

Experimental analysis of a mechanical shear connector in concrete filled steel tube column

Análise experimental de um conector mecânico de cisalhamento em pilar misto de aço e concreto

J. G. R. NETO ^a
julianogeraldo.eng@gmail.com

A. M. SARMANHO ^b
arlene.sarmanho@gmail.com

Abstract

This work includes an analytical and experimental study of the structural behavior of shear connectors in composite columns, composed of concrete-filled circular hollow section. For this study was adopted a structural bolt like a shear connector in order to verify the validity of the analytical expressions in ABNT NBR 16239: 2014 [1]. Was carried out a series of push-out tests, fixing the outer diameter of the hollow section and varying the thickness, the bolt diameter, the strength of concrete and the hole dimension. Analysis of the results shows that is possible to use this type of shear connector. The Brazilian prescriptions results are conservative and may be adjusted to provide strength capacity value closest to the experiment.

Keywords: concrete filled steel tube, circular hollow section, push-out test.

Resumo

Este trabalho compreende um estudo analítico e experimental do comportamento estrutural de conectores de cisalhamento em pilares mistos, formados por perfis tubulares laminados de seção circular de aço preenchido por concreto simples. Para este estudo foi adotado um conector do tipo parafuso estrutural, a fim de verificar a validade das expressões analíticas constantes na ABNT NBR 16239:2014 [1]. Foi realizada uma série de ensaios experimentais de cisalhamento direto, fixando o diâmetro externo do tubo e variando a espessura, o diâmetro do parafuso, a resistência do concreto e a presença ou não de folga no furo. Da análise dos resultados observa-se que é viável a utilização desse tipo de conector, que as equações existentes para o dimensionamento dos mesmos estão a favor da segurança e podem ser ajustadas para fornecer valores de capacidade resistente mais próximo do experimental.

Palavras-chave: pilar misto preenchido, seção tubular circular, ensaio de cisalhamento direto.

^a Pontifical Catholic University of Goiás, School of Civil Engineering, Goiânia, GO, Brasil;

^b Federal University of Ouro Preto, Departament of Civil Engineering, Ouro Preto, MG, Brasil.

1. Introdução

Observa-se atualmente um crescente aumento no uso de estruturas mistas de aço e concreto, visando aproveitar os benefícios da combinação dos dois materiais. Esta associação pode ser observada no uso de lajes mistas com forma de aço incorporada, vigas e pilares mistos, onde procura-se fazer com que o concreto resista às tensões de compressão e o aço trabalhe à tração.

Dentre as vantagens do uso de pilares mistos, pode-se destacar: redução do tempo de construção, redução das seções com consequente diminuição do peso próprio da estrutura e aumento da área útil dos pavimentos, possibilidade de dimensionamento da seção para resistir às condições de incêndio, maior ductibilidade e resistência sísmica.

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008 [2], dos tipos usuais de pilares mistos pode-se citar: perfil I de aço totalmente revestido por concreto (Figura 1a), perfil I de aço parcialmente envolvido por concreto (Figura 1b) e tubo de aço com seção retangular ou circular preenchido por concreto (Figuras 1c e 1d).

Os pilares mistos formados por tubos de aço preenchidos com concreto possuem vantagens em relação aos elementos simples, principalmente em função do incremento das propriedades estruturais devido à interação entre o perfil tubular e o núcleo de concreto. Além disso, o confinamento presente principalmente nas seções circulares aumenta a resistência do concreto em função

do estado triaxial de tensões, e o concreto dificulta a ocorrência de flambagem local no tubo de aço.

O método simplificado de dimensionamento de pilares mistos apresentado pela norma brasileira [2] estabelece as seguintes hipóteses básicas para sua validade: há interação completa entre o aço e o concreto, as imperfeições iniciais são consistentes com aquelas adotadas para a determinação da capacidade resistente das barras de aço submetidas à compressão axial, e a flambagem local para força axial e momento fletor não pode ser um estado-limite último predominante. Para que se garanta a interação entre os dois materiais é necessário que as forças de cisalhamento desenvolvidas na interface aço-concreto não ultrapassem um valor de resistência, natural ou ampliada pelo acréscimo de conectores mecânicos.

Segundo [3] a aderência natural pode ser dividida em três mecanismos de transferência distintos: adesão (relacionada à aderência química entre o concreto e o tubo de aço, Figura 2a, desenvolve-se nos estágios iniciais do carregamento para pequenos deslocamentos e pode ser desprezada para efeito de resistência); aderência mecânica (resulta do engrenamento mecânico entre o concreto do núcleo e as irregularidades superficiais do tubo de aço, Figura 2b, se rompe nos estágios iniciais de carregamento em função do aumento do deslocamento relativo entre os materiais); e atrito (parcela de resistência que depende da força normal aplicada na interface e do coeficiente de atrito, Figura 2c, relacionado ao grau de rugosidade da superfície de aço e à condição da interface. Para seções

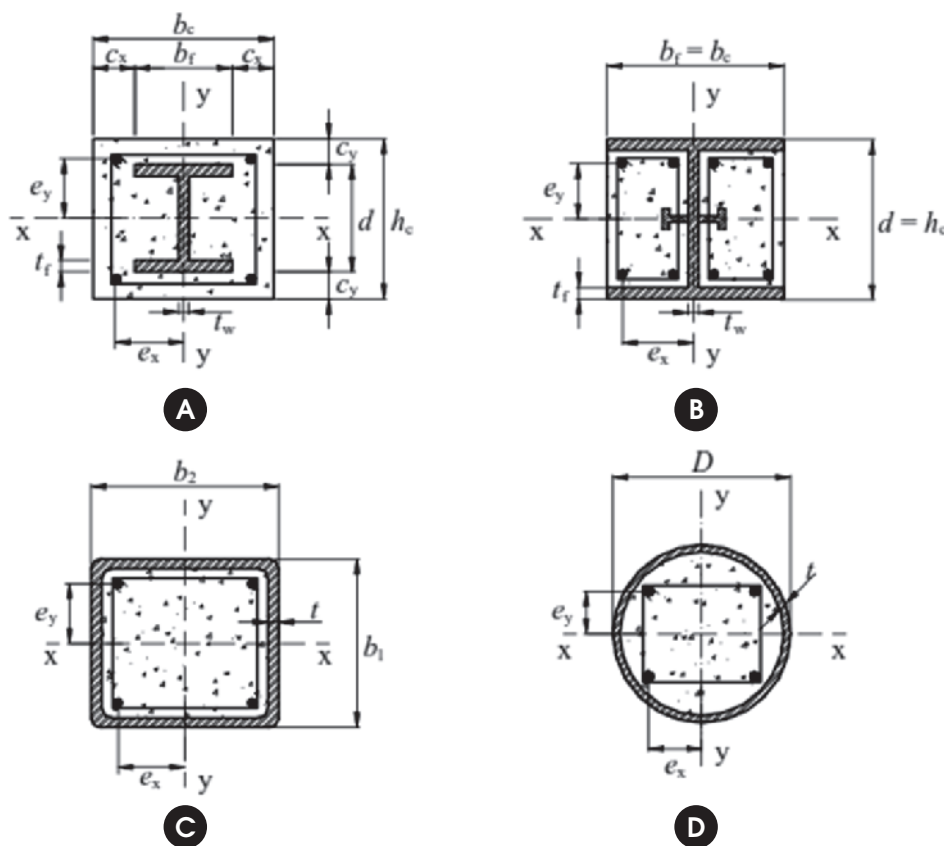


Figura 1 Tipos de seções transversais de pilares mistos. Fonte: (2)

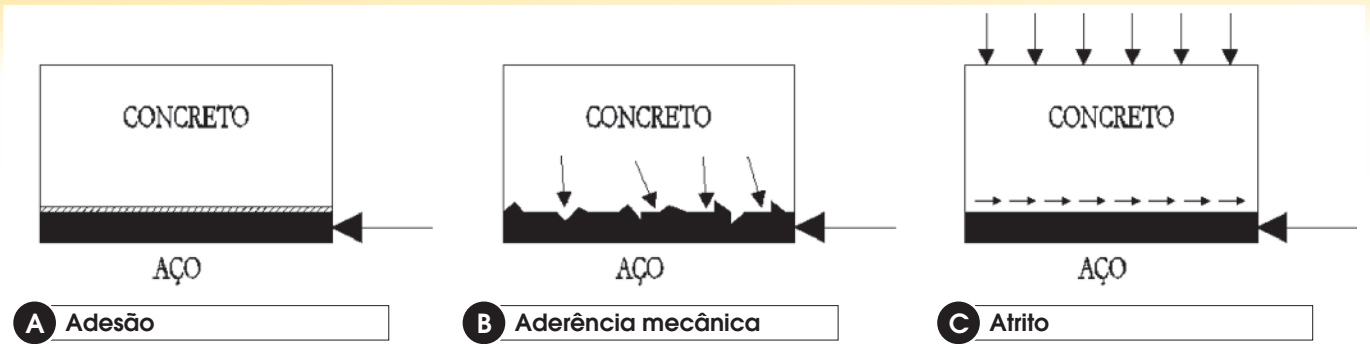


Figura 2

Modelos idealizados de transferência de cisalhamento na interface aço-concreto. Fonte: Adaptado de (4)

tubulares preenchidas com concreto a norma [2] especifica como resistência natural ao cisalhamento valores de 0,4 e 0,55 MPa para seções retangulares e circulares, respectivamente.

Para a aderência por adesão em pilares mistos, [5] analisa os resultados dos ensaios experimentais de 104 protótipos com tubos circulares, 49 com tubos retangulares e relações D/t médias entre 15 e 35, que mostram que a tensão de aderência: é maior para os pilares preenchidos de seção circular que para os quadrados; não tem relação com a resistência do concreto; diminui com o aumento da relação D/t em função da maior influência da retração. Com esses resultados é proposto a expressão para calcular a tensão de aderência entre o concreto e o aço, dada pela Equação (1):

$$f_{2\sigma} = 2,109 - 0,026 \cdot \frac{D}{t} \tag{1}$$

Onde $f_{2\sigma}$ é a tensão de aderência em MPa; D é o diâmetro externo do tubo em mm e t é a espessura do tubo.

Nas regiões de introdução de carga, que são aquelas onde ocorrem variações localizadas dos esforços solicitantes devidas às ligações viga-pilar, ou naquelas onde ocorre interrupção da armadura longitudinal, como em emendas de pilar ou ligações de base, deve-se evitar que ocorra escorregamento significativo na interface entre os dois materiais. Sendo assim, o comprimento da região de introdução de cargas representado pelo parâmetro l_v , como mostra a Figura, não deve exceder duas vezes a menor dimensão da seção do pilar ou um terço da distância entre pontos de introdução de carga, sendo adotado o menor destes dois valores.

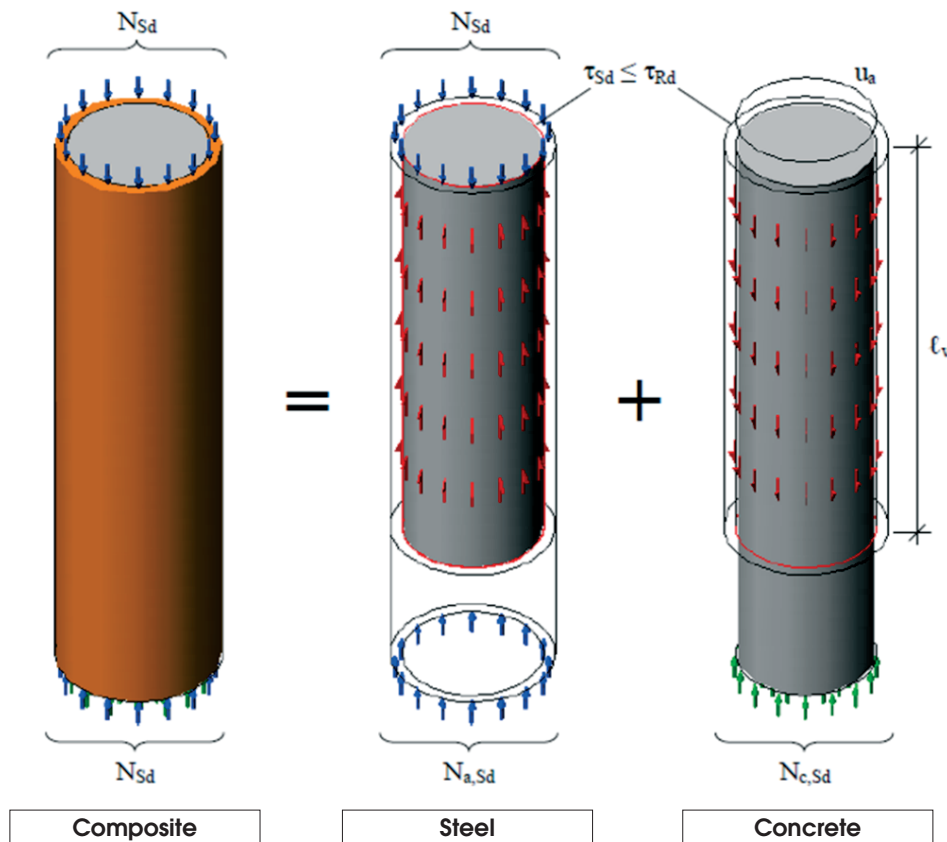
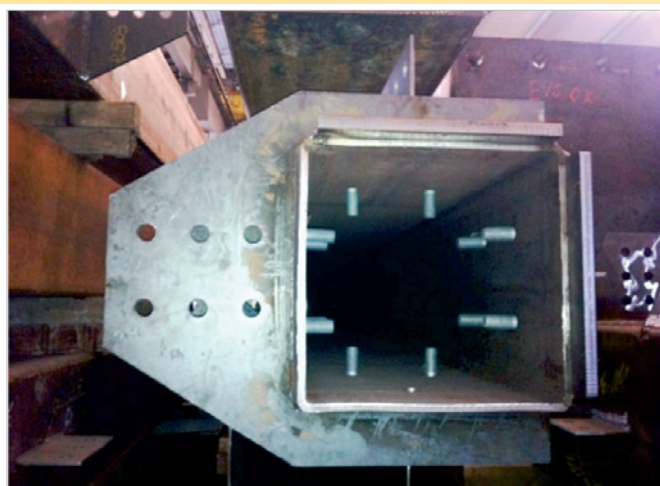


Figura 3

Componentes das ações de cálculo e propriedades geométricas para o cálculo da tensão de cisalhamento na interface. Fonte: (4)



A Ligação com chapa soldada direto



B Detalhe interno dos conectores na face externa do tubo

Figura 4

Exemplo de aplicação de dispositivo de transferência de carga. Fonte: (6)

Um valor médio para a tensão de cisalhamento transferida longitudinalmente na interface pode ser obtido pela Equação (2):

$$\tau_{sd} = \frac{N_{c,sd}}{u_a \cdot l_v} \quad (2)$$

Onde τ_{sd} é a tensão de cisalhamento de cálculo; $N_{c,sd}$ é o componente da força normal no concreto; u_a é o perímetro transversal da interface entre aço e concreto e l_v é o comprimento de transferência de carga.

Quando a tensão de cisalhamento de cálculo τ_{sd} exceder a tensão de cisalhamento natural resistente de cálculo τ_{Rd} , deve ser prevista a utilização de mecanismos adicionais de transferência de carga. Um forma usual é a aplicação de conectores de cisalhamento, conforme ilustra a Figura 4.

Encontram-se na literatura algumas pesquisas relacionadas ao comportamento de conectores de cisalhamento e transferência de cargas na interface aço-concreto para elementos mistos, dentre elas podemos citar: [7], [8], [9], [10], [11] e [12], dentre outros.

[13] realizaram uma série de ensaios experimentais de 71 modelos para análise do comportamento estrutural e transferência de carga em pilares mistos tubulares, sem e com a utilização de conectores mecânicos de cisalhamento. Como conector foi utilizado o parafuso M16 grau 5.6 com comprimento de 65 mm, atuando sobre três condições de carregamento: aplicado somente ao tubo de aço, somente ao concreto e em ambos simultaneamente. Das análises dos deslocamentos relativos e das deformações medidas nos dois componentes, foi verificado que a transferência de carga entre os dois materiais é melhor com o uso de conector.

Este trabalho estuda um conector de cisalhamento do tipo parafu-

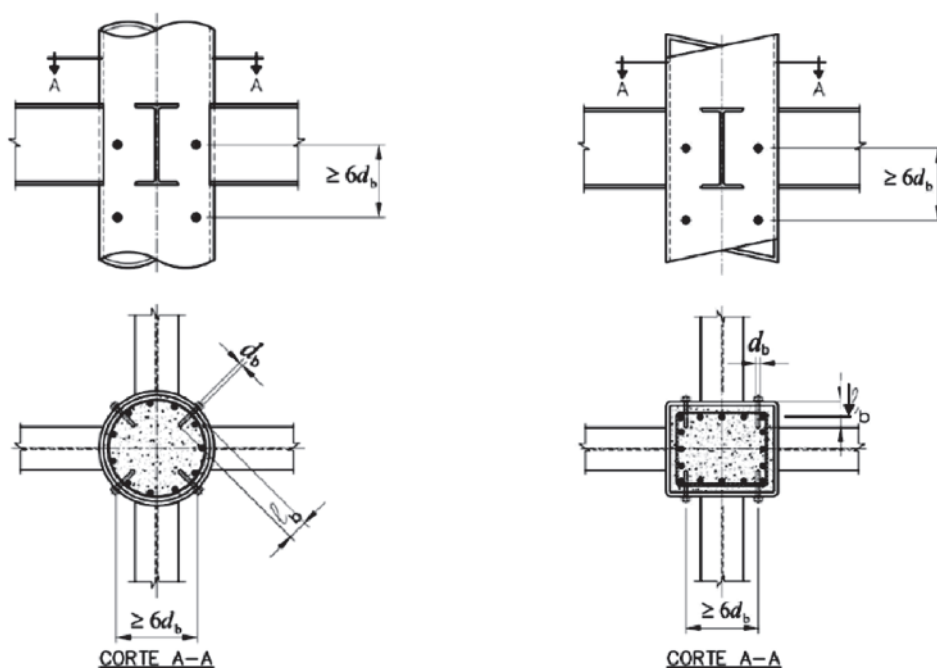


Figura 5

Dispositivo mecânico de cisalhamento tipo 1. Fonte: (1)

Tabela 1

Nomenclatura e características dos protótipos experimentais da série A

Nomenclatura	Ø x t Tubo (mm)	Ø Parafuso (pol.)	Ø do Furo (pol.)	Tipo de furo	f _{cm} (MPa)
C1-15,1-3/4-SF-21,7	219x15,1	3/4	3/4	SF	21,7
C2-15,1-3/4-SF-22,9	219x15,1	3/4	3/4	SF	22,9
C3-15,1-3/4-SF-30,8	219x15,1	3/4	3/4	SF	30,8
C4-15,1-3/4-SF-31,1	219x15,1	3/4	3/4	SF	31,1
C5-15,1-3/4-CF-31,1	219x15,1	3/4	13/16	CF	31,1
C6-15,1-3/4-CF-22,9	219x15,1	3/4	13/16	CF	22,9
C7-15,1-1/2-SF-26,0	219x15,1	1/2	1/2	SF	26,0
C8-15,1-1/2-SF-24,4	219x15,1	1/2	1/2	SF	24,4
C9-15,1-1/2-CF-22,7	219x15,1	1/2	9/16	CF	22,7
C10-8,2-3/4-SF-21,7	219x8,2	3/4	3/4	SF	21,7
C11-8,2-3/4-CF-21,6	219x8,2	3/4	13/16	CF	21,6
C12-8,2-3/4-CF-22,7	219x8,2	3/4	13/16	CF	22,7
C13-8,2-1/2-SF-21,7	219x8,2	1/2	1/2	SF	21,7
C14-8,2-1/2-CF-21,6	219x8,2	1/2	9/16	CF	21,6
C15-8,2-1/2-CF-21,6	219x8,2	1/2	9/16	CF	21,6

so estrutural, com o objetivo de verificar a validade das expressões analíticas constantes na norma de estruturas tubulares [1] e analisar o seu comportamento estrutural. Foi realizada uma série de ensaios experimentais de cisalhamento direto, fixando o diâmetro externo do tubo e variando a espessura, o diâmetro do parafuso, a resistência do concreto e a presença ou não de folga no furo.

2. Modelo analítico

A norma [1] apresenta dois tipos de dispositivos especiais que podem ser utilizados como conectores de cisalhamento na região de introdução de carga, para pilares mistos. O modelo que será estudado neste trabalho é o dispositivo tipo 1, onde são usados parafusos (comuns ou de alta resistência) cujo espaçamento entre eixos, em qualquer direção, não pode ser inferior a seis vezes o seu diâmetro. A cabeça do parafuso deve ser ponteadada com solda na face externa do perfil tubular, para evitar que esses se desloquem durante a concretagem do pilar. A Figura 5 apresenta o referido dispositivo.

A força resistente de cálculo de cada parafuso é dada pelo menor valor obtido das Equações (3) e (4) apresentadas a seguir:

$$V_{Rd} = l_b d_b \sigma_{c,Rd} \leq 5 d_b^2 \sigma_{c,Rd} \quad (3)$$

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

Onde l_b é o comprimento líquido do parafuso conector (descontando a espessura da parede do tubo); d_b é o diâmetro do parafuso conector; t é a espessura da parede do tubo; f_u é a resistência à ruptura do aço do tubo; f_{ub} é a resistência à ruptura do parafuso conector e $\sigma_{c,Rd}$ = tensão resistente de cálculo do concreto à pressão de contato, obtido pela Equação (5)

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \quad (5)$$

Onde f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão; A_2 é a área carregada e A_1 é a área de apoio, tomando-se A_2/A_1 igual a 4.

3. 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. Foram realizadas duas série de ensaios experimentais de cisalhamento direto. Na série A foi fixado o diâmetro externo do tubo e variado a espessura, o diâmetro do parafuso, a resistência do concreto e a presença ou não de folga no furo. A série B foi realizada sem a presença de conectores de cisalhamento, para avaliação da aderência natural entre a face interna do tubo de aço e o núcleo de concreto, além da influência do confinamento.

3.1 Configuração dos protótipos

Na série A foram realizados 15 ensaios experimentais de cisalhamento direto utilizando duas seções de perfis de aço tubular circular com diâmetro (D), de 219 mm e espessuras (t) de 8,2 mm e 15,2 mm a fim de se avaliar a influência da esbeltez D/t no comportamento do pilar misto. Todos os parafusos possuem comprimento de 4" (101,6 mm) e diâmetros de 1/2" (12,7 mm) e 3/4" (19 mm), sendo utilizados um total de 4 unidades para cada modelo. O comprimento total de todos os protótipos foi de 1000 mm e duas tipologias de f_{ck} de concreto foram adotadas, 20 e 30 MPa. Um outro fator avaliado foi a influência que a folga do furo, usualmente adotada no processo de fabricação para facilitar a montagem da estrutura, poderia ter sobre o comportamento do conector. Dessa forma foram confeccionados modelos com furos ajustados, ou seja, sem folga (SF), e outros com folga (CF) variando-se o tipo de broca utilizada para a perfuração.

A Tabela 1 mostra a nomenclatura e as características geométricas e mecânicas dos protótipos. Observa-se que os valores de f_{cm} foram obtidos por meio de ensaios de caracterização no dia

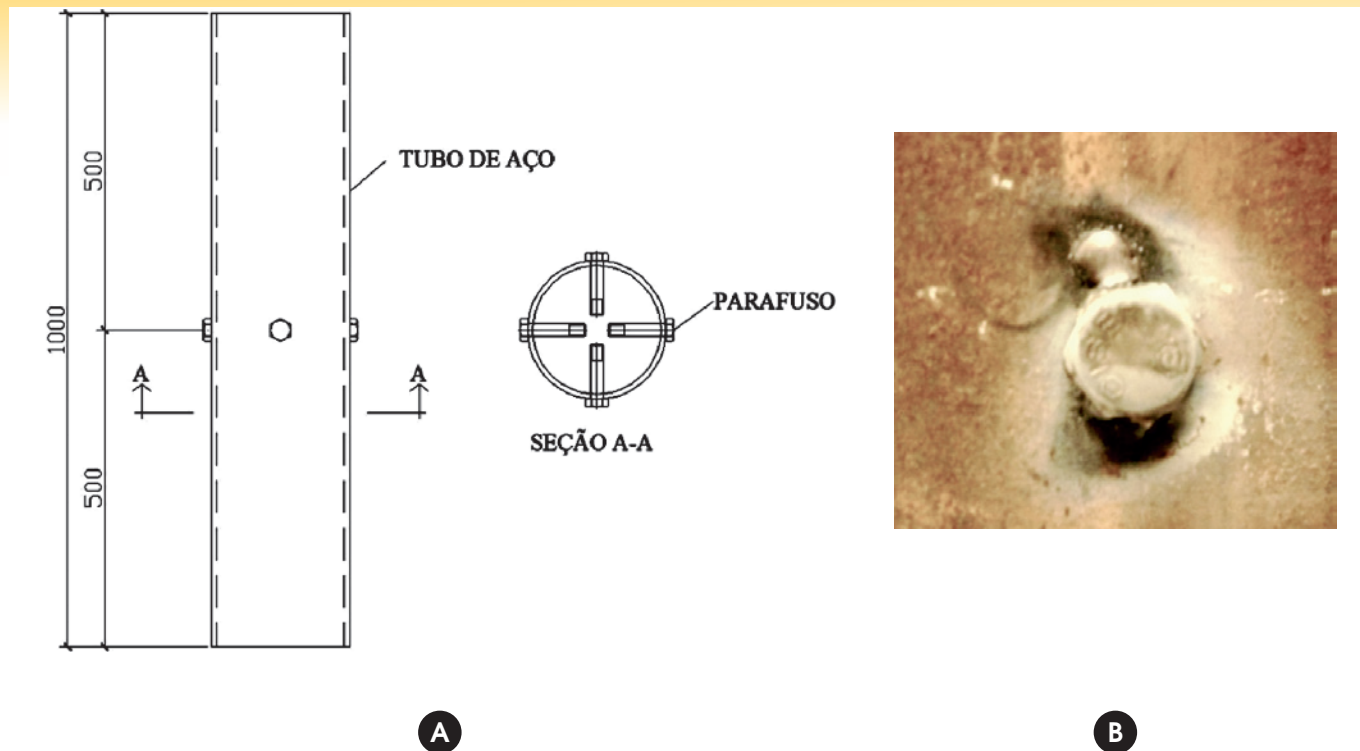


Figura 6
Posição dos parafusos no tubo de aço e detalhe do ponteadado de solda da série A

do ensaio de cada protótipo. Os modelos C11 e C14 não tiveram seus resultados aproveitados para análise, em função de problemas ocorridos durante a execução dos seus ensaios.

Os conectores foram posicionados a meia altura do tubo de aço e dispostos simetricamente, conforme indicado na Figura -a. A cabeça de todos os parafusos foram ponteadas com solda na parede externa do tubo, para impedir o deslocamento durante a concretagem e garantir a horizontalidade (ver detalhe na Figura -b).

Na série B foram realizados 4 ensaios experimentais de cisalhamento direto utilizando duas seções de perfis de aço tubular circular com diâmetro (D), de 219 mm e espessuras (t) de 8,2 mm e 15,2 mm sem conector de cisalhamento (SC), com comprimento total também de 1000 mm. Esta série foi ensaiada a fim de verificar o comportamento da tensão de aderência natural entre a parede interna do tubo de aço e o concreto de preenchimento, além de avaliar a influência da esbeltez D/t sobre o seu comportamento.

A Tabela mostra a nomenclatura e as características geométricas e mecânicas dos protótipos. Observa-se que os valores de f_{cm} são iguais para todas as peças, pois foi realizada apenas uma caracterização do concreto em função dos protótipos terem sido ensaiados durante quatro dias seguidos.

Tabela 2
Nomenclatura e características dos protótipos experimentais da série B

Nomenclatura	Ø x t Tubo (mm)	Ø Parafuso (pol.)	f_{cm} (MPa)
C16-15,1-SC-25,2	219x15,1	SC	25,2
C17-15,1-SC-25,2	219x15,1	SC	25,2
C18-8,2-SC-25,2	219x8,2	SC	25,2
C19-8,2-SC-25,2	219x8,2	SC	25,2

3.2 Concretagem

A concretagem dos modelos da série A foi realizada em duas etapas, uma para cada tipo de fck de concreto (20 e 30 MPa). Antes das concretagens as peças foram limpas internamente. A Figura -a apresenta os protótipos preparados para concretagem e a Figura -b indica um detalhe interno do mecanismo de transferência de carga.

Para se obter uma região de sobressalto de concreto no topo do pilar e uma de vazio na base, que possibilitasse o deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, foi soldado um anel de 50 mm (ver Figura -a), formado pelo mesmo perfil de cada modelo, no topo do protótipo. As peças foram concretadas em posição invertida da de ensaio e sobre uma chapa de madeira, para que se obtivesse uma superfície de aplicação de carga nivelada e lisa quando fosse retirado o anel. Dessa forma, foi deixado um espaço de aproximadamente 50 mm sem preenchimento durante a concretagem, conforme ilustra a Figura -b. Este procedimento foi adotado na concretagem das séries A e B.

A concretagem dos modelos da série B seguiu o mesmo procedimento da série A, porém foi realizada em uma etapa única pois havia somente um tipo de fck de concreto (20 MPa).

3.3 Caracterização do aço

Os tubos estruturais utilizados foram fabricados pela empresa Vallourec & Mannesmann (V&M) Tubes do Brasil, que forneceu os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do aço apresentados na Tabela 3. O aço empregado na fabricação dos perfis tubulares é do tipo VMB350 (valores de referência: $f_y \geq 350$ MPa e $f_u \geq 485$ MPa, norma ASTM A 501 grau B).

Os parafusos estruturais foram fabricados pela empresa CISER, que forneceu os resultados dos ensaios de caracterização do aço apresentados na Tabela 4. O aço dos parafusos é do tipo SAE



A



B

Figura 7
Preparação dos protótipos da série A para concretagem



A



B

Figura 8
Detalhes para obter uma folga de 50 mm na concretagem

Tabela 3
Propriedades mecânicas dos aços dos tubos

Ø x t Tubo (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Alongamento (ΔL) (%)
219x8,2	385	582	33
219x15,1	384	598	41

Tabela 4
Propriedades mecânicas dos aços dos parafusos

Parafuso Ø x l	f_{ub} (MPa)
1/2"x4"	660
3/4"x4"	665

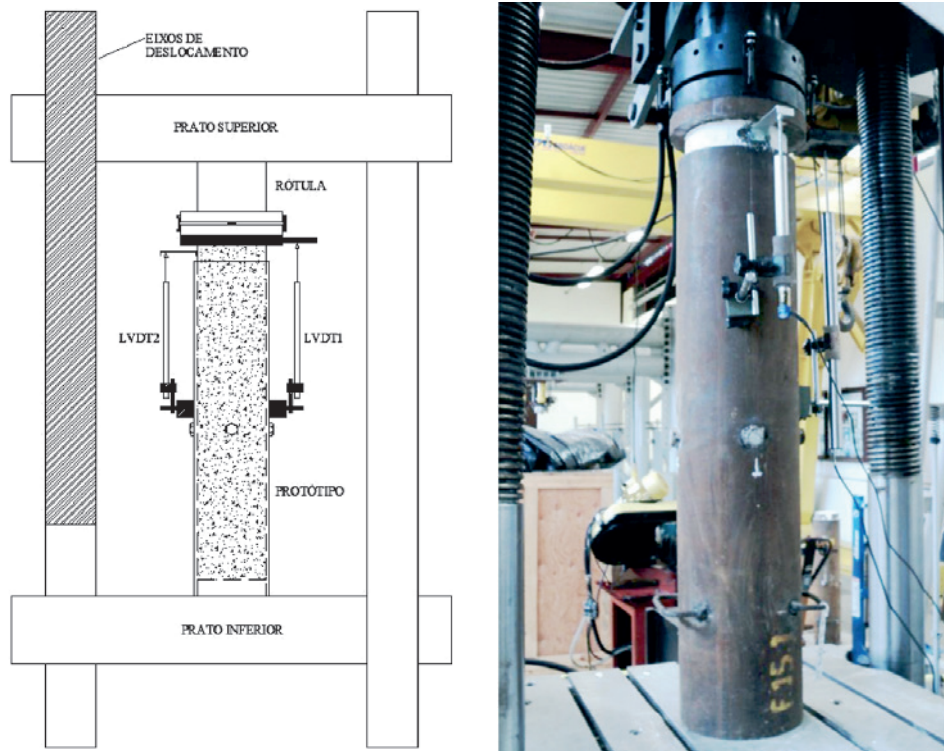


Figura 9
Representação do posicionamento dos LVDT's

J429 (fu ≥ 414 MPa, norma dimensional ASME B18.2.1).

3.4 Instrumentação

Todos os protótipos da série A foram instrumentados com dois transdutores lineares de deslocamento (Linear Variational Displa-

cement Transducer- LVDT) posicionados no topo do pilar, medindo o deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto (ver Figura 9). Os LVDT's foram fixados na face externa do tubo de aço com o auxílio de bases magnéticas. Para possibilitar a leitura do deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, foram utilizados uma chapa rígida apoiada na face

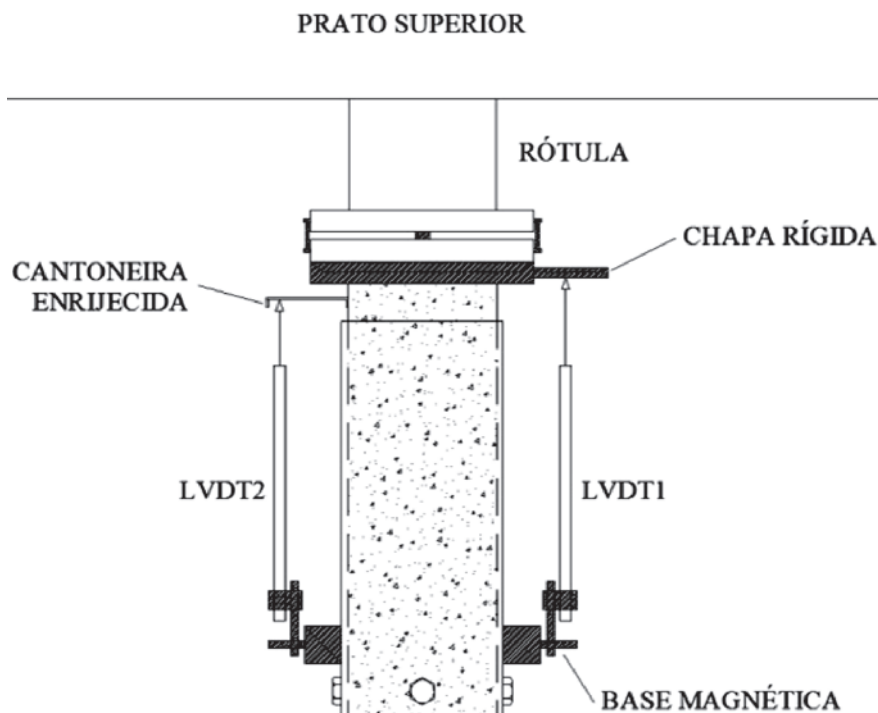


Figura 10
Detalhe da posição do LVDT, acessórios e rótula

Tabela 5

Distribuição dos modelos para cada tipo de extensometria adotada

Tipologia	Extensometria	Quantidade (und.)	Protótipos
1	Extensômetro linear	5	C3,C4, C5 (série A)
2	2 linhas de rosetas de 90°	16	C13 (série A)
3	1 linha de rosetas de 90°	8	C1,C10,C12,C15,C9 (série A)
4	1 linha de rosetas de 90°	5	C16,C18 (série B)

superior da região de concreto (entre o protótipo e a rótula) e uma cantoneira fixada na lateral do concreto (ver detalhe na Figura). Essa medição em dois pontos foi realizada para que, havendo falha na leitura de um LVDT, o outro pudesse continuar as medições. Em função de problemas na fixação da cantoneira que apareceram durante o andamento de alguns ensaios, os seus resultados na série A foram descartados, sem prejuízo aos resultados captados pelo outro LVDT. Já na série B não foi adotado esse sistema de medição adicional.

A extensometria não foi a mesma para todas as peças, sofrendo alterações de tipologia de extensômetro elétrico de resistência (EER) e de posição, durante a evolução dos ensaios. A primeira tipologia de extensometria adotada foi utilizando extensômetros lineares (modelo KFG-5-120-C1-11), as demais foram utilizando rosetas de 90° (modelo KFG-2-D16-11) ambos da marca KYOWA. A Tabela apresenta a distribuição dos modelos para cada uma das

quatro tipologias de extensometria adotadas, apresentando o tipo de extensômetro e a quantidade. As peças que não aparecem na tabela, não receberam extensometria.

A Figura 11 ilustra a posição dos extensômetros no tubo de aço e a instrumentação geral das peças.

3.5 Procedimento experimental

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma prensa servo-hidráulica modelo HVL da série SATEC, fabricado pela empresa Instron com célula de carga com capacidade de 2.000 kN.

A carga de compressão foi aplicada diretamente no núcleo de concreto por controle de deslocamento. Como não havia um procedimento de ensaio padrão a ser seguido, foi feita uma adaptação do procedimento especificado pelo Eurocode [14] para testes em conectores de cisalhamento, da seguinte forma:

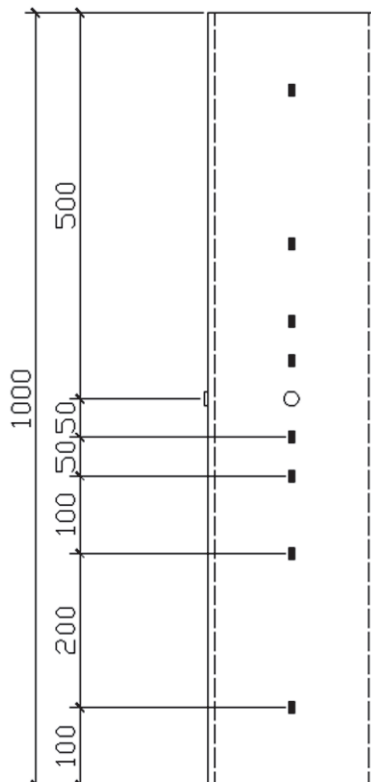
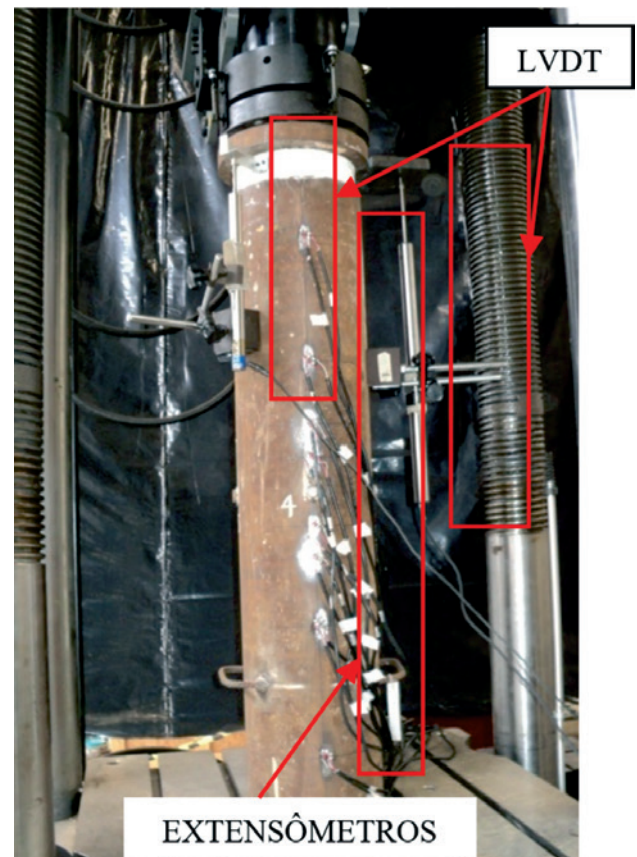
**A** Posição dos extensômetros**B** Peça preparada para ensaio

Figura 11
Exemplo de instrumentação dos protótipos

- A aproximação do prato de aplicação de carga para todas as etapas foi feita por controle de deslocamento de 2 mm/min até atingir uma carga de 3 kN.
- Após essa pré-carga, foi realizada a aplicação de 5 ciclos de carga e descarga de até 40% da carga teórica esperada para os conectores, com controle de carga de 10 kN/min.
- 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.

As leituras de cargas e deslocamentos dos LVDT's foram realizadas pelo sistema de aquisição de dados acoplado à máquina de ensaio, controlado pelo software Partner 8.4a da Instron. As leituras dos extensômetros foram realizadas pelo sistema de aquisição de dados Spider 8, controlado pelo software Catman 4.5 da HBM.

4. Resultados e discussões

4.1 Série A

Os resultados dos protótipos C11 e C14 foram descartados desta análise, devido a problemas ocorridos durante a execução de seus ensaios.

A Tabela 6 apresenta os valores das forças máximas aplicadas à extremidade do núcleo de concreto, comparados com as seguintes capacidades resistentes das seções transversais: concreto à compressão simples (A_{fc}), concreto em estado confinado ($A_{\sigma_c, Rd}$), escoamento (A_{afy}) e esmagamento do tubo de aço (A_{afu}).

Observa-se que a força aplicada supera a resistência à compressão simples do concreto (relação (1)/(2)) de 1,68 à 3,19 vezes. Isso mostra que o concreto encontra-se em um estado multiaxial de tensões, gerado pelo efeito de confinamento do núcleo de concreto pelas paredes do tubo de aço, que amplia sua capacidade resistente. Analisando a relação entre a força aplicada e a capacidade de resistência do concreto confinado (relação (1)/(3)), verifica-se que os valores estão entre 1,18 e 2,24. Este fato evidencia que a conside-

ração do efeito de confinamento leva a resultados mais próximos dos experimentais. Pode-se observar também que a Equação (5), utilizada para determinar $\sigma_{c,Rd}$, conduz a valores conservadores se comparados com os experimentais.

Quanto à resistência do aço, observa-se que a relação entre a carga atuante e a carga de escoamento da seção (relação (1)/(4)) varia de 0,32 à 0,81, e em relação à resistência ao esmagamento (relação (1)/(5)) varia de 0,21 à 0,52. Pode-se constatar que o tubo de aço apresenta uma maior resistência, estando trabalhando com valores mais conservadores em relação ao núcleo de concreto.

A Tabela 7 apresenta os resultados de todos os ensaios da série A, comparados com as resistências teóricas avaliadas para cada modo de falha considerado pela [1]. Os valores de resistência teórica ($V_{Rd,teo}$) e experimental ($V_{Rd,exp}$) se referem a um único conector, ou seja, a carga aplicada no ensaio foi dividida por quatro. Os valores destacados se referem ao estado limite dominante para cada protótipo.

A resistência experimental foi obtida do primeiro ponto de inflexão das curvas carga versus deslocamento relativo, admitindo que neste ponto o conector perca o comportamento elástico-linear admitido para as condições de projeto. De forma similar ao que ocorre em ensaios de cisalhamento direto para avaliação de conectores de vigas mistas [15], os resultados de modelos idênticos apresentam significativa variabilidade que podem ser causadas principalmente pela forma de concretagem, adensamento e arranjo dos agregados.

Dos valores apresentados na Tabela 7, pode-se observar que o mecanismo de falha dominante das expressões analíticas da norma [1] é o esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso. Entretanto, observa-se que os valores experimentais apresentam uma variação de 1,71 à 6,11 vezes maior que o teórico. Isso indica que a análise simplificada e de forma isolada dos mecanismos de falha, conduz a valores de capacidade resistente conservadores. A análise experimental sugere que há um acréscimo na capacidade de carga do conector. Esse ganho pode ser

Tabela 6

Comparação entre a força aplicada e as capacidades resistentes do aço e do concreto

Protótipo	Força aplicada (KN)	Concreto		Aço		Relações			
		Resistência à compressão (kN)	Resistência confinado (kN)	Resistência ao escoamento (kN)	Resistência última (kN)	(1) / (2)	(1) / (3)	(1) / (4)	(1) / (5)
		A_{fc}	$A_{\sigma_{c,Rd}}$	A_{fy}	A_{fu}				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					
C1	1.940	608	868	3.714	5.629	3,19	2,24	0,52	0,34
C2	1.800	641	915	3.714	5.629	2,81	1,97	0,48	0,32
C3	1.894	862	1.232	3.714	5.629	2,20	1,54	0,51	0,34
C4	1.900	871	1.243	3.714	5.629	2,18	1,53	0,51	0,34
C5	1.889	871	1.243	3.714	5.629	2,17	1,52	0,51	0,34
C6	1.813	641	915	3.714	5.629	2,83	1,98	0,49	0,32
C7	1.375	728	1.039	3.714	5.629	1,89	1,32	0,37	0,24
C8	1.190	683	977	3.714	5.629	1,74	1,22	0,32	0,21
C9	1.925	636	907	3.714	5.629	3,03	2,12	0,52	0,34
C10	1.451	700	999	2.091	3.247	2,07	1,45	0,69	0,45
C12	1.699	732	1.045	2.091	3.247	2,32	1,63	0,81	0,52
C13	1.334	700	999	2.091	3.247	1,91	1,33	0,64	0,41
C15	1.171	696	996	2.091	3.247	1,68	1,18	0,56	0,36

Tabela 7

Comparação das resistências dos conectores de cisalhamento

Protótipo	Verificação do concreto (kN)	Verificação do concreto (kN)	Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo (kN)	$V_{Rd,teo}$ (kN)	$VR_{d,exp}$ (kN)	$V_{Rd,exp}$ / $V_{Rd,teo}$
	$l_b d_b \sigma_{c,Rd}$	$5d_b^2 \sigma_{c,Rd}$	$0,4\pi \frac{d_b^2 f_{ub}}{4 \gamma_{a2}}$	$2,4d_b t \frac{f_u}{\gamma_{a2}}$	(3)	(4)	(5)
C1-15.1-3/4-SF-21,7	51	56	76	413	51	163	3,18
C2-15.1-3/4-SF-22,9	54	59	76	413	54	191	3,55
C3-15.1-3/4-SF-30,8	73	80	76	413	73	124	1,71
C4-15.1-3/4-SF-31,1	73	81	76	413	73	133	1,81
C5-15.1-3/4-CF-31,1	73	81	76	413	73	140	1,91
C6-15.1-3/4-CF-22,9	54	59	76	413	54	171	3,18
C7-15.1-1/2-SF-26,0	41	30	33	275	30	125	4,17
C8-15.1-1/2-SF-24,4	38	28	33	275	28	133	4,72
C9-15.1-1/2-CF-22,7	36	26	33	275	26	160	6,11
C10-8.2-3/4-SF-21,7	55	56	76	218	55	95	1,72
C12-8.2-3/4-CF-22,7	58	59	76	218	58	98	1,69
C13-8.2-1/2-SF-21,7	37	25	33	146	25	105	4,20
C15-8.2-1/2-CF-21,6	37	25	33	146	25	88	3,51

explicado em função da interação entre os mecanismos de colapso, amplificados pelo efeito de confinamento no concreto.

Nos pilares C2 e C15 foram feitas aberturas para se observar a configuração deformada final dos conectores de 3/4" e 1/2", respectivamente (Figura 12-a e Figura 12-b). Pode-se observar nos detalhes a flexão do parafuso e que o concreto ao redor não apresenta trincas. A Figura 12-c apresenta um detalhe da deformação por cisalhamento na região de interface entre o tubo de aço e o concreto para o modelo com conector 1/2", com visível deslocamento vertical do fuste em relação à cabeça do parafuso.

A Figura 13 mostra as curvas carga versus deslocamento relativo para todos os protótipos da série A. O valor de deslocamento de 6 mm é destacado como referência para a caracterização do comportamento quanto a rigidez, segundo o critério de classificação do [14].

Pode-se observar uma clara separação das curvas em dois grupos, os de perfis 219x8,2 com índice de esbelteza D/t de 26,7 e os de 219x15,1 com D/t de 14,5. Verifica-se dessa forma que a

esbelteza do tubo influencia na capacidade de carga e na ductilidade do conector. Os tubos com esbelteza de 26,7 apresentam-se mais flexíveis e dúcteis que os de esbelteza 14,5. Observa-se que todos os tubos de espessura 8,2 mm apresentaram valores de deslocamentos relativos bem superiores a 6mm, enquanto que alguns dos tubos de 15,1 mm apresentam valores menores e outros ligeiramente superiores.

Analisando a Figura 14, que apresenta as curvas carga versus deslocamento relativo somente para os protótipos fabricados com tubo 219x8,2 e concreto com fck de 20MPa, podemos observar que os conectores de 3/4" apresentam uma maior rigidez e suportam mais carga que os de 1/2". Os demais protótipos têm comportamento similar.

Para verificar a influência da folga do furo no comportamento estrutural do conector e na resistência, a Figura 15 apresenta as curvas dos modelos C8 e C9, na fase inicial do carregamento. Pode-se observar que o modelo com folga (C9) apresenta um maior deslocamento relativo para o mesmo nível de carga que o modelo sem folga

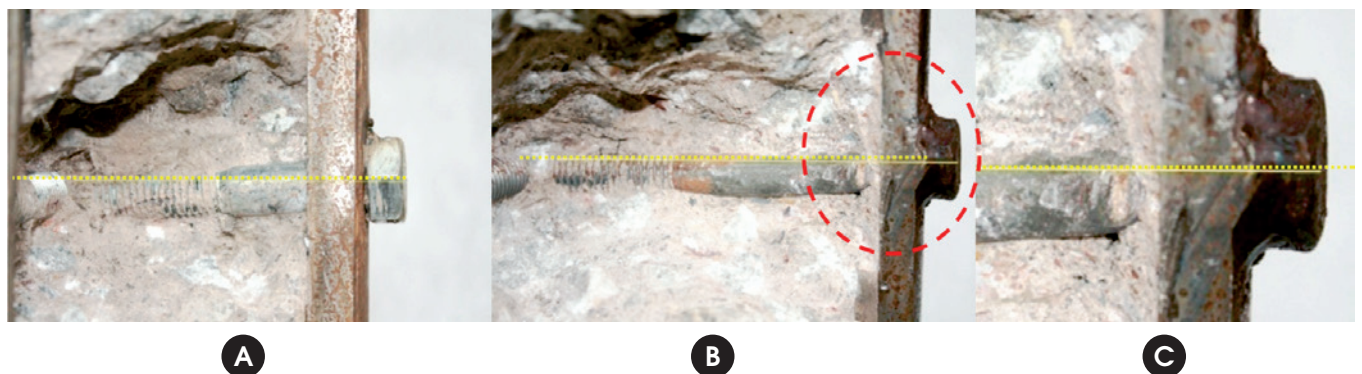


Figura 12

Configuração final deformada dos conectores: (a) Detalhe do conector do protótipo C2; (b) Detalhe do conector do protótipo C15; (c) Detalhe do cisalhamento do conector no protótipo C15

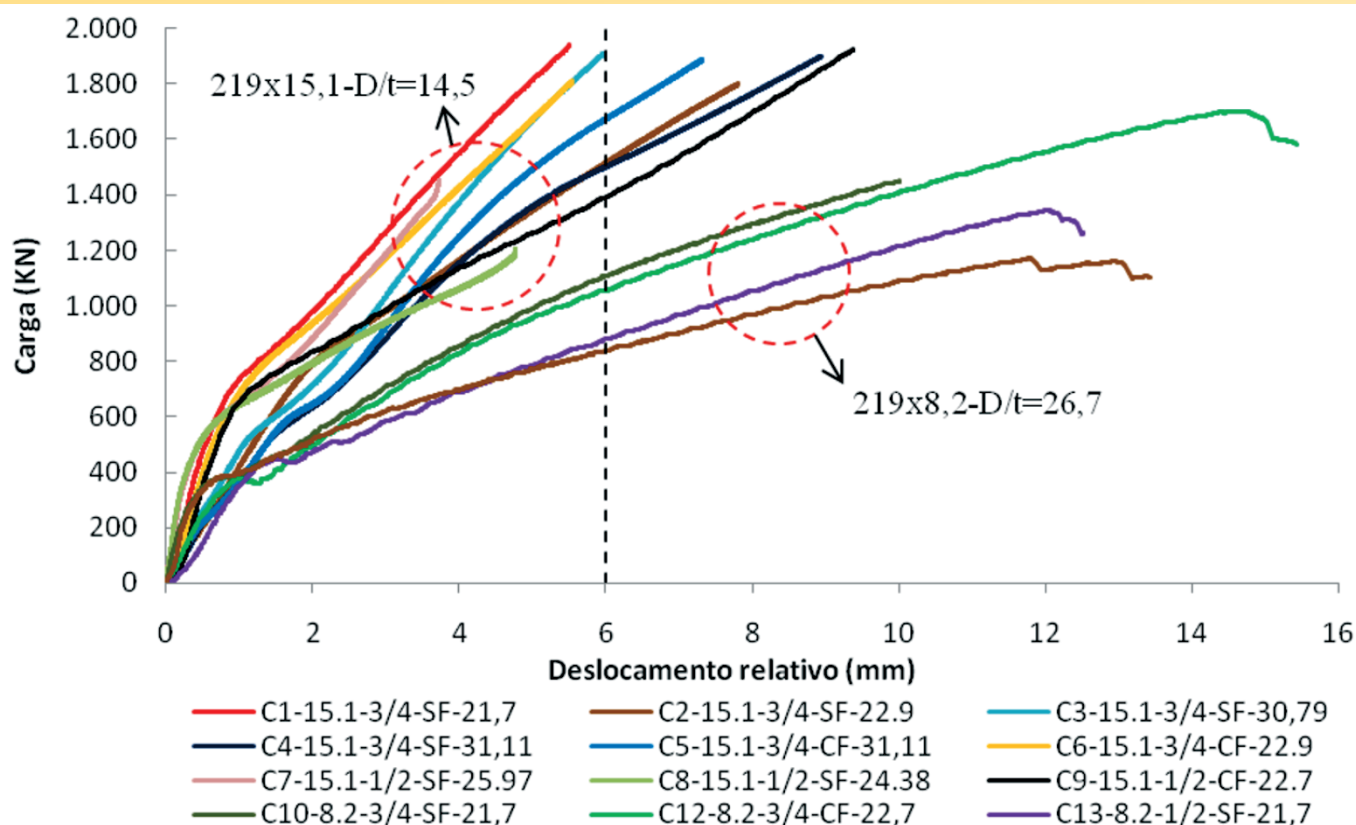


Figura 13
Sobreposição das curvas carga versus deslocamentos relativo da série A

(C8) até um nível de deslocamentos de aproximadamente 1,0 mm, valor próximo à metade da folga do furo (0,8 mm, linha tracejada do gráfico). Como após esse valor as duas curvas se encontram e continuam paralelas, pode-se concluir que é eliminada a folga e as colunas passam a ter um mesmo comportamento estrutural.

A Figura 16 apresenta as curvas das deformações verticais e diametrais medidas ao longo do comprimento do tubo para o protótipo C1, 400 mm acima e abaixo da posição dos conectores (centro) para diferentes níveis de carregamentos, variando de 10 à 100% da carga máxima aplicada. Observa-se que para os estágios iniciais de carregamento até 387 kN (20%), as deformações são aproximadamente constantes ao longo do comprimento do tubo, indicando que a transferência dos esforços entre o núcleo de concreto e a parede do tubo é feito de forma gradual pelos mecanismos de aderência natural. Para os níveis de carregamen-

to a partir de 580 kN (30%), verifica-se que os conectores mecânicos começam a ser solicitados e a fazer parte do sistema de transferência de cargas, em virtude do não paralelismo das deformações verticais. Para as deformações diametrais, observa-se o mesmo efeito para os estágios iniciais de carregamento com grandes acréscimos de deformações para os níveis a partir de 580 kN (30%) na região mais próxima abaixo do conector. Este fato evidencia o surgimento das tensões de confinamento que tendem a expandir o tubo diametralmente.

4.2 Série B

Esta série foi realizada sem a presença de conectores de cisalhamento, para avaliação da aderência natural entre a face interna do tubo de aço e o núcleo de concreto, além da influência do confi-

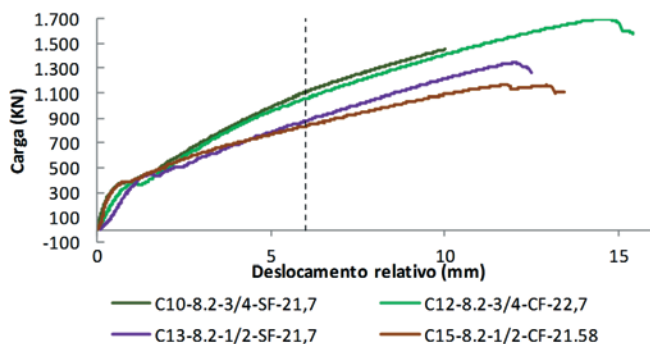


Figura 14
Curvas carga versus deslocamentos relativo para os ensaios com perfil tubular 219x8,2 mm e f_{ck} de 20 MPa

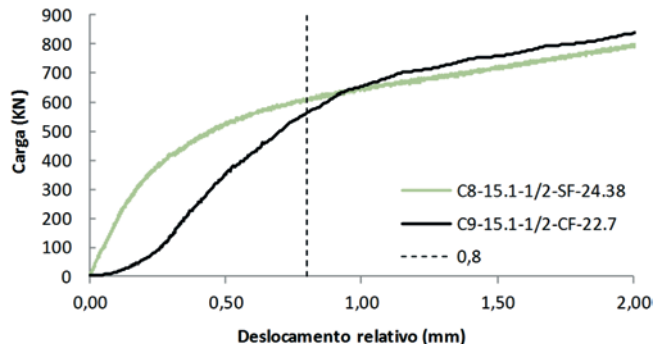


Figura 15
Curvas carga versus deslocamentos relativo - influência da folga do furo para os protótipos C8 e C9

namento. A Figura 17 apresenta a sobreposição das curvas carga versus deslocamento relativo obtidas para os quatro protótipos ensaiados. Observa-se graficamente a influência da esbelteza D/t na tensão de aderência natural, provocada principalmente pela ação do efeito de confinamento.

A Tabela 8 apresenta os valores de carga aplicada e deslocamento relativo, medidos no ponto da perda de aderência natural entre o núcleo de concreto e o tubo de aço, considerado como sendo o primeiro ponto de inflexão das curvas.

A Tabela 9 apresenta os valores da tensão de aderência experimental (τ_{exp}), calculados com base na Equação (2). Também é feita uma comparação com o valor de referência (τ_{Rd}) estabelecido pela norma [2] para tubos circulares preenchidos e o valor de

$f_2\sigma$ proposto por [5] que é calculado pela Equação (1).

Pode-se observar que as relações entre a tensão de aderência experimental e a tensão obtida pela Equação (1) ($\tau_{exp}/f_2\sigma$), para os modelos C16 e C17 (219x15,1), apresentam valores de 0,84 e 1,00 com média 0,92. Já para os modelos C18 e C19 (219x8,2) esses valores são de 0,31 e 0,22 com média 0,27. Isso indica que para seções com menor esbelteza ($D/t=14,5$), a proposta de equação apresenta uma boa correlação com os valores experimentais. Entretanto, quando se trata de seções com maior esbelteza ($D/t=26,7$) os valores obtidos estão superestimados com relação aos obtidos experimentalmente. Esse comportamento pode ser observado na Figura 18, que apresenta a curva $f_2\sigma$ versus D/t comparada com as tensões de aderência natural obtidas dos ensaios.

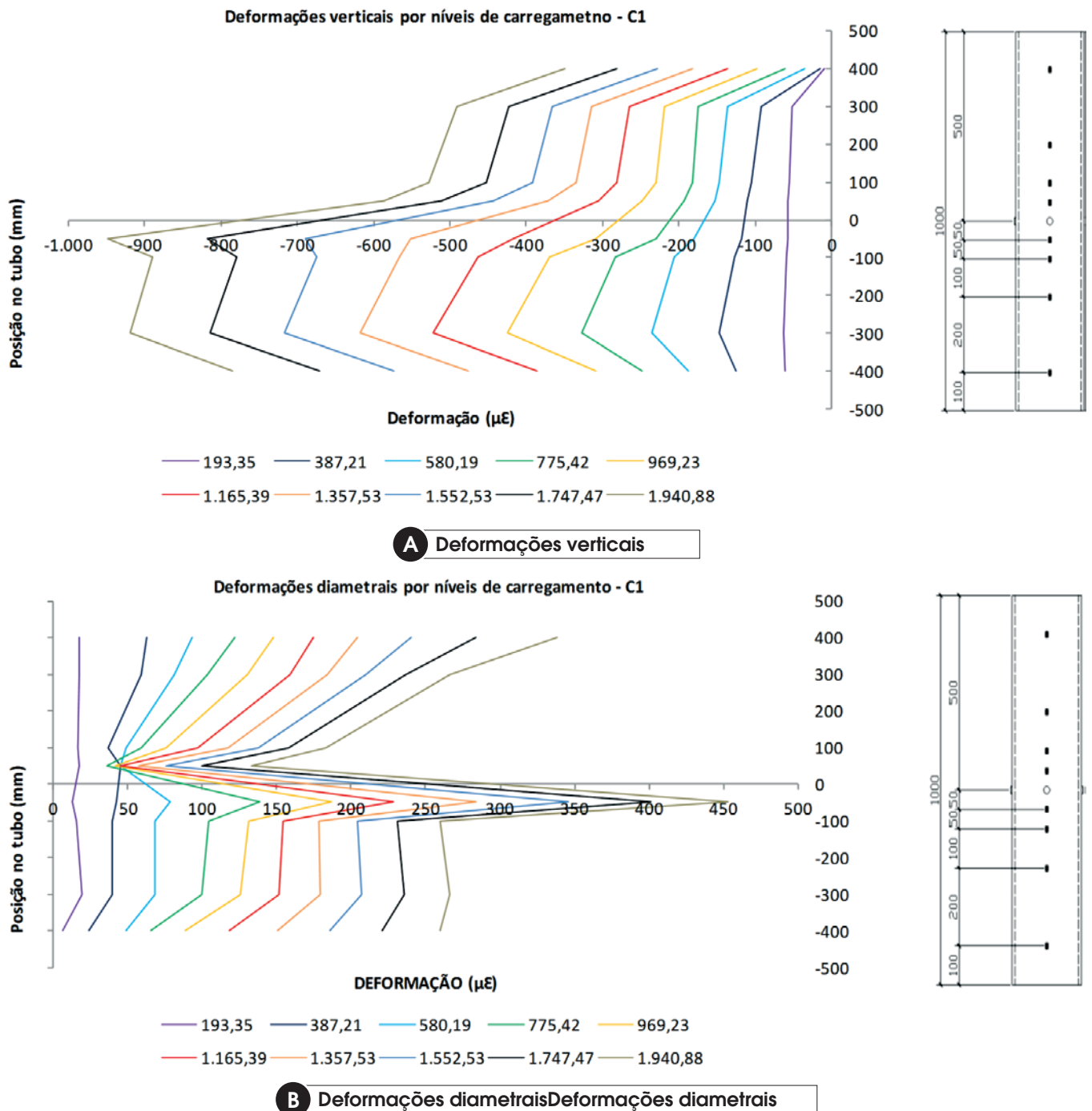


Figura 16
Curvas de distribuição das deformações ao longo do tubo - C1-15.1-3/4-SF-21,7

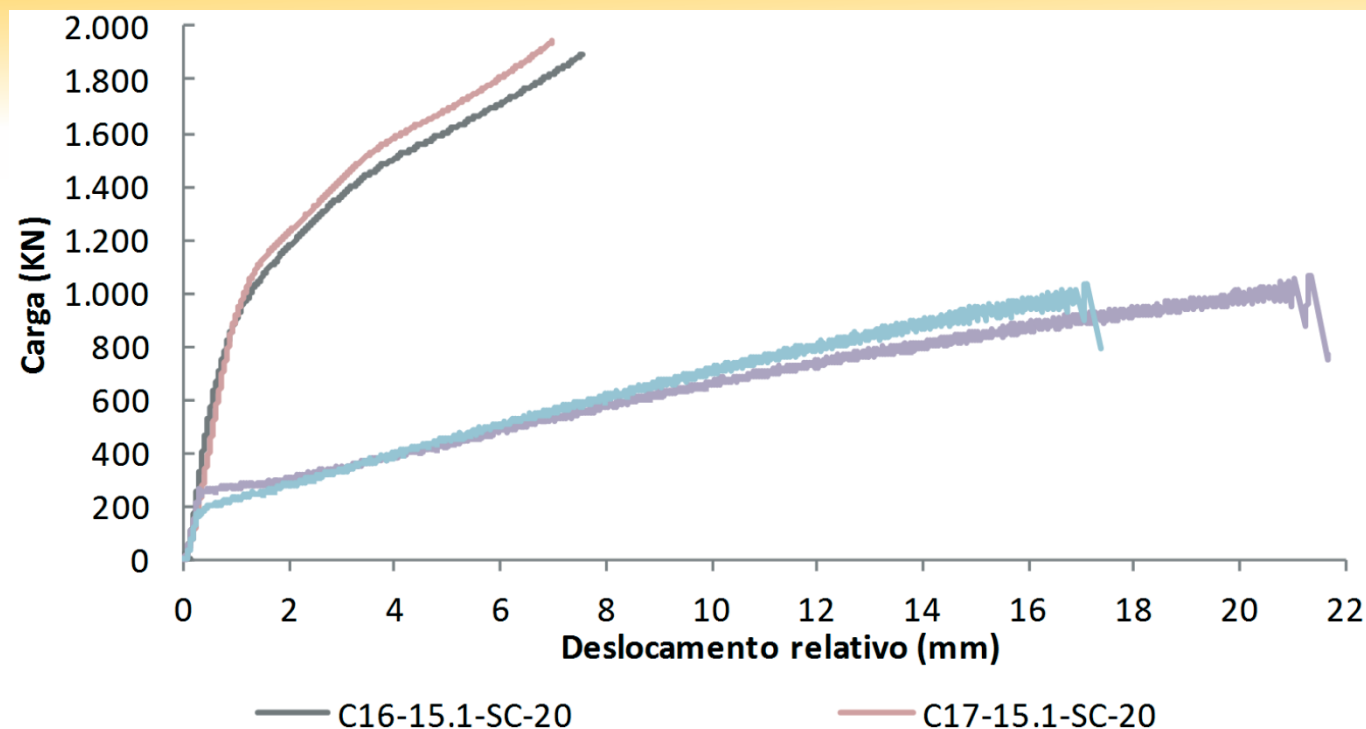


Figura 17
Curvas carga versus deslocamento relativo da série B

Quando os valores experimentais são comparados com o valor de referência (τ_{Rd}) igual a 0,55 MPa, observa-se que para os protótipos C16 e C17 as relações são de 2,66 e 3,14 com média 2,9. Já para os modelos C18 e C19 esses valores são de 0,80 e 0,56 com média 0,68. Destes valores, pode-se verificar que para seções com menor esbeltez ($D/t=14,5$) os valores experimentais são bem superiores ao referencial normativo. Entretanto, para seções mais esbeltas ($D/t=26,7$) esses valores são menores, estando contra a

segurança para as condições admitidas em situação de projeto. A Figura 19 apresenta a sobreposição das curvas carga versus deslocamento relativo para todos os protótipos confeccionados com tubo de 219x8,2 das séries A e B. Pode-se observar a divisão das curvas em três grupos, caracterizados pela ausência de conector, presença de conector de 1/2" e de 3/4". Verifica-se que a presença do conector influencia na capacidade de carga do protótipo, aumentando-a também com o aumento do diâmetro do parafuso. Observa-se que, para um mesmo nível de carregamento, os deslocamentos relativos diminuem com a presença e aumento do diâmetro do conector.

Tabela 8
Carga e deslocamento relativo de perda de aderência – série B

Protótipo	Carga aplicada (kN)	δ (mm)
C16-15,1-SC-25,2	823	0,86
C17-15,1-SC-25,2	974	1,10
C18-8,2-SC-25,2	266	0,32
C19-8,2-SC-25,2	185	0,28

A Figura 20 apresenta a sobreposição das curvas carga versus deslocamento relativo para alguns dos protótipos confeccionados com tubo de 219x15,1 da série A, a fim de facilitar a visualização, e os dois da série B com deslocamento relativo limitado a 4 mm. Pode-se observar a divisão das curvas em três grupos, caracterizados pela ausência de conector, presença de conector de 1/2" e de 3/4". Diferentemente do observado para modelos confeccionados com tubos 219x8,2, verifica-se que a presença e o aumento do diâmetro do conector reduz a capacidade de carga do protótipo. Observa-se que, para um mesmo nível de carregamento, os

Tabela 9
Tensão de aderência experimental

Protótipo	Carga aplicada (kN)	τ_{exp} (MPa)	$f_{2\sigma}$ (MPa)	τ_{Rd} (MPa)	$\tau_{exp}/f_{2\sigma}$	τ_{exp}/τ_{Rd}
C16-15,1-SC-25,2	823	1,46	1,73	0,55	0,84	2,66
C17-15,1-SC-25,2	974	1,73	1,73	0,55	1,00	3,14
C18-8,2-SC-25,2	266	0,44	1,41	0,55	0,31	0,80
C19-8,2-SC-25,2	185	0,31	1,41	0,55	0,22	0,56

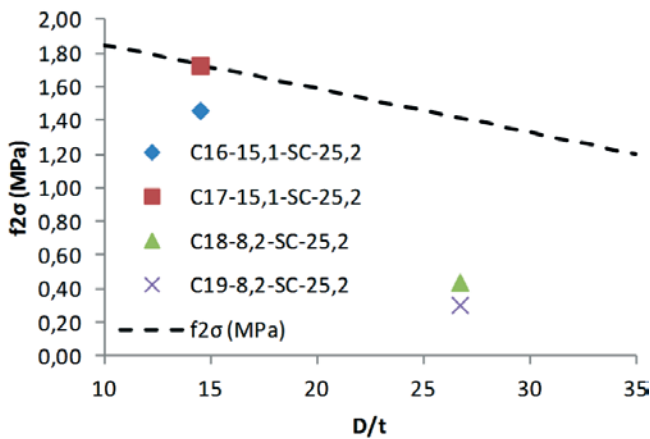


Figura 18

Comparação entre a curva de $f_2\sigma$ em função da relação D/t , e a variação da tensão de aderência natural experimental para os protótipos ensaiados

deslocamentos relativos aumentam com a presença e aumento do diâmetro do conector. Esse comportamento pode indicar que, para seções com baixa esbelteza D/t onde a tensão de aderência natural é suficiente para garantir a interação total entre os dois materiais, a utilização de conectores de cisalhamento pode reduzir a capacidade resistente da conexão e aumentar os deslocamentos relativos. Uma possível explicação para isso é que a presença dos conectores de cisalhamento introduz regiões de concentração de tensões na interface entre o aço e o concreto, que induzem a uma perda prematura da tensão de aderência natural entre os dois materiais.

Na Figura 21 são apresentadas as distribuições de tensões verticais e diametrais para o protótipo C16-15,1-SC-25,2. Observa-se que, em função da ausência de conector de cisalhamento, a distribuição das tensões verticais (Figura 21-a) ocorrem de forma homogênea ao longo do comprimento do tubo. Com relação a distribuição das tensões diametrais (Figura 21-b), verifica-se que elas ocorrem de forma homogênea e aproximadamente constante ao longo do comprimento, apresentando uma região de variação

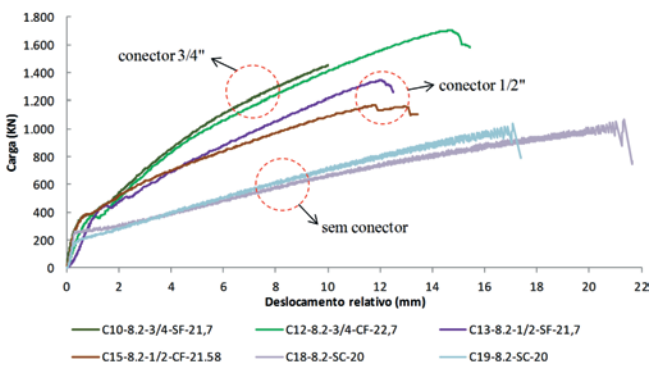


Figura 19

Comparativo entre as curvas carga versus deslocamento relativo para o tubo 219x8,2 das séries A e B

próximo ao ponto de aplicação de carga. Este comportamento, indica que a baixa esbelteza da seção 219x15,1 promove uma forte influência do confinamento no pilar misto que, mesmo sem conector de cisalhamento, apresenta alta rigidez e capacidade de carga quando comparado com o tubo 219x8,2.

5. Conclusões

A análise dos resultados experimentais dos protótipos ensaiados em cisalhamento direto (série A), visando o estudo do comportamento estrutural de parafusos como conector mecânico de cisalhamento em pilar tubular misto de aço e concreto, demonstra que é viável a utilização desse tipo de elemento. Pode-se observar também que os resultados de resistência obtidos dos ensaios foram acima dos valores obtidos pelas expressões de resistência apresentadas no ABNT NBR 16239:2014. Desta forma, verifica-se que as equações estão a favor da segurança e podem ser ajustadas para fornecer um valor de resistência mais próximo do experimental.

Da análise das curvas carga versus deslocamento relativo pode-se concluir que os parafusos apresentam um comportamento dúctil e flexível, sendo esta uma característica fundamental para sua aplicação como conector de cisalhamento. A esbelteza D/t do tubo influencia na rigidez e na resistência da conexão, em função do aumento das tensões de confinamento no concreto. A presença de folga no furo exerce influência na rigidez da conexão apenas nos estágios iniciais de carregamento, não interferindo de forma significativa no comportamento global do conector.

A distribuição das deformações verticais e diametrais ao longo da parede do tubo, confirmam a eficiência do mecanismo de conexão mecânica na transferência dos esforços de cisalhamento na interface entre os dois materiais, principalmente para os protótipos com tubo de espessura 8,2 mm que possuem uma menor aderência natural. Também fica clara a presença das tensões de confinamento que tendem a expandir o tubo diametralmente e aumentam a resistência do concreto.

Para os resultados obtidos na série B, observa-se que o valor de referência da tensão de aderência natural estabelecido pela ABNT NBR 8800:2008 está subestimado para seções circulares

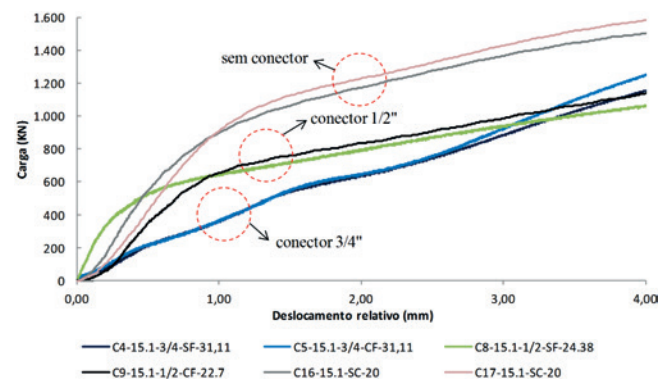


Figura 20

Comparativo entre as curvas carga versus deslocamento relativo para o tubo 219x15,1 das séries A e B, limitados aos deslocamento de 4 mm

com baixa esbeltez D/t , mas superestimado para seções de menor espessura quando comparados com os valores experimentais. Tal comportamento sugere que para seções mais esbeltas, maior relação D/t , a previsão normativa pode estar contra a segurança. Isso indica a necessidade de maiores estudos sobre o assunto,

bem como o desenvolvimento de metodologias de análise que levem em consideração a relação D/t na determinação da tensão de aderência natural (τ_{Rd}), não se restringindo apenas ao tipo de seção (circular, retangular, total ou parcialmente revestida). Fazendo uma comparação entre as curvas carga versus deslo-

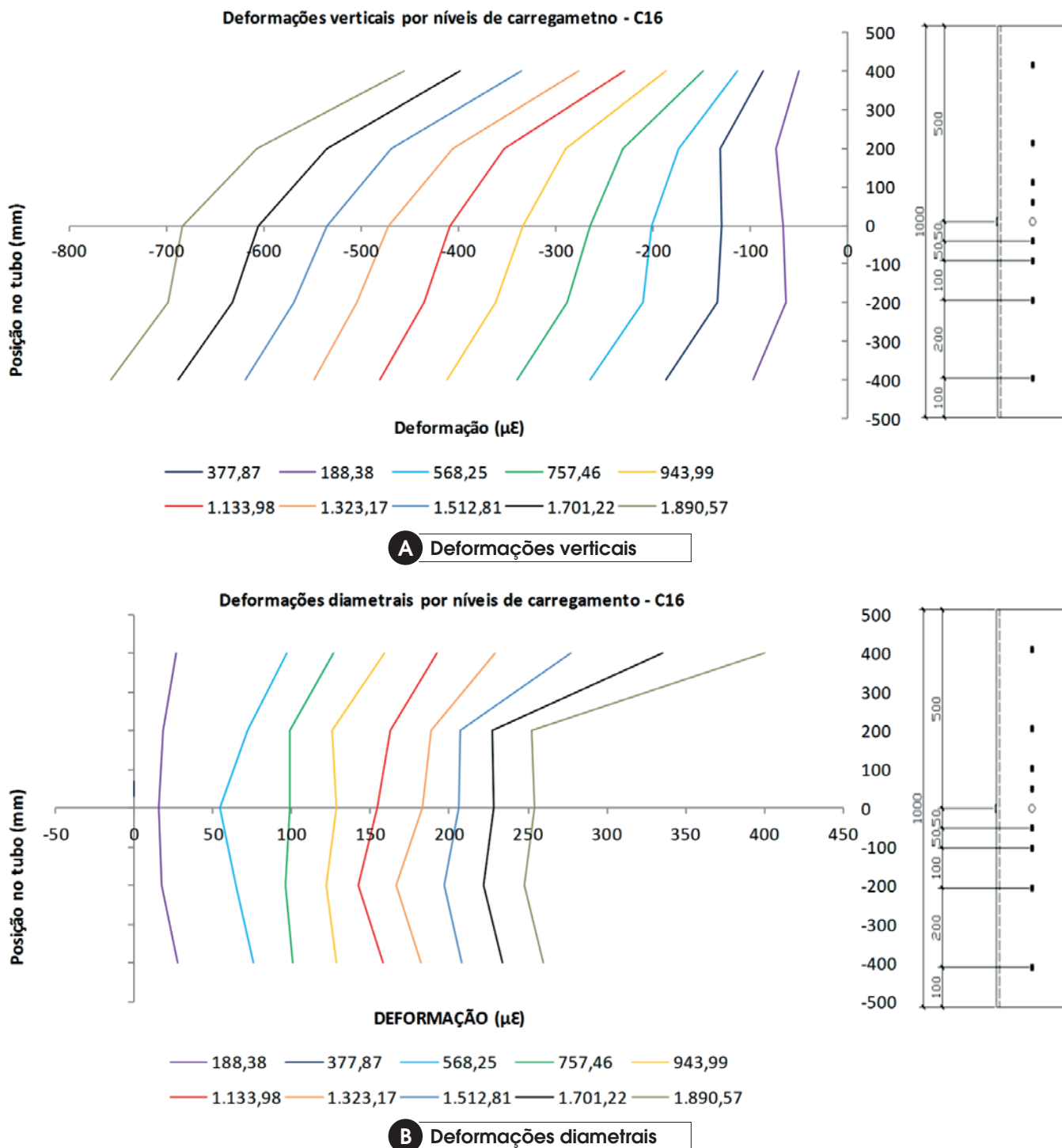


Figure 21
Curvas de distribuição das deformações ao longo do tubo - C16-15,1-SC-25,2

cimento relativo os resultados experimentais das séries A e B, agrupados pela seção do tubo analisado, verificou-se que para o tubo 219x8,2 os conectores de cisalhamento aumentaram a capacidade do elemento e reduziram os deslocamentos. Entretanto, para o tubo de 219x15,1 esse comportamento foi contrário, indicando que a presença de conectores de cisalhamento em alguns casos podem fragilizar a conexão entre a interface aço e concreto. Essa observação não é totalmente conclusiva, necessitando de mais análises.

6. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem aos órgãos de fomento CNPq, CAPES, FAPEMIG, e a empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil. À PUC-GO e principalmente à UFOP pelo apoio logístico e financeiro.

7. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. - NBR 16239, Rio de Janeiro, 2014.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. - NBR 8800, Rio de Janeiro, 2008.
- [3] OLIVEIRA, W. L. A. Análise teórico - experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular, São Carlos, 2008, Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 251 p.
- [4] JOHANSSON, M. Composite action in connection regions of concrete-filled steel tube columns. *Steel and composites Structures*, v. 3, n. 1, 2003.
- [5] ROEDER, C. W., CAMERON, B., BROWN, C. B. Composite action in concrete filled tubes. *Journal of Structural Engineering*, v. 125, n. 5, p. 477-484, 1999.
- [6] CODEME, E. Edifício para hotel. Guaratinguetá - SP, 2012.
- [7] VERÍSSIMO, G. S. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Belo Horizonte, 2007, Tese (doutorado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 316 p.
- [8] SIMÕES, R.. Efeito do confinamento em pilares mistos curtos de aço e concreto. Campinas, 2008, Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 152 p.
- [9] NGUYEN, H. T. e KIM, S. E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 6, p. 273-284, 2009.
- [10] JACOBS, W.P. e HAJJAR, J. F. Load transfer in composite constructions. ASCE 2010 Structures Congress, Orlando, Flórida, 2010.
- [11] BEZERRA, L. M.. Estudo Teórico Experimental da ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas pré-moldadas de concreto. São Carlos, Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 260 p.
- [12] ALMEIDA, P. H. F. Modelo numérico para um dispositivo de transferência de carga em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto. Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE, Ouro Preto, 2011.
- [13] STAROSSEK, U. e FALAH, N. The interaction of steel tube and concrete core in concrete-filled steel tube columns. *Tubular Structures XII*, London, 2011.
- [14] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. Design of composite steel and concrete structures. EURO-CODE 4, Brussels, 2001.
- [15] DAVID, D. L.. Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas. São Carlos, Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 250 p.