23	16	33	165	16	94	5,92
P6(2)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	23	16	33	165	16	93	5,85
P7(1)-8,2-4P-5/8"-2"-19,7	13	25	51	182	13	126	9,46
P7(2)-8,2-4P-5/8"-2"-19,7	13	25	51	182	13	122	9,16
P8(1)-8,2-4P-5/8"-4"-19,7	29	25	51	182	25	149	6,00
P8(2)-8,2-4P-5/8"-4"-19,7	29	25	51	182	25	117	4,71
P9(1)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	19	36	51	182	19	122	6,29
P9(2)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	19	36	51	182	19	112	5,77
P10(1)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	43	36	51	182	36	119	3,29
P10(2)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	43	36	51	182	36	118	3,26
P11(1)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	13	25	51	206	13	129	9,99
P11(2)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	13	25	51	206	13	125	9,68
P12(1)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	29	25	51	206	25	138	5,56
P12(2)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	29	25	51	206	25	136	5,48
P13(1)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	16	36	76	218	16	121	7,57
P13(2)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	16	36	76	218	16	116	7,26
P14(1)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	35	36	76	248	35	147	4,25
P14(2)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	35	36	76	248	35	145	4,20
P15(1)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	23	52	76	248	23	154	6,82
P15(2)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	23	52	76	248	23	140	6,20
P16(1)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	50	52	76	248	50	154	3,06
P16(2)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	50	52	76	248	50	151	3,00
P17(1)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	15	36	76	248	15	121	7,81
P17(2)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	15	36	76	248	15	136	8,77
P18(1)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	35	36	76	248	35	136	3,93
P18(2)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	35	36	76	248	35	141	4,08

valores experimentais apresentam variação de 1,53 a 3,65 vezes maior que os teóricos e a favor da segurança.

Quanto a verificação do concreto, comparando as Tabelas 4 e 5, pode-se afirmar que há um aumento na capacidade de carga do parafuso quando considerado o efeito do confinamento do concreto.

Na Figura 18 é apresentada a sobreposição das curvas de carga versus deslocamento relativo obtidas nos ensaios experimentais dos protótipos, P1(1) e P14(2). Observa-se que o parafuso com maior diâmetro (3/4") e maior comprimento (4") apresenta maior capacidade de carga que o parafuso de menor diâmetro (1/2") e menor comprimento (2").

Na Figura 19 tem-se o mecanismo de ruptura do concreto após os ensaios, na região entre conectores e sob um parafuso. Na Figura 19-a tem-se uma pequena fissura no núcleo de concreto entre os conectores no ensaio P1(1). Observando a configuração da deformada do conector na Figura 19-b, verifica-se que o parafuso de 1/2" apresenta uma grande deformação, porém o concreto ao redor do conector não apresenta ruptura. Já para o protótipo P14(2), ver Figura 19-c, observa-se a ruptura do concreto na região entre parafusos. Quanto a deformação do conector de 3/4" (Figura 19-d), destaca-se que houve uma rotação do parafuso e amassamento da parede do

Tabela 6

Comparação entre as resistências teóricas e experimentais dos conectores de cisalhamento, considerando o confinamento do concreto de acordo com [11]

Protótipo	Esmagamento do concreto confinado (kN) [11]		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo (kN)	V _{R,teo} (kN)	V _{R,exp} (kN)	V _{R,exp} / V _{R,teo}
	I _b d _b σ _{c,Rn}	5d _b ² σ _{c,Rn}	0,4π $\frac{d_b^2 f_{ub}}{4}$	2.4d _b t f _u			
P1(1)-8.2-4P-1/2"-2"-19.7	238	355	33	145	33	102	3.05
P1(2)-8.2-4P-1/2"-2"-19.7	238	355	33	145	33	101	3.02
P2(1)-8.2-4P-1/2"-4"-19.7	192	286	33	145	33	113	3.38
P2(2)-8.2-4P-1/2"-4"-19.7	192	286	33	145	33	105	3.14
P3(1)-8.2-4P-1/2"-2"-28.7	262	391	33	145	33	122	3.65
P3(2)-8.2-4P-1/2"-2"-28.7	262	391	33	145	33	95	2.84
P4(1)-9.5-4P-1/2"-4"-28.7	239	357	33	165	33	107	3.20
P4(2)-8.2-4P-1/2"-4"-28.7	211	315	33	145	33	102	3.05
P5(1)-9.5-8P-1/2"-2"-19.7	193	288	33	165	33	98	2.93
P5(2)-9.5-8P-1/2"-2"-19.7	193	288	33	165	33	-	-
P6(1)-9.5-8P-1/2"-4"-19.7	156	232	33	165	33	94	2.81
P6(2)-9.5-8P-1/2"-4"-19.7	156	232	33	165	33	93	2.78
P7(1)-8.2-4P-5/8"-2"-19.7	213	318	51	182	51	126	2.45
P7(2)-8.2-4P-5/8"-2"-19.7	213	318	51	182	51	122	2.37
P8(1)-8.2-4P-5/8"-4"-19.7	154	229	51	182	51	149	2.90
P8(2)-8.2-4P-5/8"-4"-19.7	154	229	51	182	51	117	2.27
P9(1)-8.2-4P-5/8"-2"-28.7	234	349	51	182	51	122	2.37
P9(2)-8.2-4P-5/8"-2"-28.7	234	349	51	182	51	112	2.18
P10(1)-8.2-4P-5/8"-4"-28.7	169	252	51	182	51	119	2.31
P10(2)-8.2-4P-5/8"-4"-28.7	169	252	51	182	51	118	2.29
P11(1)-9.5-8P-5/8"-2"-19.7	173	258	51	206	51	129	2.51
P11(2)-9.5-8P-5/8"-2"-19.7	173	258	51	206	51	125	2.43
P12(1)-9.5-8P-5/8"-4"-19.7	125	186	51	206	51	138	2.68
P12(2)-9.5-8P-5/8"-4"-19.7	125	186	51	206	51	136	2.64
P13(1)-8.2-4P-3/4"-2"-19.7	195	290	76	218	76	121	1.60
P13(2)-8.2-4P-3/4"-2"-19.7	195	290	76	218	76	116	1.53
P14(1)-9.5-4P-3/4"-4"-19.7	147	219	76	248	76	147	1.94
P14(2)-9.5-4P-3/4"-4"-19.7	147	219	76	248	76	145	1.91
P15(1)-9.5-4P-3/4"-2"-28.7	242	361	76	248	76	154	2.03
P15(2)-9.5-4P-3/4"-2"-28.7	242	361	76	248	76	140	1.85
P16(1)-9.5-4P-3/4"-4"-28.7	160	238	76	248	76	154	2.03
P16(2)-9.5-4P-3/4"-4"-28.7	160	238	76	248	76	151	1.99
P17(1)-9.5-8P-3/4"-2"-19.7	158	235	76	248	76	121	1.60
P17(2)-9.5-8P-3/4"-2"-19.7	158	235	76	248	76	136	1.79
P18(1)-9.5-8P-3/4"-4"-19.7	104	155	76	248	76	136	1.79
P18(2)-9.5-8P-3/4"-4"-19.7	104	155	76	248	76	141	1.86

tubo. Analisando a Figura 19 pode-se dizer que o parafuso de diâmetro de 1/2" e comprimento de 2" (protótipo P1(1)) tem comportamento flexível, enquanto o parafuso de diâmetro de 3/4" e comprimento de 4" (protótipo P14(2)) tem comportamento rígido. Observa-se também que no protótipo P14(2) ocorreram os modos de falha de cisalhamento do parafuso, esmagamento do concreto na região de contato abaixo do parafuso e o escoamento do tubo de aço.

Visando o entendimento do mecanismo de falha dominante, associado aos resultados obtidos pelas equações da ABNT NBR 16239:2013, uma nova análise foi realizada utilizando essas formulações analíticas. Observou-se que o fator de 0,4, que multiplica os componentes da Equação (2), para verificação do modo de falha por cisalhamento do parafuso, deve ser igual a 0,5 conforme previsto na ABNT NBR 8800 para cisalhamento do parafuso na região do fuste. Visto isso, op-

tu-se por se realizar uma nova análise considerando o efeito do confinamento do concreto e verificando o modo de falha do cisalhamento do parafuso. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados dessa nova análise. Observa-se que o modo de falha dominante continua sendo o cisalhamento do parafuso, porém os resultados experimentais apresentam variação de 1,22 a 2,92 em relação aos resultados teóricos. Analisando a Figura 19-a e b (protótipo P1(1)) verifica-se a deformação do parafuso após o ensaio, sendo assim, o cisalhamento do parafuso é o modo de falha mais provável de ocorrer nessa situação, conforme indicado na Tabela 7. Percebe-se que o modo de falha apresentado na Tabela 7 para o protótipo P14(2) também é o cisalhamento do parafuso. Na Figura 19-d observa-se três modos de falha: cisalhamento do parafuso, esmagamento do concreto e escoamento do tubo de aço em contato com o parafuso; porém é impossível

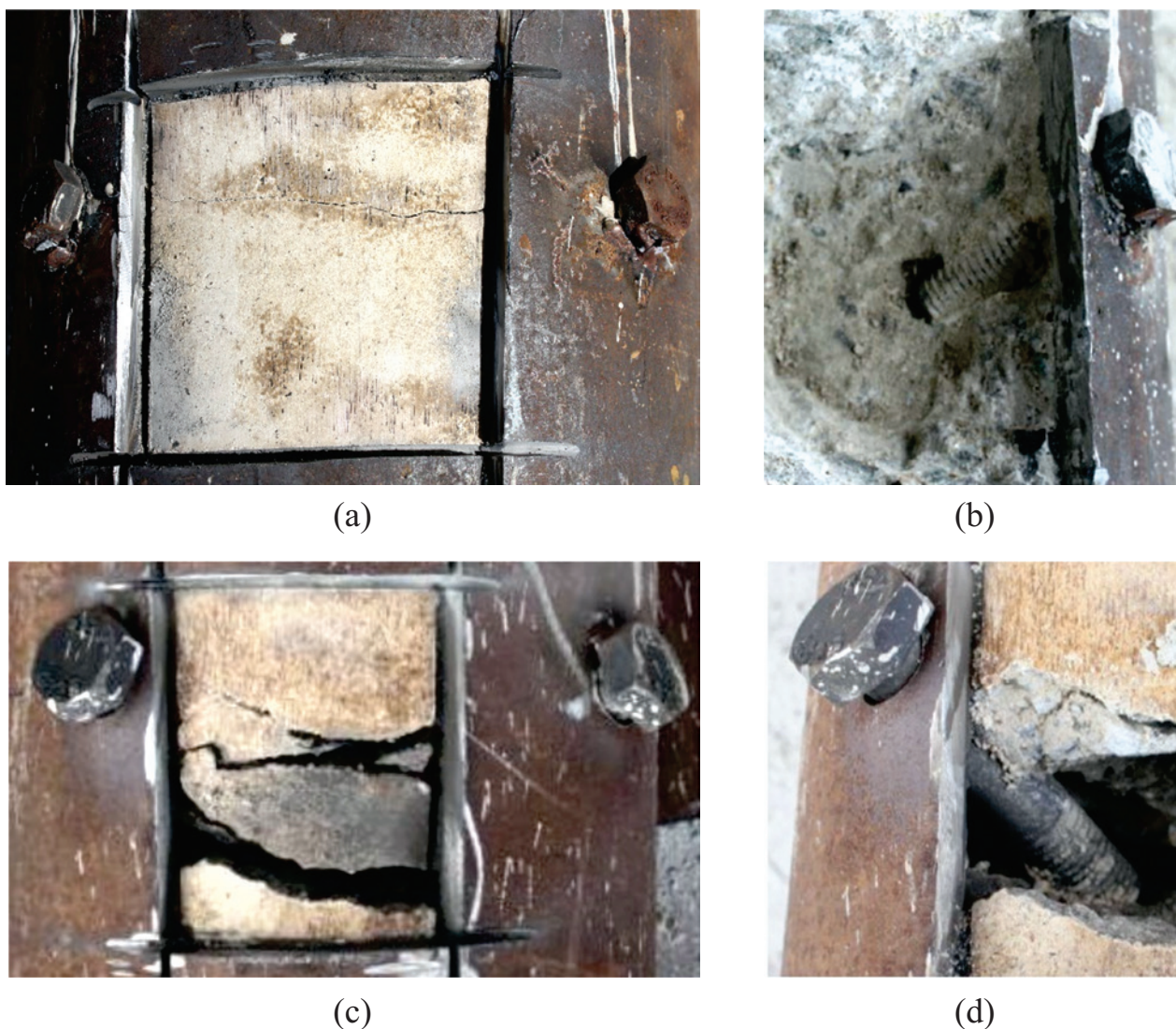


Figura 19

Abertura da parede do perfil tubular após o ensaio para os protótipos (a) P1(1)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7 e (c) P14(2)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7; e configuração final do parafuso para os protótipos (b) P1(1)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7 e (d) P14(2)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7

determinar após o ensaio qual deles ocorreu primeiro. A partir dos resultados da Tabela 7, pode-se presumir que ocorreu inicialmente o cisalhamento do parafuso, e, devido a rigidez dos parafusos de maior diâmetro e comprimento, conseqüentemente o esmagamento do concreto e escoamento do tubo de aço.

4. Conclusões

Com relação à análise paramétrica dos protótipos de PMPC com conectores tipo parafuso, conclui-se que:

- A capacidade de carga do parafuso é maior quando se aumenta o diâmetro do conector de 1/2" para 5/8", porém ao aumentar o diâmetro de 5/8" para 3/4" a capacidade de carga final do conector não altera significativamente;
- Há um aumento na capacidade de carga do parafuso para o maior comprimento de conector. Esse acréscimo é verificado principalmente nos protótipos de PMPC com conectores de diâmetros maiores (5/8" e 3/4"), pois nesse caso os parafusos são menos flexíveis;
- A utilização de uma ou duas linhas de conectores não interfere

Tabela 7

Comparação entre as resistências teóricas e experimentais dos conectores de cisalhamento, sem considerar o fator de minoração na equação do cisalhamento do parafuso

Protótipo	Esmagamento do concreto confinado (kN) [11]		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo (kN)	V _{R,teo} (kN)	V _{R,exp} (kN)	V _{R,exp} / V _{R,teo}
	$I_b d_b \sigma_{c,Rn}$	$5d_b^2 \sigma_{c,Rn}$	$0,5\pi \frac{d_b^2 f_{ub}}{4}$	$2.4d_b f_f$			
P1(1)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	238	355	42	145	42	102	2,44
P1(2)-8,2-4P-1/2"-2"-19,7	238	355	42	145	42	101	2,42
P2(1)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	192	286	42	145	42	113	2,70
P2(2)-8,2-4P-1/2"-4"-19,7	192	286	42	145	42	105	2,51
P3(1)-8,2-4P-1/2"-2"-28,7	262	391	42	145	42	122	2,92
P3(2)-8,2-4P-1/2"-2"-28,7	262	391	42	145	42	95	2,27
P4(1)-9,5-4P-1/2"-4"-28,7	239	357	42	165	42	107	2,56
P4(2)-8,2-4P-1/2"-4"-28,7	211	315	42	145	42	102	2,44
P5(1)-9,5-8P-1/2"-2"-19,7	193	288	42	165	42	98	2,34
P5(2)-9,5-8P-1/2"-2"-19,7	193	288	42	165	42	-	-
P6(1)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	156	232	42	165	42	94	2,25
P6(2)-9,5-8P-1/2"-4"-19,7	156	232	42	165	42	93	2,22
P7(1)-8,2-4P-5/8"-2"-19,7	213	318	64	182	64	126	1,96
P7(2)-8,2-4P-5/8"-2"-19,7	213	318	64	182	64	122	1,90
P8(1)-8,2-4P-5/8"-4"-19,7	154	229	64	182	64	149	2,32
P8(2)-8,2-4P-5/8"-4"-19,7	154	229	64	182	64	117	1,82
P9(1)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	234	349	64	182	64	122	1,90
P9(2)-8,2-4P-5/8"-2"-28,7	234	349	64	182	64	112	1,74
P10(1)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	169	252	64	182	64	119	1,85
P10(2)-8,2-4P-5/8"-4"-28,7	169	252	64	182	64	118	1,83
P11(1)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	173	258	64	206	64	129	2,01
P11(2)-9,5-8P-5/8"-2"-19,7	173	258	64	206	64	125	1,94
P12(1)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	125	186	64	206	64	138	2,15
P12(2)-9,5-8P-5/8"-4"-19,7	125	186	64	206	64	136	2,11
P13(1)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	195	290	95	218	95	121	1,28
P13(2)-8,2-4P-3/4"-2"-19,7	195	290	95	218	95	116	1,22
P14(1)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	147	219	95	248	95	147	1,55
P14(2)-9,5-4P-3/4"-4"-19,7	147	219	95	248	95	145	1,53
P15(1)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	242	361	95	248	95	154	1,62
P15(2)-9,5-4P-3/4"-2"-28,7	242	361	95	248	95	140	1,48
P16(1)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	160	238	95	248	95	154	1,62
P16(2)-9,5-4P-3/4"-4"-28,7	160	238	95	248	95	151	1,59
P17(1)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	158	235	95	248	95	121	1,28
P17(2)-9,5-8P-3/4"-2"-19,7	158	235	95	248	95	136	1,44
P18(1)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	104	155	95	248	95	136	1,44
P18(2)-9,5-8P-3/4"-4"-19,7	104	155	95	248	95	141	1,49

na capacidade de carga por parafuso, desde que se utilizem as distâncias mínimas entre conectores estabelecida pela ABNT NBR 16239:2013. Verificou-se também um aumento na rigidez da conexão ao se adicionar mais uma linha de conectores;

- O aumento da resistência média do concreto, de 19,7 MPa para 28,7 MPa, não interfere significativamente na capacidade de carga do parafuso.

A partir dos resultados das instrumentações com os LVDT's, utilizados para a verificação da rotação dos parafusos, constatou-se que o deslocamento do conector aumenta com o acréscimo de carga durante o ensaio, evidenciando a eficiência do parafuso em transmitir os esforços do núcleo de concreto para o perfil tubular de aço. A eficácia do parafuso em transferir a carga do concreto para o aço também foi verificada na medição das deformações específicas dos extensômetros. A partir dos resultados percebeu-se que as maiores deformações estão localizadas abaixo do conector verificada pelo escoamento do aço nessa região.

Quanto a capacidade de carga dos conectores, observou-se que o modo de falha dominante foi o esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso. Verificou-se também que os resultados obtidos experimentalmente apresentam capacidade de carga muito acima dos resultados obtidos utilizando-se as formulações teóricas da ABNT NBR 16239:2013.

A ABNT NBR 16239:2013 não considera o efeito do confinamento do concreto, $\sigma_{c,Rn}$, em suas formulações. Assim, foram realizadas novas análises utilizando o valor de $\sigma_{c,Rn}$ calculado de acordo com as determinações da EN 1994-1-1:2004. A consideração do confinamento nas formulações da ABNT NBR 16239:2013 aumenta a capacidade de carga teórica do conector, e o modo de falha passa a ser o cisalhamento do parafuso.

Visando uma adequação da equação de cisalhamento do parafuso uma nova análise foi realizada utilizando as formulações analíticas da ABNT NBR 16239:2013, porém considerando o fator de 0,5 na equação do modo de falha por cisalhamento do parafuso. Essa análise conduziu a valores teóricos mais próximos dos resultados experimentais e mecanismos de falha de cisalhamento do parafuso. Porém, após os ensaios experimentais verificou-se que para os conectores de maior diâmetro e comprimento, ocorre também os modos de falha de esmagamento do concreto abaixo do conector e escoamento do tubo de aço. A partir dessa avaliação visual presume-se que tenha ocorrido inicialmente o cisalhamento do parafuso, e, devido a rigidez desses parafusos, conseqüentemente ocorre o esmagamento do concreto e escoamento do tubo de aço.

Deve-se destacar que a eficiência do confinamento está associada a região abaixo do fuste do parafuso e até a ruptura do concreto, que pode ser observada até deslocamentos experimentais da ordem de 10 mm.

Considerando que a função do parafuso no PMPC é ter capacidade de transmitir os esforços cisalhantes na interface aço-concreto, pode-se dizer que o conector de maior comprimento e diâmetro é o mais resistente. Porém, o excesso de rigidez desse conector conduz ao modo de falha do esmagamento do concreto abaixo do parafuso, o que interfere na transmissão de cargas entre o aço e o concreto, e, conseqüentemente, o comportamento misto da estrutura. A ductilidade do parafuso é um comportamento desejável para um conector de cisalhamento em um PMPC, já que os conectores dúcteis se deformam o suficiente para permitir a redistribuição de esforços entre os materiais.

5. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem aos órgãos de fomento CNPq, CAPES, FAPEMIG e a empresa Vallourec.

6. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares. - NBR 16239, Rio de Janeiro, 2013.
- [2] CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO - CBCA. Manual de Construção em Aço: Estruturas Mistas – Vol. 1. 2ed. Rio de Janeiro, 2012. 68 p. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-manuais.php>> Acesso em: 15 fev. 2016.
- [3] LAI, Z.; VARMA, A. H.; ZHANG, K. Non compact and slender rectangular CFT members: Experimental database, analysis, and design. *Journal of Constructional Steel Research*. West Lafayette, IN, United States, n. 101, 2014; p. 455-468.
- [4] GIAKOU MELIS, G.; LAM, D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*. London, UK, n. 60, 2004; p. 1049-1068.
- [5] OLIVEIRA, W. L. A. Análise Teórico-Experimental de Pilares Mistos Preenchidos de Seção Circular, São Carlos, 2008, Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, 250 p.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. - NBR 8800, Rio de Janeiro, 2008.
- [7] JOHANSSON, M.; AKESSON, M. Finite element study of concrete-filled steel tube using a new confinement-sensitive concrete compression model. *Nordic Concrete Research*. V. 2, n. 27, 2002, p. 43-62.
- [8] SILVA, R. D. Estudo da Aderência Aço-concreto em Pilares Mistos Preenchidos, São Carlos, 2006, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, 154 p.
- [9] BIANCHI, F. R.; COELHO, L. H. Análise do Comportamento dos Pilares Mistos Considerando a Utilização de Conectores de Cisalhamento. *In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, São Paulo, 2004.
- [10] AGUIAR, O. P. Estudo do Comportamento de Conectores Crest-bond em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto, Belo Horizonte, 2015, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 129 p.
- [11] ARAÚJO, A. H. M.; SARMANHO, A. M.; BATISTA, E. M.; REQUENA, J. A. V.; FAKURY, R. H.; PIMENTA, R. J. Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço, Belo Horizonte: Ed. do Autor, 1ed, 2016, 598 p.
- [12] EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- [13] CARDOSO, H. S. Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga

- em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto, Belo Horizonte, 2014, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 205 p.
- [14] STAROSSEK, U.; FALAH, N.; LÖHNING, T. Numerical Analyses of the in Concrete-Filled Steel Tube Columns. *In: International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'08)*, 4^o, Jeju, Korea, 2008, p. 2651-2666.
- [15] STAROSSEK, U.; FALAH, N. The interaction of steel tube and concrete core in concrete-filled steel tube columns. *In: International Symposium on Tubular Structures*, 12^o, Shanghai, China, 2009, p.75-84.
- [16] ALMEIDA, P. H. F. Estudo Numérico de um Dispositivo de Transferência de Cargas em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto, Belo Horizonte, 2012, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 151 p.
- [17] NETO, J. G. R. Análise Teórico-Experimental do Uso de Parafuso Estrutural como Conector de Cisalhamento em Pilar Misto Composto de Perfil Tubular Preenchido com Concreto, Ouro Preto, 2016, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 146 p.
- [18] SANTOS, L. R. Análise Numérica de Conectores Parafusos em Pilares Mistos Circulares Preenchidos com Concreto, Belo Horizonte, 2017, Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 149 p.
- [19] NETO, J. G. R.; SARMANHO, A. M. Experimental analysis of a mechanical shear connector in concrete filled steel tube column. *Ibracon Structures and Materials Journal*. V. 10, n. 3, 2017, p. 592-625.