



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---

**Camila Alejandra Cid Bustamante**

**EFICIÊNCIA DE PARAFUSOS COMO CONECTORES DE  
CISALHAMENTO EM PILAR RETANGULAR MISTO  
PREENCHIDO COM CONCRETO**

Ouro Preto

2022

Eficiência De Parafusos Como Conectores De Cisalhamento Em Pilar Retangular  
Misto Preenchido Com Concreto.

Camila Alejandra Cid Bustamante

Monografia de conclusão de curso para  
obtenção do grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto  
defendida e aprovada em 21 de junho de  
2022 como parte dos requisitos para a  
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientadoras:

Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho - UFOP

Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Ellen Martins Xavier – CEFET MG Unidade Timóteo

Ouro Preto

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B982e Bustamante, Camila Alejandra Cid.  
Eficiência de Parafusos Como Conectores de Cisalhamento Em Pilar  
Retangular Misto Preenchido Com Concreto. [manuscrito] / Camila  
Alejandra Cid Bustamante. - 2022.  
84 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadores: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho, Ma. Ellen  
Martins Xavier.

Coorientador:  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Colunas - Estrutura mista. 2. Construção mista. 3. Cisalhamento -  
Conector de. 4. Parafusos. 5. Colunas - Tubular Retangular. 6. Construção  
de concreto. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II. Xavier, Ellen Martins. III.  
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Camila Alejandra Cid Bustamante**

EFICIÊNCIA DE PARAFUSOS COMO CONECTORES DE CISALHAMENTO EM PILAR RETANGULAR MISTO PREENCHIDO COM CONCRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 21 de junho de 2022

### Membros da banca

Profa. DSc. Arlene Maria Cunha Sarmanho - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Profa. MSc. Ellen Martins Xavier - Orientadora (CEFET MG (Unidade Timóteo))  
Prof. DSc. Vinicius Nicchio Alves (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Engo. MSc. Gilney Afonso Gonçalves (Universidade Federal de Ouro Preto)

Arlene Maria Cunha Sarmanho, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Arlene Maria Cunha Sarmanho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/06/2022, às 13:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0354230** e o código CRC **F334F433**.

*Dedico este trabalho à minha família que sempre me apoiou e não mediram esforços para me ajudar a alcançar meus objetivos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Durante minha graduação foram muitos os que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. Começo agradecendo ao grupo PET Civil UFOP, que muito me ensinou e me permitiu ensinar, me fez ganhar confiança, acreditar no meu potencial, e amadurecer profissionalmente. Agradeço aos meus amigos que contribuíram no dia a dia, me dando apoio e tornando a trajetória mais leve. Agradeço também à minha família, que me ajudou incansavelmente, mantendo o equilíbrio entre estudos e lazer. Agradeço aos meus supervisores de estágio, e aos meus orientadores de iniciação científica, que estiveram sempre dispostos a me ensinar e me aconselhar. Agradeço também às minhas orientadoras de Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço ainda a oportunidade de aprender no laboratório de Materiais de Construção, na iniciação científica, com o grupo ATIVE, e também ao Laboratório de Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de Ouro Preto, onde fiz meus ensaios para a elaboração deste trabalho.

Concluo agradecendo a todos os professores, que sempre se mostraram dispostos a colaborar para o meu crescimento.

## RESUMO

A união do aço e do concreto em estruturas mistas, trabalhando de maneira solidária, permite somar suas vantagens desde que se garanta a transmissão de esforços entre esses materiais. Visto isso, verifica-se a importância de estudar o comportamento dos parafusos como conectores de cisalhamento na interface entre o aço e o concreto das estruturas mistas. Contudo, os resultados de alguns estudos demonstraram que as formulações normativas da ABNT NBR 16239:2013 para o dimensionamento desse tipo de conector em pilar misto preenchido com concreto (PMPC) são conservadoras. Este trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente dois protótipos de PMPC retangulares, com diâmetros e disposições diferentes, sendo executado o ensaio de cisalhamento direto adaptado para verificar o comportamento dos conectores parafuso na transferência de carga entre o aço e o concreto. Com os resultados experimentais obtidos foram analisadas a influência da quantidade de parafusos, do diâmetro e da disposição destes, da espessura da parede do tubo de aço, e também o modo de falha, a partir da comparação entre os resultados desse trabalho e os obtidos na tese em andamento de Xavier (2022). Os resultados experimentais também foram comparados com os resultados das equações normativas da ABNT NBR 16239:2013, confirmando que essas também são conservadoras para este caso. Visto isso, foram discutidas adaptações à essas equações, propostas por Xavier (2017), considerando a tensão de confinamento do concreto pelas formulações da ABNT NBR 8800: 2008 e EN 1994-1-1:2004. Analisando os resultados concluiu-se que aumentando o diâmetro do parafuso, ou a espessura da parede do tubo de aço, aumenta-se a capacidade de transferência de carga do parafuso. Verificou-se também que a disposição dos parafusos em duas alturas diferentes afeta a taxa de contribuição dos mesmos, e que quanto maior a quantidade de parafusos, maior a carga suportada pelo protótipo, mas não de forma proporcional. Conclui-se também que as equações da ABNT NBR 16239:2013 considerando o confinamento localizado do concreto pela EN 1994-1-1:2004, são as mais representativas.

Palavras-chaves: Estrutura mista, Pilar misto preenchido com concreto, Conector de cisalhamento, Parafuso, Pilar Tubular Retangular.

## ABSTRACT

The union of steel and concrete in composite structures, working in a solidary manner, allows adding their advantages provided that the transmission of efforts between these materials is ensured. Given this, it is important to study the behavior of bolts as shear connectors at the interface between steel and concrete of composite structures. However, the results of some studies have shown that the normative formulations of ABNT NBR 16239:2013 for dimensioning this type of connector in composite concrete-filled steel tubular columns (CFT) are conservative. This work aims to experimentally analyze two prototypes of rectangular CFT, with different diameters and arrangements, and it is performed the push-out test adapted to verify the behavior of bolt connectors in the load transfer between steel and concrete. With the experimental results obtained, we analyzed the influence of the number of bolts, the diameter, and arrangement of these bolts, the thickness of the steel pipe wall, and also the mode of failure, from the comparison between the results of this work and those obtained in Xavier (2022)'s thesis, in ongoing. The experimental results were also compared with the results of the normative equations of ABNT NBR 16239:2013, confirming that these are also conservative for this case. Given this, adaptations to these equations were discussed, proposed by Xavier (2017), considering the confinement effect of concrete by the formulations of ABNT NBR 8800: 2008 and EN 1994-1-1:2004. Analyzing the results, it was concluded that by increasing the diameter of the bolts, or the thickness of the steel pipe wall, the load transfer capacity of the bolt was increased. It was also verified that the arrangement of the bolts at two different heights affects their contribution rate and that the higher the number of bolts, the higher the load supported by the prototype, but not proportionally. It is also concluded that the equations of ABNT NBR 16239:2013 considering the localized confinement of concrete by EN 1994-1-1:2004, are the most representative.

Keywords: Structures compose, Concrete-filled tube columns, Shear connectors, Bolts; Rectangular tubular columns.

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	11
1.1	Objetivo .....	15
1.2	Justificativa .....	15
2	Revisão Bibliográfica.....	17
2.1	Pilares Mistos .....	17
2.2	Confinamento em Pilares Mistos Preenchidos com Concreto .....	18
2.3	Regiões de Introdução de Cargas .....	22
2.4	Ensaio de Cisalhamento Direto (Push-Out) .....	24
2.5	Classificação dos conectores .....	25
2.6	Parafusos utilizados como conectores de cisalhamento em pilar misto preenchido por concreto .....	26
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	32
3.1	Especificações Dos Protótipos .....	32
3.2	Fabricação dos Protótipos .....	34
3.2.1	Preparação dos Tubos de Aço.....	35
3.2.2	Dosagem e Fabricação do Concreto.....	35
3.2.3	Técnica de Concretagem .....	36
3.3	Caracterização dos Materiais .....	38
3.3.1	Caracterização do Aço do Perfil Tubular.....	38
3.3.2	Caracterização dos Parafusos .....	39
3.3.3	Caracterização do Concreto.....	40

3.4	Metodologia de Ensaio .....	41
3.4.1	Equipamentos .....	41
3.4.2	Centralização dos Protótipos na Prensa e Transmissão de Esforços 41	
3.4.3	Instrumentação .....	43
3.4.4	Aquisição de dados .....	46
3.4.5	Aplicação das cargas .....	47
4	Resultados e discussões.....	48
4.1	Apresentação e análise dos resultados experimentais.....	48
4.2	Comparação dos resultados .....	62
5	Conclusão .....	75
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	77
6	Referências Bibliográficas.....	79

# 1 INTRODUÇÃO

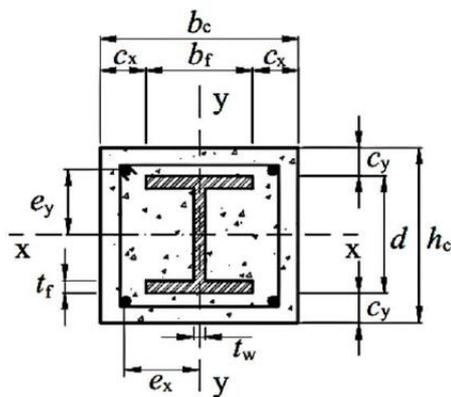
A utilização tanto do aço, quanto do concreto na construção civil já se consagrou e tem sido aplicada há anos. Contudo, o uso desses materiais, de forma conjunta, na construção de elementos estruturais mistos tem sido trabalhado há pouco mais de 60 anos (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). Vale ressaltar que, para o bom desempenho desses elementos mistos, é fundamental garantir que ambos os materiais atuem de forma solidária e conjunta (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012).

Os elementos estruturais mistos de aço e concreto são constituídos por um perfil de aço, podendo este ser laminado, soldado ou formado a frio; junto do concreto, que por sua vez pode ser armado ou não (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). Esses elementos são usualmente aplicados em pilares, vigas, lajes ou ligações, na construção de edifícios e pontes (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). São ainda indicados para galpões, por reduzir custos se comparados a pilares de aço e concreto pré-moldados (NARDIN e DEBS, 2007).

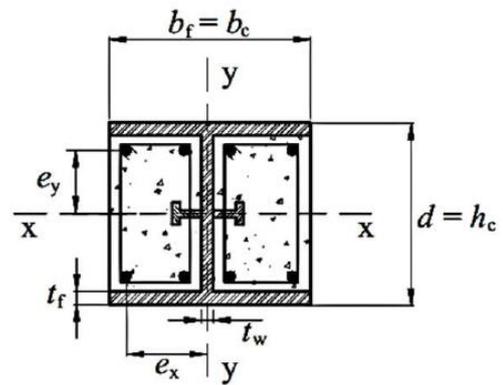
O emprego das estruturas mistas dispõe de vantagens arquitetônicas e econômicas: minimizam gastos com fôrmas, escoramentos, fundação (por reduzir o peso próprio das estruturas), mão de obra, consumo de aço estrutural, aplicação de proteções contra incêndio e corrosão (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). Além disso, apresentam ainda como benefícios o aumento na precisão dimensional da construção, bem como o aumento na rigidez da estrutura se comparada às estruturas de aço (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012).

Estruturas de aço proporcionam altas resistências à tração e ductilidade, enquanto que estruturas de concreto fornecem rigidez e alta resistência à compressão (GIAKOUHELIS e LAM, 2004). Com isso, a união desses materiais, trabalhando de maneira conjunta, proporciona a união das vantagens ofertadas individualmente por cada material (GIAKOUHELIS e LAM, 2004) o que permite construir pilares com menor dimensão, com características melhores que pilares de mesma seção produzidos com materiais convencionais. Os pilares mistos podem ser totalmente

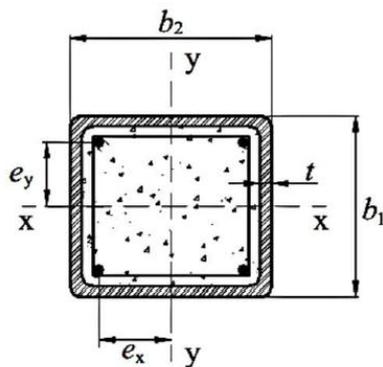
(Figura 1-a) ou parcialmente revestidos (Figura 1-b) com concreto, sendo usualmente utilizado o perfil I. Os pilares mistos podem ser ainda classificados como pilares mistos preenchidos com concreto (PMPCs), sendo utilizados perfis tubulares em aço de seção retangular, quadrada (Figura 1-c) ou circular (Figura 1-d) (GIAKOUMELIS e LAM, 2004). Dentre essas opções, a utilização de pilares mistos preenchidos torna-se interessante por ser menos trabalhosa, já que o próprio tubo funciona como fôrma durante a concretagem (GIAKOUMELIS e LAM, 2004). Além disso, o perfil de aço garante uma resistência inicial enquanto ainda não foi feita a concretagem e enquanto o concreto não adquiriu resistência (GIAKOUMELIS e LAM, 2004). Uma outra vantagem é a economia de custo, por reduzir o tamanho da seção transversal (GIAKOUMELIS e LAM, 2004).



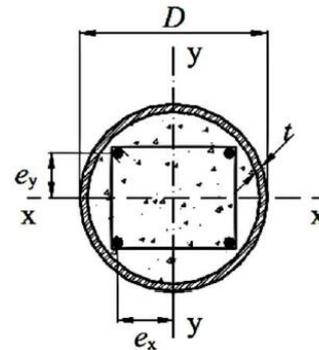
(a) Perfil I de aço totalmente revestido com concreto.



(b) Perfil I de aço parcialmente revestido com concreto.



(c) PMPC retangular.



(d) PMPC circular.

Figura 1 – Representação da seção transversal dos diferentes tipos de pilares mistos.

Fonte: ABNT NBR 8800: 2008.

A solidariedade entre os materiais permite a atuação em conjunto da estrutura mista e é importante para a transferência de forças longitudinais de cisalhamento entre eles (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). Essa transferência de forças pode acontecer por aderência natural ou por meios mecânicos, com a utilização de conectores de cisalhamento (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012).

A aderência natural é composta por três parcelas: a aderência química, o microtravamento e o macrotravamento. A primeira é causada pela ação capilar, durante o processo de hidratação do concreto, mas é responsável por uma parcela

muito baixa da aderência natural, sendo responsável por valores aproximados a 5% (QU, CHEN, *et al.*, 2013). O microtravamento é uma aderência que acontece entre as superfícies de contato do núcleo de concreto e a parede do tubo de aço, gerada devido as rugosidades da superfície do aço e do concreto (VIRDI e DOWLING, 1980). Já o macrotravamento é uma aderência gerada pelas irregularidades geométricas de fabricação do material, irregularidades essas a nível macroscópico (VIRDI e DOWLING, 1980). O macrotravamento só começará a atuar após o microtravamento ser rompido (QU, CHEN, *et al.*, 2013). A diferenciação das parcelas da aderência natural pode ser visualizada e melhor entendida na Figura 2.

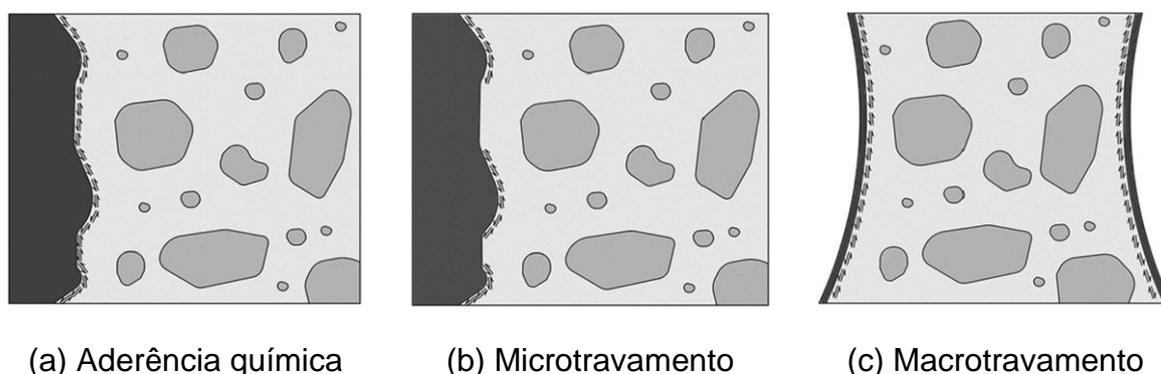


Figura 2 – Componentes da aderência natural.

Fonte: Natali, Xavier, *et al.* (2021)

Os conectores de cisalhamento são mecanismos utilizados para transferir a força de cisalhamento na interface entre o perfil de aço e o concreto, para que assim os dois materiais possam atuar de forma solidária em situações onde a aderência natural seja insuficiente para desempenhar essa função (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). A ABNT NBR 8800: 2008 – “Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios” menciona a necessidade em utilizar conectores em regiões de emendas de pilares e na base desses, devido a interrupção das armaduras longitudinais gerarem pontos de redução da resistência de cálculo. A norma também descreve que trechos entre regiões de introdução de cargas também devem conter conectores, quando as tensões na interface sejam maiores que a tensão de cisalhamento resistente de cálculo  $\tau_{Rd}$ . Mesmo em PMPC, quando existem apenas

forças normais de compressão, na grande maioria dos projetos a aderência entre o aço e o concreto pode não ser o suficiente. Por isso sugere-se a utilização dos conectores de cisalhamento (QUEIROZ, PIMENTA e MARTINS, 2012). Segundo a ABNT NBR 16239:2013 – “Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares”, para PMPCs recomenda-se o uso dos conectores tipo pino com cabeça, também chamados de *stud bolt*, e os parafusos comuns ou de alta resistência.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo desse trabalho é analisar experimentalmente os conectores de cisalhamento do tipo parafuso estrutural em pilares mistos tubulares retangulares de parede fina preenchidos com concreto. Serão feitas análises do comportamento dos parafusos como conectores, avaliando sua capacidade de transferência de carga e o modo de falha a partir da variação da espessura do tubo, do diâmetro, da quantidade e da disposição de parafusos instalados nos protótipos de PMPC. Os resultados experimentais serão comparados com os valores teóricos obtidos pelas equações da ABNT NBR 16239:2013, considerando em algumas análises o efeito do confinamento localizado a partir das equações da EN 1994-1-1:2004 (*Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Parte 1-1: General rules and rules for buildings*) e também o efeito do confinamento proposto na ABNT NBR 8800:2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios). O presente trabalho foi desenvolvido juntamente com a tese de doutorado em andamento de Xavier (2022), e os resultados experimentais dos dois trabalhos serão comparados entre si.

## **1.2 Justificativa**

Por mais que já tenham sido apresentadas até aqui algumas vantagens do uso do PMPC, verifica-se que este tipo de pilar ainda não é muito utilizado nas obras da construção civil.

Existe também um limitado conjunto de estudos a respeito dessas estruturas mistas, em que pouco se conhece seu comportamento quando se trata do uso de conectores de cisalhamento para a transferência de esforços do tubo de aço para o núcleo de concreto. A norma ABNT NBR 16239:2013 recomenda dois tipos de conectores, o tipo pino com cabeça e os parafusos comuns ou de alta resistência. Porém, os estudos de Xavier (2017), Xavier *et al.* (2019), Almeida (2012), Prates (2017), Chaves (2019) mostram que as equações apresentadas por essa norma estão demasiadamente a favor da segurança, sendo conservadoras e distantes dos resultados experimentais. Em decorrência disso, torna-se necessário a realização de mais testes experimentais, com parafusos e tubos com diferentes características dos estudos realizados até agora pela bibliografia. Verifica-se também a necessidade de estudo de PMPCs com tubos retangulares de parede fina, ainda pouco estudados. Este estudo possui experimentos inéditos e complementares ao desenvolvimento de Xavier (2022) com o qual esses resultados serão comparados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Pilares Mistos

O comportamento dos pilares mistos depende da atuação conjunta do aço e do concreto, para que estes suportem esforços de compressão ou flexo-compressão (QUEIROZ, 2003). No Brasil o dimensionamento de estruturas mistas deve ser realizado seguindo as diretrizes da ABNT NBR 8800:2008 – “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”; ABNT NBR 14323:1999 - “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”; e ABNT NBR 16239:2013 – “Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares”. Para que a ABNT NBR 8800:2008 possa ser aplicada, essa norma estabelece algumas hipóteses que precisam ser atendidas. São essas:

- Interação completa entre concreto e aço;
- Uso de concreto com densidade normal;
- As seções precisam ser duplamente simétricas;
- A razão da maior dimensão externa pela menor dimensão externa deve ser inferior a 5;
- O fator de contribuição do aço ( $\delta$ ) deve assumir valores entre 0,2 e 0,9;
- O valor da maior esbeltez relativa do pilar,  $\lambda_{0,m}$ , deve ser inferior a 2;
- Em casos de presença de armadura longitudinal, essas só serão consideradas na resistência da seção quando sua área for equivalente a valores entre 0,3% e 4% da área de concreto. Contudo, telas soldadas não devem ser utilizadas para esses fins;
- Em casos da utilização de armaduras, o projeto delas deve atender às prescrições da ABNT NBR 6118: 2014 – “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”;
- As imperfeições iniciais são compatíveis com a determinação da resistência de barras de aço sujeitas à compressão axial;
- Quando submetidas a força axial e momento fletor, a flambagem local não pode ser considerada como um estado-limite último predominante.

- Não podem ocorrer falhas no pilar decorrentes da instabilidade local devido força normal ou momento fletor. Por isso, para pilares mistos preenchidos com concreto, de seção retangular, devem ser respeitadas as condições expressas na Equação (1):

$$\frac{b_i}{t} \leq 2,26 \left( \frac{E}{f_y} \right)^{0,5} \quad (1)$$

Onde,

$E$  é o modulo de elasticidade do aço;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço;

$b_i$  é a maior dimensão paralela a um eixo de simetria da seção tubular retangular;

$t$  é a espessura do perfil de aço.

A Figura 3, apresentada a seguir, ilustra os parâmetros utilizados na Equação (1):

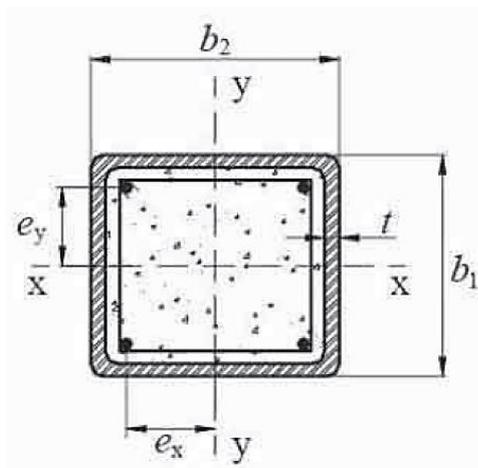


Figura 3 – Perfil de aço retangular preenchido por concreto.

Fonte: Queiroz, Pimenta e Martins (2012)

## 2.2 Confinamento em Pilares Mistos Preenchidos com Concreto

Como mencionado anteriormente, os pilares mistos preenchidos com concreto apresentam mais vantagens quando comparados aos pilares revestidos. Dentre as

vantagens dos PMPCs a principal delas é a possibilidade de obter pilares de alta resistência, devido ao acréscimo de resistência do concreto quando confinado pelo tubo de aço. Na Figura 4, é possível ver um comparativo entre a capacidade do concreto confinado e o concreto não confinado. Contudo, é necessário conhecermos detalhadamente como funciona o efeito do confinamento em PMPCs.

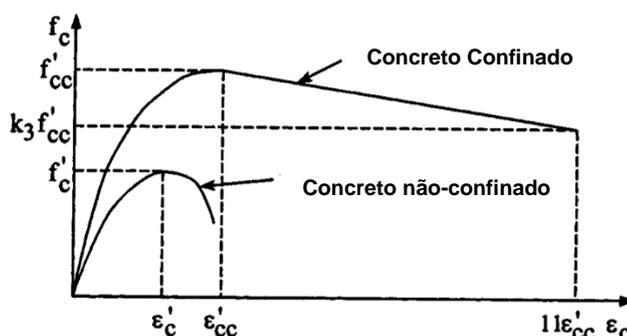


Figura 4 – Curva tensão *versus* deformação axial – comparativo concreto confinado e concreto não-confinado.

Fonte: Modificado de Hu, Huang, *et al.* (2003)

De uma maneira bem simplificada, Oliveira (2008), explica que o concreto, sendo composto por agregados e pasta de cimento, quando submetido a forças de compressão, gera forças internas consequentes da coesão da pasta de cimento (OLIVEIRA, 2008). Rompida essa coesão, inicia-se o processo de microfissuração entre os agregados e a pasta (OLIVEIRA, 2008). Entretanto, quando o concreto está confinado, gera-se uma maior coesão entre as partículas, o que minimiza esse processo de microfissuração e por consequência, contribui para o ganho de resistência (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Oliveira (2008), existem dois tipos de confinamento, o ativo e o passivo. O ativo acontece quando o núcleo de concreto está submetido em toda sua superfície lateral a uma pressão constante (OLIVEIRA, 2008). Já o passivo é decorrente de uma pressão lateral consequente de um carregamento axial (OLIVEIRA, 2008). No caso dos PMPCs então, o confinamento ao qual o núcleo de concreto é submetido quando está sob efeito de carregamentos axiais é o passivo, pela parede do tubo produzir essa pressão lateral quando o concreto expande. Esse efeito pode ser melhor visualizado na Figura 5. Contudo, segundo Susantha, Ge e Usami (2001), quando

submetido a baixos carregamentos, o concreto não estará sujeito a esse efeito de confinamento, por possuir um coeficiente de Poisson inferior ao do aço. No estudo de Oliveira (2008), o autor acrescenta ainda que para carregamentos baixos, a expansão do concreto é baixa, não solicitando portanto o aço. Desse modo, essa solicitação só acontecerá para valores mais elevados de carregamento.

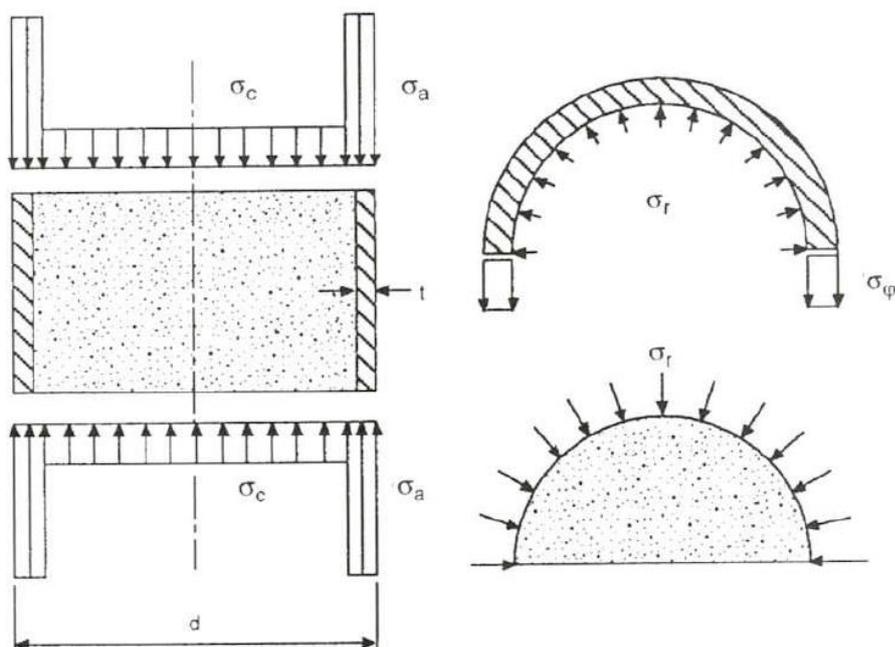


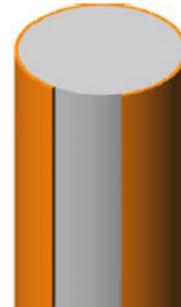
Figura 5 – Efeito do confinamento em PMPCs circulares.

Fonte: Bergmann, Matsui, *et al.* (1995)

Entretanto, o efeito de confinamento apresenta comportamentos diferentes de acordo com o tipo de seção que compõe o PMPC. Assim, para PMPC circular, o concreto apresenta um maior ganho de resistência decorrente do efeito de confinamento do que quando comparados a PMPC de seção quadrada (ZHONG, 2013) (K.A.S.SUSANTHA, GE e USAMI, 2001) e retangular. Essa diferença de comportamento acontece porque os lados do tubo de aço do PMPC de seção quadrada ou retangular, não possuem rigidez o suficiente para suportar a pressão decorrente da expansão do concreto, com isso, o núcleo de concreto só estará sujeito a maior efeito do confinamento na sua região central e nas extremidades, próximo às bordas do tubo, como ilustra a Figura 6 (OLIVEIRA, 2008).



a) Efeito do confinamento em PMPC  
retangular



b) Efeito do confinamento em PMPC  
circular

Figura 6 – Representação do efeito do confinamento para diferentes tipos de seções  
Oliveira (2008).

Contudo, o formato da seção transversal do PMPC não é a única variável influente no efeito do confinamento, existindo ainda a espessura do tubo de aço, a esbeltez do pilar preenchido, a excentricidade da força aplicada, a resistência e deformabilidade dos materiais e o modo como acontecem as introduções de carga na seção (OLIVEIRA, 2008). Quanto maior a espessura do tubo de aço, por exemplo, maior será a capacidade de resistência do parafuso, desde que se mantenha uma razão entre 1,3 e 2,0, do diâmetro do parafuso,  $d_b$ , pela espessura do tubo de aço,  $t$ , (CHAVES, XAVIER, *et al.*, 2021). Entretanto, ao diminuir a razão de  $d_b/t$ , mais carga suportará o parafuso, e mais carga será transmitida ao tubo (CHAVES, XAVIER, *et al.*, 2021). A esbeltez do tubo influencia tanto na rigidez quanto na resistência dos conectores, em decorrência do aumento das tensões de confinamento do concreto (NETO, 2016). Quanto maior a esbeltez do tubo, menor a capacidade de carga e maior será o deslocamento (NETO, 2016). A excentricidade da força aplicada, principalmente em tubos esbeltos, causa um baixo acréscimo de resistência consequente do efeito de confinamento (JOHANSSON, 2002). A resistência à compressão do concreto por sua vez, influencia na ruptura do núcleo do concreto, que impacta no comportamento pós pico do pilar preenchido (JOHANSSON, 2002).

### 2.3 Regiões de Introdução de Cargas

A norma ABNT NBR 8800:2008, especifica as regiões de introdução de cargas e as define como sendo as regiões em que se tem a variação local dos esforços, podendo acontecer tanto em ligações pilar com vigas, quanto em regiões de interrupção da armadura longitudinal, como nas bases dos pilares ou em suas emendas. Para determinar o valor do comprimento de introdução de carga, medida representada na Figura 7, a norma ABNT NBR 8800:2008 estabelece que deve ser adotado o menor valor entre:

- Duas vezes a menor dimensão do pilar;
- Um terço da distância entre os pontos de introdução de carga

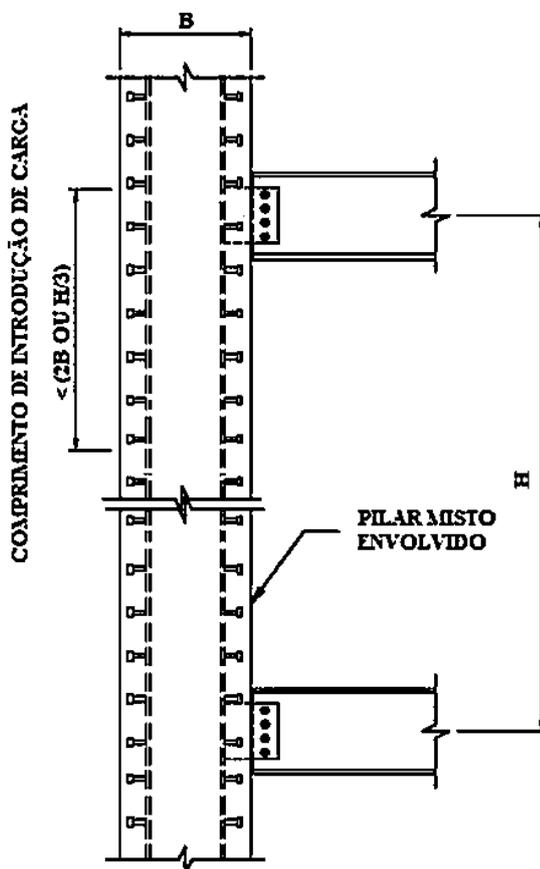


Figura 7 – Comprimento de Introdução de carga.

Fonte: Aguiar (2015)

Para verificarmos a necessidade da utilização ou não de conectores de cisalhamento, devem ser determinados os esforços solicitantes de cálculo  $V_{l,sd}$  e

$M_{l,Sd}$ . Contudo, esses valores, segundo a ABNT NBR 8800:2008, não podem estar acima do valor da tensão de cisalhamento resistente de cálculo ( $\tau_{Rd}$ ) igual a 0,40 para seções tubulares retangulares preenchidas com concreto. Para a determinação dos esforços solicitantes de cálculo a ABNT NBR 8800:2008, estabelece que:

- a) Para vigas ligadas unicamente ao perfil de aço do pilar, os cálculos devem ser de acordo com as equações (2) e (3):

$$V_{l,Sd} = V_{Sd} \left( 1 - \frac{N_{pl,a,Rd}}{N_{pl,Rd}} \right) \quad (2)$$

$$M_{l,Sd} = M_{Sd} \left( 1 - \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \quad (3)$$

- b) Para vigas ligadas unicamente ao núcleo de concreto do pilar, os cálculos devem ser de acordo com as equações (4) e (5):

$$V_{l,Sd} = \frac{V_{Sd} N_{pl,a,Rd}}{N_{pl,Rd}} \quad (4)$$

$$M_{l,Sd} = \frac{M_{Sd} M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (5)$$

Onde:

$V_{Sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo na ligação;

$N_{pl,a,Rd}$  é a força axial resistente de cálculo somente do perfil de aço do pilar à plastificação total;

$N_{pl,Rd}$  é força axial resistente de cálculo da seção transversal do pilar misto à plastificação total;

$M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo na ligação;

$M_{pl,a,Rd}$  é a contribuição do perfil de aço para  $M_{pl,Rd}$   
 $M_{pl,Rd}$  é o momento fletor resistente de plastificação de cálculo do pilar.

## 2.4 Ensaios de Cisalhamento Direto (Push-Out)

O *push-out* é um ensaio padronizado pela norma europeia EN 1994-1-1:2004 (*Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Parte 1-1: General rules and rules for buildings*), que permite verificar a resistência ao cisalhamento e à fadiga dos conectores de cisalhamento tipo *stud bolt* usados em vigas mistas de aço e concreto. Por isso, para análises experimentais de outros tipos de conectores em PMPCs, esse ensaio está sujeito a adaptações para seu melhor desempenho (XAVIER, 2017).

Neto (2016), Xavier (2017) e Xavier, *et al.* (2019) analisaram experimentalmente o uso de conectores tipo parafuso estrutural como conector em PMPCs. Para a verificação da capacidade de transferência de carga desses parafusos conectores, os autores desenvolveram um ensaio de cisalhamento direto adaptado, baseado nas diretrizes da norma europeia *Eurocode 4* com adaptações para os protótipos de PMPC. Esse ensaio adaptado segue metodologia descrita a seguir:

- Antes de dar início ao carregamento, deve ser feita uma aproximação do prato de aplicação de carga com um controle de deslocamento de 2 mm/min, até ser alcançada a carga de 3 kN.
- Posteriormente faz-se cinco ciclos de pré-carga com controle de carga de 10 kN/min, aplicadas exclusivamente sobre o núcleo de concreto do PMPC. Faz-se isso até alcançar-se 40% da carga teórica esperada para os conectores. A aplicação dos ciclos de pré-carga tem como objetivo romper qualquer aderência natural que ainda exista entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, para que assim o único fator influente na transferência de carga entre os dois materiais seja o conector.
- Após as pré-cargas, faz-se o carregamento contínuo dos protótipos, com um controle de deslocamento, pré estabelecido, até o fim do ensaio. Nas pesquisas, esse valor varia entre 0,00225 mm/s e 0,02 mm/s. Utiliza-se

como critério de parada atingir a perda de carga de 20% em relação à leitura de carga máxima atingida no ensaio. Alguns autores estabelecem um segundo critério de parada em caso de não atingirem o primeiro. Neto (2016), por exemplo, usa como segundo critério a aproximação da capacidade de carga máxima do equipamento de ensaio. Xavier (2017) usa como segundo critério, o deslocamento relativo de 35 mm.

## 2.5 Classificação dos conectores

Os conectores podem ser classificados quanto as suas características: rigidez, resistência e ductilidade. A rigidez está associada ao fluxo de cisalhamento longitudinal decorrente da ação conjunta entre tubo de aço e núcleo de concreto, sendo analisada com a relação entre a força resistida do conector e o deslocamento relativo entre os dois materiais, como apresentado na Figura 8 (CARDOSO, 2014). As curvas apresentadas na Figura 8, são obtidas a partir de resultados experimentais de conectores em ensaios de cisalhamento direto (*push-out*), apresentado no item 2.4.

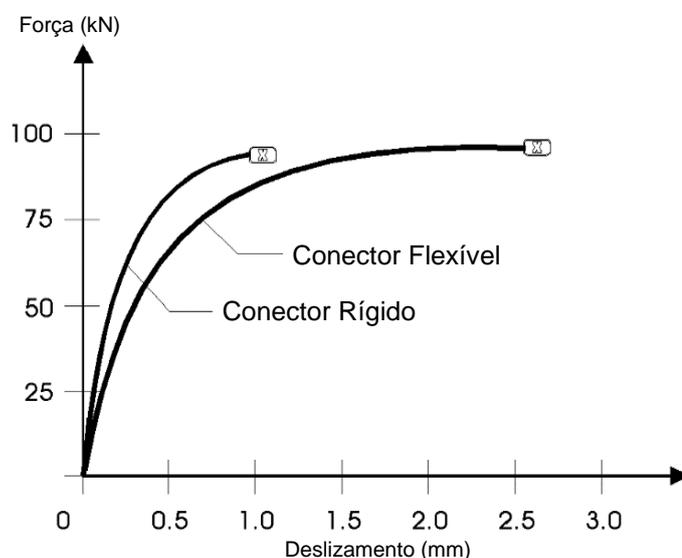


Figura 8 – Curva força *versus* deslocamento relativo

Fonte: Modificado de Rankovic e Drenic (2002).

Com relação à ductilidade, capacidade do conector em se deformar, esta é determinada também avaliando-se o deslocamento relativo entre núcleo de concreto e tubo de aço, podendo ser classificado em dúctil ou frágil (CARDOSO, 2014). A

determinação do deslizamento relativo também é obtida no ensaio *push-out*, sendo classificado como dúctil pela EN 1994-1-2004, quando a capacidade de deslizamento característico ( $\delta_{uk}$ ) for maior ou igual a 6 mm. Para obter-se esse parâmetro, utiliza-se 90% do menor valor de  $\delta_u$ , que é o deslocamento relativo correspondente à força característica aplicada ao conector, sendo a força característica igual a 90% da carga de ruptura. Ou então faz-se uma análise estatística de todos os dados obtidos (CARDOSO, 2014). Na Figura 9, são apresentadas as curvas de Força *versus* Deslocamento relativo, para a classificação dos conectores em rígido, flexível, frágil ou dúctil.

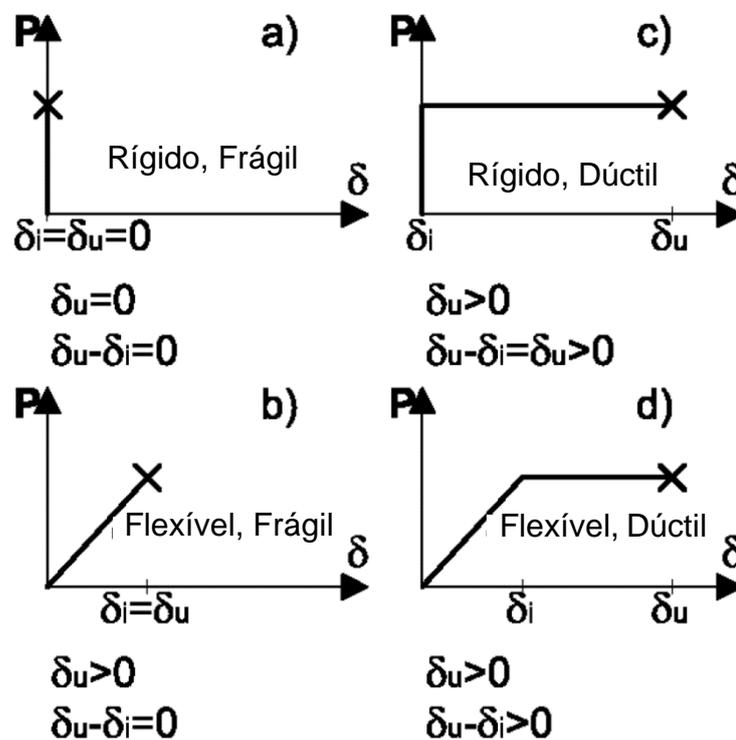


Figura 9 – Comportamento dos conectores

Fonte: Modifica de Bartschi (2005).

## 2.6 Parafusos utilizados como conectores de cisalhamento em pilar misto preenchido por concreto

Como mencionado anteriormente, são diversos os tipos de conectores utilizados para transmitir as cargas e assim permitir que os materiais trabalhem de maneira conjunta. Contudo, a ABNT NBR 16239:2013 apresenta formulações para o

dimensionamento de apenas dois tipos de conectores em PMPCs: os parafusos comuns ou de alta resistência e os conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, também denominado de *stud bolt*.

O uso de parafusos como conectores de cisalhamento em PMPCs apresenta algumas vantagens se comparados ao *stud bolt*, como não precisar do uso de solda para sua fixação, o que facilita sua instalação dentro do tubo de aço e diminui os custos de execução (CARDOSO, 2014).

Para calcular a força resistente de cálculo por conector ( $V_{Rd}$ ), a norma ABNT NBR 16239:2013 especifica a utilização das equações (6) e (7) apresentadas a seguir:

$$V_{Rd} = l_b d_b \sigma_{c,Rd} \leq 5 d_b^2 \sigma_{c,Rd} \quad (6)$$

$$V_{Rd} = 0,4 \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2 f_{ub}}{\gamma_{a2}} \leq 2,4 d_b t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{a2}} \quad (7)$$

Onde:

$l_b$  e  $d_b$  são o comprimento líquido (descontando-se a espessura da parede do tubo) e o diâmetro dos parafusos, respectivamente;

$t$  é a espessura da parede do tubo;

$f_u$  e  $f_{ub}$ , são respectivamente, a resistência à ruptura do aço do tubo e do parafuso;

$\gamma_{a2}$  é o coeficiente de ponderação;

$\sigma_{c,Rd}$  é a tensão do concreto resistente de cálculo, determinada pela Equação (8):

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \quad (8)$$

Onde:

$$\frac{A_2}{A_1} = 4$$

$A_1$  é a área carregada sob a placa de apoio;

$A_2$  é a área da superfície de concreto;

$\gamma_c$  é o coeficiente de ponderação relacionado à resistência do concreto;

$\gamma_n$  é um coeficiente de comportamento, igual a 1,40.

$f_{ck}$  é a resistência característica do concreto à compressão.

Na Equação (6) verifica-se o modo de falha do esmagamento do concreto na região do parafuso, limitando a área de contato do parafuso com o concreto em cinco vezes o seu diâmetro ao quadrado. Já na Equação (7), verifica-se os modos de falha de ruptura por cisalhamento do parafuso e esmagamento da parede do tubo de aço no furo. Assim, a ABNT NBR 16239:2013 determina que a força resistente de cálculo por conector é o menor valor obtido entre essas equações.

São conectores ideais, segundo Almeida (2012), aqueles com comportamento rígido e dúctil, em que a rigidez contribua quando submetido a resistências de estado de serviço, permitindo pouco ou nenhum deslizamento e a ductilidade contribua no estado de limite último.

Neto (2016) em seu estudo realizou análises experimentais do uso dos parafusos como conectores de cisalhamento em PMPCs circulares. Neto (2016) mostrou em sua pesquisa a eficiência dos conectores como transmissores de esforços e demonstrou que de fato as equações da norma ABNT NBR 16239:2013 estão a favor da segurança, porém são conservadoras, solicitando ajustes para aproximar-se dos valores experimentais. Em seu estudo, evidencia-se que o acréscimo de capacidade de carga dos conectores não é proporcional ao número de parafusos inseridos no protótipo. Segundo Neto (2016), uma das possíveis razões para isso é que a distância de seis vezes o diâmetro, sugerido por norma, não garante a não influência de um parafuso sobre o outro. O autor concluiu ainda que a esbeltez do tubo de aço é um parâmetro influente na capacidade de transferência de carga do parafuso e na rigidez, visto que ao diminuir a espessura do tubo, aumenta-se a esbeltez, e diminui-se a

capacidade de carga do conector, havendo ainda um aumento do deslocamento relativo entre núcleo de concreto e tubo de aço. Neto (2016) também conclui que folgas nos furos não impactam significativamente na capacidade de transferência de carga dos conectores. O autor ainda cita a evidência de tensões de confinamento, e a influência na aderência natural do modelo, comprovada nos protótipos sem conectores. Além disso, mostra que o uso de conectores em situações onde a aderência natural é suficiente, provoca uma redução na capacidade de carga do pilar. Outro fator importante é que o autor recomenda a utilização de graxa nas paredes internas do tubo de aço, sendo o suficiente para reduzir bem a aderência natural.

Nas análises experimentais de Xavier, *et al.* (2019) concluiu-se que há um aumento da capacidade de transferência de carga dos parafusos quando se aumenta o diâmetro do parafuso de 1/2" para 5/8". Entretanto, quando o aumento diametral foi de 5/8" para 3/4" não foi observado um aumento significativo na capacidade de transferência de carga do conector. Xavier, *et al.* (2019) concluíram também que quanto maior o comprimento do parafuso, maior é a sua capacidade de transferência de carga, não sendo significativo esse aumento em casos de conectores mais rígidos (com maior diâmetro). Já a utilização de uma ou duas linhas de conectores, segundo Xavier, *et al.* (2019), não influencia na capacidade de transferência de carga de cada parafuso, desde que se respeite as distâncias mínimas recomendadas pela ABNT NBR 16239:2013. Ou seja, ao se utilizar o dobro da quantidade de parafusos, em duas linhas, o aumento da capacidade resistente do protótipo no ensaio experimental também foi o dobro. Verificou-se apenas que o uso de uma linha a mais de parafusos proporciona um aumento na rigidez da conexão. Os autores ainda constataram que o aumento da resistência média do concreto não interfere significativamente na capacidade de transferência de carga do parafuso. Xavier, *et al.* (2019) concluiu que as equações da ABNT NBR 16239:2013 são muito conservadoras e estão excessivamente a favor da segurança, justificando isso ao fato dessa norma brasileira não considerar o efeito do confinamento, sugerindo adequações às equações de acordo com recomendações da EN 1994-1-1-2004. Sugeriu-se também um ajuste na equação da ABNT NBR 16239:2013 referente ao modo de falha por cisalhamento do parafuso, alterando o fator de 0,4 para 0,5, para assim considerar o cisalhamento na região do fuste do parafuso (e não na região da rosca) e assim obter uma melhor

adequação aos resultados experimentais. Comparando os resultados experimentais e teóricos os autores notaram que provavelmente o modo de falha que ocorre nos protótipos analisados inicia-se pelo cisalhamento do parafuso, para um posterior esmagamento do concreto e escoamento do tubo de aço. Por fim, os autores concluem que os conectores de maior comprimento e maior diâmetro possuem maior capacidade de transferência de carga. Porém, a rigidez em excesso nesse tipo de conector provoca falha por esmagamento do concreto abaixo do parafuso, e que a ductilidade dos parafusos é interessante por permitir a esses deformarem e redistribuírem os esforços entre os materiais.

No estudo de Xavier (2017), a autora também comprovou a eficiência dos parafusos conectores como transmissores de esforços para PMPCs retangulares, com todos apresentando comportamento dúctil, o que garante a boa capacidade de deformação e permite redistribuir os esforços no conector em regime plástico. Xavier (2017) também verificou que as equações da ABNT NBR 16239:2013 estão a favor da segurança porém são conservadoras, necessitando de uma adequação para melhor representar os valores obtidos experimentalmente, apresentando como possível justificativa o efeito do confinamento não ser considerado nas equações da norma. A autora então considerou tal efeito nas equações e obteve valores mais próximos dos experimentais. Xavier (2017) concluiu em seu estudo também que o aumento do diâmetro do parafuso aumenta a capacidade de transferência de carga do conector. Ao aumentar a quantidade de parafusos instalados em uma única linha de conectores, utilizando o dobro de parafusos, não ocorreu aumento proporcional da transferência de carga, ou seja, a capacidade resistente ao cisalhamento do protótipo aumentou, mas não foi o dobro. Verificou-se também que os protótipos de com seção do tubo mais esbelta (maior valor de  $b_i/t$ ), apresentaram uma menor capacidade de transferência de carga por parafuso, justificado pelo menor efeito de confinamento que ocorre nesses casos quando comparado aos protótipo de seção menos esbelta.

Chaves *et al.* (2021) verificam em seu estudo que o comprimento do parafuso e a resistência do concreto não são fatores significativos para a capacidade de resistência do conector. Entretanto, parafusos com menor comprimento apresentam maiores danos no concreto ao redor da extremidade do conector. Os autores avaliam também

a influência da espessura do tubo de aço sobre o comportamento dos parafusos como conectores e concluem que aumentar a espessura, proporciona um aumento na capacidade de carga dos parafusos, desde que se tenha uma razão entre diâmetro do parafuso,  $d_b$ , e espessura da parede do tubo,  $t$ , variando entre 1,3 e 2,0. Segundo os autores, a diminuição da relação  $d_b/t$  gera um acréscimo na capacidade de carga por parafuso, e o aumento da razão  $d_b/t$  gera um acréscimo na carga aplicada no aço do tubo. Chaves *et al.* (2021), conclui ainda que aumentar a distância entre conectores não afeta a capacidade de carga destes, mostrando que a distância de seis vezes o diâmetro do conector, é suficiente para impedir a interferência da área de atuação de um parafuso sobre o outro.

No estudo de Prates (2017), o autor estuda a utilização de parafusos como conectores, instalados com rebite. Segundo o autor, alguns aspectos que influenciam no comportamento do parafuso são a espessura e a resistência do tubo, as dimensões da seção, e o comprimento do fuste. O autor também cita os valores conservadores da norma ABNT NBR 16239:2013, e apresenta resultados mais próximos do real ao considerar o efeito do confinamento de acordo com os ajustes sugeridos pela norma europeia EN 1994-1-1-2004.

Chaves (2019) em seu estudo verifica que o espaçamento sugerido pela ABNT NBR 16239:2013, equivalente a seis vezes o diâmetro do parafuso, é suficiente para não haver acúmulo de tensões nas regiões entre os conectores. A autora também conclui que não há influência do comprimento dos parafusos sobre a capacidade de transferência de carga dos conectores. Entretanto, a espessura afeta o desempenho destes, onde quanto maior a espessura, maior será a carga suportada por eles, desde que se tenha uma compatibilidade entre os materiais. A autora também cita a necessidade em se manter a relação de  $d_b/t$  entre os limites 1,3 e 2,0. Quanto à quantidade de parafusos, ela define que o ganho de resistência não é proporcional ao número de parafusos, visto que a disposição destes impacta sobre a capacidade de carga. Assim, a autora defende que quando os conectores são dispostos em duas linhas, há uma maior capacidade de carga por conector, e que quando distribuídos em uma única linha, ao atingirem uma determinada carga, os conectores passam a ter influência de um sobre os outros, havendo um acúmulo de tensões.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Especificações Dos Protótipos

Para a análise experimental deste estudo foram fabricados dois protótipos de pilar misto com tubo de seção retangular preenchidos com concreto convencional, utilizando parafusos estruturais como conectores de cisalhamento para transferência de esforços entre o aço e o concreto. Foram utilizados tubos de aço conformados a frio, com costura, com dimensões da seção transversal ( $B_1 \times B_2 \times t$ ) de 120 mm x 80 mm x 4,75 mm, representadas na Figura 10 a seguir.

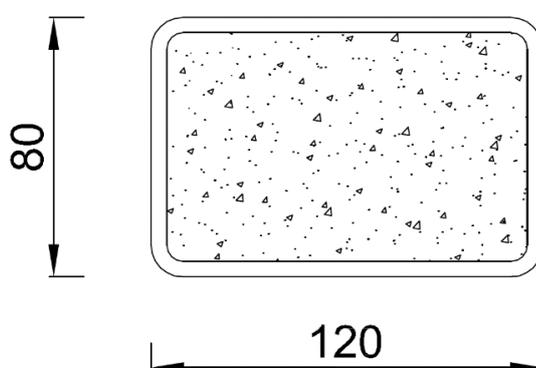


Figura 10 – Dimensões da seção transversal dos protótipos em milímetros.

A nomenclatura utilizada para identificar os protótipos analisados nesse trabalho leva em consideração a nomenclatura adotada para a identificação dos protótipos de Xavier (2022), tese de doutorado feita em paralelo com esse estudo. O conjunto “4P” refere-se à quantidade de 4 parafusos instalados nos protótipos. Entre parênteses tem-se o diâmetro dos parafusos, de 10 mm ou 12 mm, seguido pela letra “r” de identificação para parafusos retos. A parte “t4,75”, expressa a espessura do tubo retangular. E por fim, o asterisco (\*) é utilizado para diferenciar os protótipos deste trabalho com os protótipos de mesmas características, de Xavier (2022).

O primeiro protótipo, denominado de 4P(10r)-t4,75\*, foi fabricado com o tubo de 500 mm de altura e quatro parafusos de 10 mm de diâmetro instalados em uma única altura de plano da seção transversal do protótipo. Os parafusos foram colocados nas

paredes de maior dimensão da seção transversal, dois parafusos em cada lado oposto, como ilustra a Figura 11.

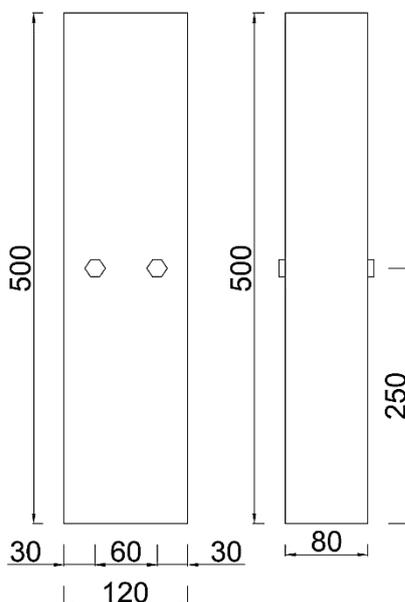


Figura 11 – Representação esquemática do protótipo 4P(10r)-t 4,75\*: dimensões do protótipo em milímetros e disposição dos parafusos.

O segundo protótipo, denominado de 4P(12r)-t4,75\*, também foi fabricado com o tubo de 500 mm de altura e quatro parafusos, porém de 12 mm de diâmetro cada. Os parafusos foram instalados nas paredes de maior dimensão da seção transversal, dois parafusos em cada lado oposto, entretanto, a instalação destes foi feita em duas alturas de plano da seção transversal do pilar, como ilustra a Figura 12.

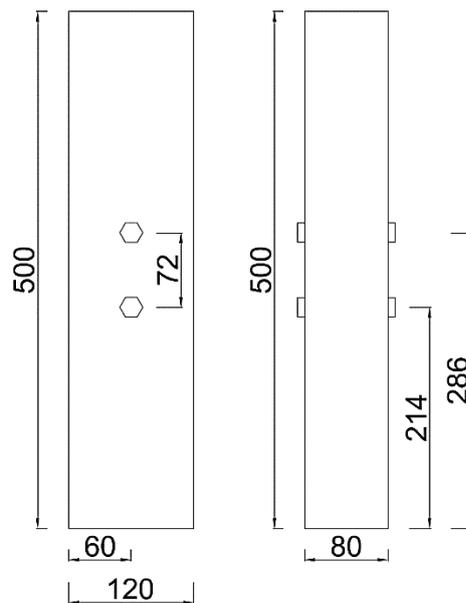


Figura 12 – Representação esquemática do protótipo 4P(12r)-t4,75\*: dimensões do protótipo em milímetros e disposição dos parafusos.

A ABNT NBR 8800:2008, especifica que a relação entre a altura e a largura da seção transversal mista de um tubo retangular deve assumir valores entre 0,2 e 5,0. A norma ABNT NBR 16239:2013 estabelece que a distância entre os conectores parafuso deve ser igual ou superior a seis vezes o seu diâmetro. Por isso, nos protótipos analisados os parafusos foram instalados a uma distância mínima de 60 mm para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*, e 72 mm para o protótipo 4P(12r)-t4,75\*. Essa distribuição está representada na Figura 11 e na Figura 12.

Com o intuito de entender melhor o comportamento dos parafusos, os resultados obtidos no presente trabalho também serão comparados com os resultados de Xavier (2022).

### 3.2 Fabricação dos Protótipos

A fabricação dos protótipos pode ser resumida nas etapas de: preparação dos tubos de aço do PMPC; dosagem e fabricação do concreto e a concretagem. Estas serão explicadas nos tópicos a seguir.

### 3.2.1 Preparação dos Tubos de Aço

Todos os tubos foram cortados com um comprimento longitudinal de 500 mm. Para que os ensaios sejam desenvolvidos de forma correta, é importante que as regiões cortadas dos tubos estejam com a superfície regular e sem inclinação de corte. Portanto, após realizado o corte dos tubos foi verificado se eles possuíam um ângulo de 90° entre a superfície de corte e as paredes laterais do tubo. Caso não tivessem, as superfícies cortadas deveriam ser lixadas até atingirem a angulação correta.

Foi necessário ainda fazer os furos no tubo, para a posterior instalação dos parafusos. Para isso foram utilizadas uma furadeira com broca de 10 mm, para os parafusos do mesmo diâmetro, e uma broca de 12 mm, para os conectores com esse diâmetro. A disposição dos furos pode ser visualizada na representação esquemática dos protótipos na Figura 11 e na Figura 12.

### 3.2.2 Dosagem e Fabricação do Concreto

Para definir-se o traço do concreto, foi utilizado o método IPT, baseando-se no teor de argamassa calculado pelo método ABCP, pelo *software* Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias versão 1.1.0, desenvolvido por Soares (2009), em parceria com o grupo de pesquisas RECICLOS. A dosagem foi feita respeitando a classe de resistência do concreto de C20 ( $f_{ck} = 20\text{MPa}$ ) aos 7 dias de cura, e o traço obtido em massa, apresentado na forma Cimento: Agregado Miúdo: Agregado Graúdo 1: Agregado Graúdo 2, foi de 1: 2,12:0,86;2,02, com relação água/cimento (a/c) de 0,63. Para isso, foi utilizado o Cimento Portland CP V- ARI MAX, sem aditivos à mistura. Já os agregados utilizados foram:

- Agregado miúdo, areia, com dimensão máxima de 4,80 mm;
- Agregado graúdo (1), brita 0, com dimensão máxima de 12 mm;
- Agregado graúdo (2), brita 1, com dimensão máxima de 25 mm.

Para verificar-se a trabalhabilidade desse concreto, fez-se o ensaio *Slump Test*, seguindo as especificações estabelecidas pela norma ABNT NBR 16889:2020 –

“Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”. Como resultado, obteve-se um abatimento de 85 mm.

### **3.2.3 Técnica de Concretagem**

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento e a capacidade de transferência de carga do conector tipo parafuso estrutural, é fundamental evitar outras aderências entre o aço e o concreto, bem como permitir o deslocamento do núcleo de concreto dentro do tubo de aço. Para permitir o deslocamento do concreto dentro do tubo, em ambos os protótipos, foram colocadas uma placa de poliestireno expandido (Isopor®) na parte inferior de cada tubo antes da concretagem, como apresentado na (a)-a. Essa placa possuía dimensões de 120 mm x 80 mm e espessura de 60 mm, e foi retirada após o processo de cura do concreto, deixando um vazio na extremidade inferior do protótipo para assim permitir o deslocamento do concreto em relação ao tubo de aço.

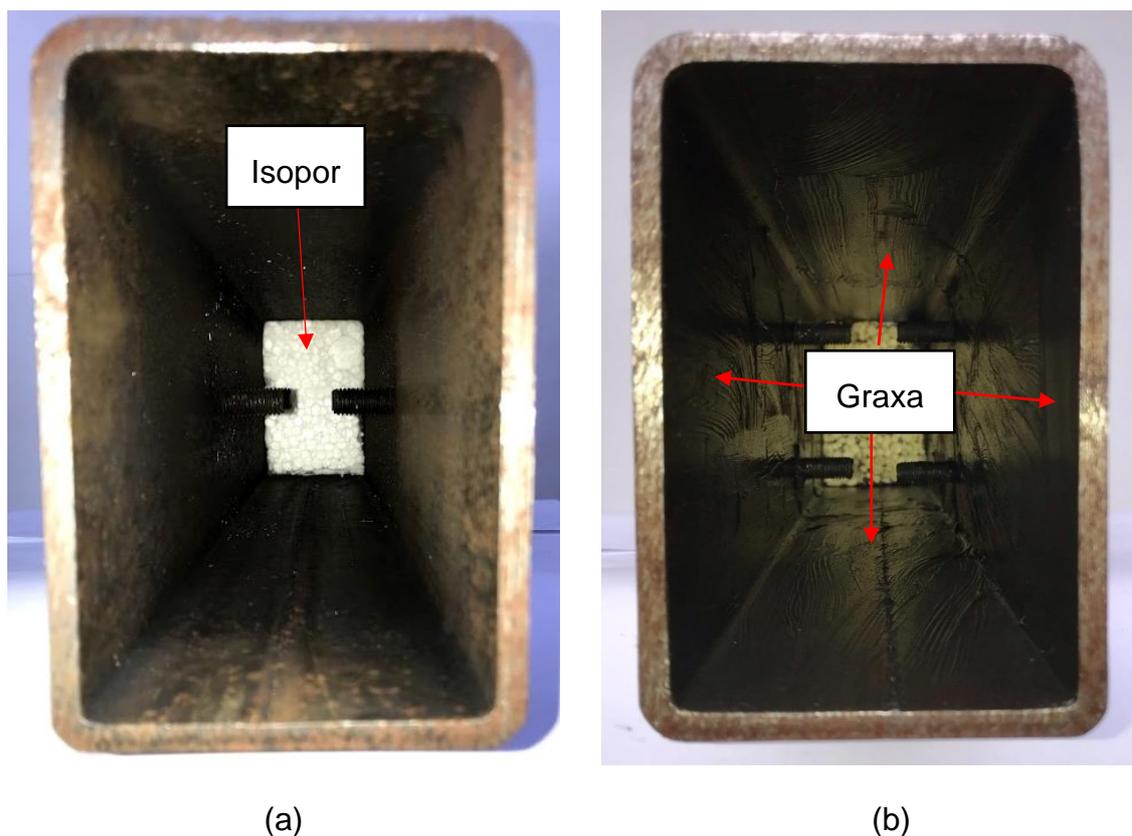


Figura 13 – (a) Isopor no fundo do protótipo; (b) aplicação de graxa nas paredes internas do tubo de aço dos protótipos.

Já para diminuir os efeitos de aderência natural na interface aço-concreto, foi aplicada graxa em todas as faces internas das paredes do tubo de aço, como apresentado na Figura 13-b.

Para a concretagem, em cada protótipo foram lançadas 5 camadas e em cada uma foram dados 15 golpes, por adensamento manual com haste. Ao final do adensamento, na última camada, fez-se também a regularização da superfície, para o nivelamento do concreto e melhor distribuição das cargas de ensaio.

Além dos protótipos, foram feitas também a concretagem dos corpos de prova, para fins de caracterização do concreto. A cura de ambos foi realizada utilizando manta úmida, colocada sobre eles e umidificada durante os 7 dias de cura do concreto, como ilustra a Figura 14.



Figura 14 – Cura dos protótipos e dos corpos de prova com manta úmida.

### 3.3 Caracterização dos Materiais

#### 3.3.1 Caracterização do Aço do Perfil Tubular

Os tubos de aço utilizados neste estudo foram produzidos em aço A36, conformado a frio, com costura. A norma ABNT NBR 8800:2008, fornece como valores nominais mínimos de resistência ao escoamento e resistência à ruptura para perfis de aço A36, os valores  $f_y = 250$  Mpa e  $f_u$  com valores entre 400 MPa e 550MPa. Para a caracterização do aço do tubo, foram feitos 3 corpos de prova que foram ensaiados à tração no laboratório de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais, campus Congonhas, conforme as especificações da norma ABNT NBR ISO 6892:2013 – “Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente”.

Ao fim do ensaio, foram obtidos os valores da resistência ao escoamento  $f_y$  e a resistência à ruptura do aço à tração  $f_u$  e o módulo de elasticidade E do aço. A média dos resultados dos 3 corpos de prova ensaiados estão apresentados na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 – Caracterização do aço do tubo.

<b>Dimensões da Seção Transversal</b>	<b>Resistência ao escoamento <math>f_y</math> (MPa)</b>	<b>Resistência à Ruptura <math>f_u</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade <math>E</math> (MPa)</b>
120x80x4,75	353,47	393,48	166.000

### 3.3.2 Caracterização dos Parafusos

Com a finalidade de analisar a influência do diâmetro do parafuso estrutural na transmissão de carga nos PMPCs, foram utilizados dois diâmetros diferentes: de 10 mm e de 12 mm. Estes foram fabricados pela empresa BEL, com aço ISO 4016 classe 8.8 e comprimento de 30 mm. Os valores mínimos de resistência ao escoamento  $f_{yb}$  e da resistência à ruptura  $f_{ub}$  nominais, especificados pela ABNT NBR 8800:2008, são 640 MPa e 800 MPa respectivamente. Para a caracterização do aço do parafuso foram feitos 3 corpos de prova para cada diâmetro, que foram ensaiados à tração no laboratório de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais, campus Congonhas, conforme as especificações da norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013 – “Materiais Metálicos – Ensaio de Tração Parte 1:Método de ensaio à temperatura ambiente”. A partir desses ensaios foram encontrados os valores  $f_{yb}$  e  $f_{ub}$  apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Resistências normativas mínimas de  $f_{yb}$  e  $f_{ub}$  para os diâmetros de parafusos utilizados

<b>Parafusos utilizados (diâmetro)</b>	<b><math>f_{yb}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{ub}</math> (MPa)</b>
10 mm	860,69	1047,67
12 mm	997,29	1026,69

### 3.3.3 Caracterização do Concreto

Os protótipos de PMPC, foram preenchidos por concreto com classe C20, fabricado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Ouro Preto. Para a caracterização do concreto foram concretados 19 corpos de prova, de dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, moldados e curados de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 – “Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”. Os ensaios para a obtenção da resistência média à compressão  $f_{cm}$  foram feitos de acordo com ABNT NBR 5739:2018 – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, aos 7 dias de idade, quando o cimento CPV atinge sua resistência final. Os ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral,  $f_{ctm}$  foram feitos de acordo com a ABNT NBR 7222:2011 – “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”. Para obtenção do módulo de elasticidade  $E$ , foram feitos ensaios de acordo com a ABNT NBR 8522:2021 - 1 – “Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão”. A determinação da massa específica real  $\rho$ , foi feita de acordo a ABNT NBR 9778:2009 – “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”. O coeficiente de Poisson  $\nu$  foi obtido a partir do módulo de elasticidade. A caracterização do concreto também foi feita em conjunto com os dados de Xavier (2022).

Após os ensaios, foram obtidos os valores de caracterização apresentados na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 – Caracterização do concreto.

$f_{cm}(MPa)$	26,53
$f_{ctm}(MPa)$	9,69
$E(Mpa)$	24458,603
$\nu$	0,15
$\rho (t/mm^3)$	$2,59 \times 10^{-9}$

### 3.4 Metodologia de Ensaio

#### 3.4.1 Equipamentos

Após a fabricação e concretagem dos protótipos PMPC, e com os resultados das caracterizações dos materiais, iniciou-se a etapa de preparação dos ensaios experimentais. Para a execução dos ensaios de cisalhamento direto adaptado foi utilizada a prensa servo-hidráulica modelo HVL da série INSTRON SATEC 5569, fabricada pela empresa Instron. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Ouro Preto. O equipamento mencionado possui uma célula de carga que permite determinar a carga aplicada no protótipo, tendo como capacidade de carga 2000 kN e precisão de +/- 0,5% da carga aplicada.

#### 3.4.2 Centralização dos Protótipos na Prensa e Transmissão de Esforços

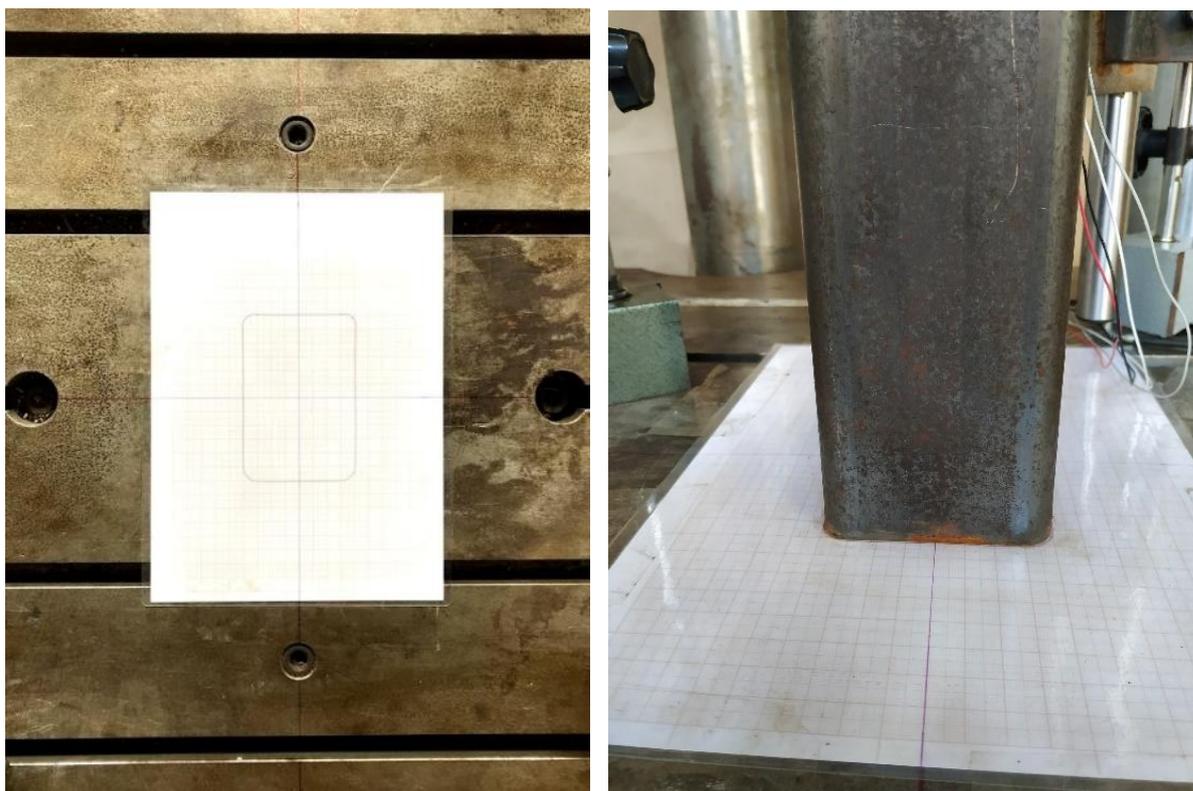
Para a realização do ensaio de cisalhamento direto adaptado de forma eficaz, metodologia de ensaio já citada no item 2.4 desse trabalho, é necessário que os esforços sejam aplicados exclusivamente no núcleo de concreto, sendo necessário também garantir que essas forças sejam distribuídas de forma igualitária por toda a superfície da face superior do núcleo de concreto. Para isso foram utilizadas chapas de aço retangulares com dimensões um pouco menores que à seção transversal do

núcleo de concreto. Isso é necessário para que durante o deslocamento do núcleo de concreto a chapa de aço continue transmitindo a carga somente na superfície do concreto, sem contato com o tubo de aço, para avaliar o quanto de carga é transmitida ao tubo pelo parafuso conector. Assim, as chapas de aço foram colocadas na parte superior dos protótipos antes do início dos ensaios, como ilustra a Figura 15.



Figura 15 – Utilização das chapas de aço como mecanismos de transmissão de carga durante o ensaio.

Antes e durante o ensaio é importante garantir também que os protótipos estejam centralizados na prensa para a aplicação da carga de compressão de forma centrada ao núcleo de concreto. Para centralizar o protótipo na prensa, utilizou-se um gabarito feito com um papel milimetrado com a representação dos eixos vertical e horizontal do papel coincidentes aos eixos centrais da prensa. E para posicionar corretamente o protótipo no centro da prensa, fez-se a representação da seção retangular de mesmas dimensões da área externa do protótipo, como ilustrado na Figura 16.



(a)

(b)

Figura 16 – (a) Gabarito em papel milimetrado, (b) Centralização do protótipo.

### 3.4.3 Instrumentação

Para complementar os nossos dados, é importante fazer a instrumentação nos protótipos, utilizando de extensômetros e LVDTs que contribuam para a análise, colaborando para entender melhor o comportamento dos materiais. Com esse objetivo, para este estudo foram utilizados transdutores de deslocamento para determinar o deslocamento relativo entre núcleo de concreto e tubo de aço, e também que permitissem verificar o deslocamento dos parafusos, além de extensômetros para medir a deformação do tubo próximo aos parafusos. A instrumentação de cada protótipo foi realizada conforme descrito a seguir:

Para o protótipo 4P(12r) - t4,75\*, foram utilizados:

- 3 transdutores lineares de deslocamento (*Linear Variational Displacement Transducer – LVDT*), fixados com sua base magnética ao prato inferior da prensa:
  - LVDT1: usados para medir o deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, importante para traçar as curvas de Carga por Parafuso *versus* Deslocamento Relativo. Nesse caso foi utilizado o LVDT da prensa, ligado ao sistema de aquisição de dados *Partner*,
  - LVDT2 e LVDT3: usados para medir os deslocamentos dos parafusos em duas alturas durante o ensaio, com um objetivo qualitativo, buscando averiguar o comportamento do conector a vários níveis de carga durante o ensaio.
- 1 extensômetro vertical – para medir a deformação do tubo de aço abaixo dos parafusos:
  - Esse extensômetro, denominado aqui de EER1, foi colado centralizado, na posição vertical, à 5 centímetros abaixo dos parafusos, para medir as deformações na parede do tubo abaixo do parafuso durante o ensaio experimental.

Na Figura 17 estão representados a instrumentação utilizada durante o ensaio experimental do protótipo 4P(12r)- t4,75\*.

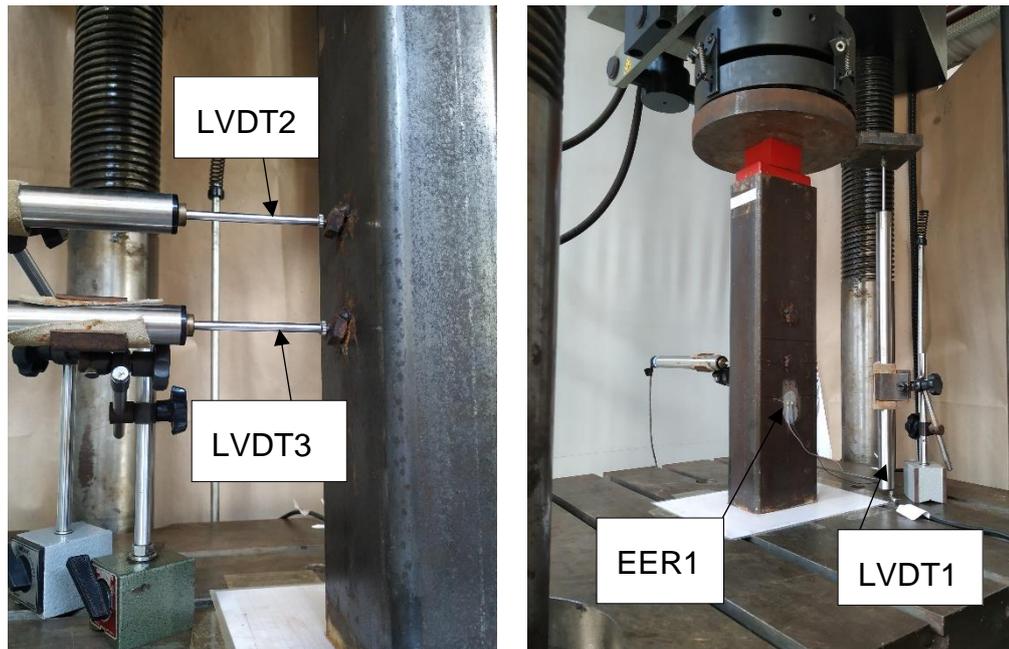


Figura 17 – Instrumentação do protótipo 4P(12r)-t4,75\*.

Para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*, foram utilizados:

- 2 LVDTs:
  - LVDT1: Para medir o deslocamento relativo entre tubo de aço e núcleo de concreto, sendo esse o LVDT da prensa, ligado ao sistema de aquisição de dados *Partner*;
  - LVDT2: Para medir o deslocamento do parafuso.
- 2 extensômetros verticais:
  - EER1: extensômetro colado centralizado entre os parafusos, a 5 centímetros abaixo da linha dos parafusos (mesma posição do EER1 do protótipo 4P(12r)-t4,75\*. Foi colocado nessa posição para poder comparar os resultados dele com os resultados do extensômetros nos protótipos com parafusos instalados exatamente no centro da parede do tubo;
  - EER2: foi colado logo abaixo de um dos parafusos, 5 centímetros abaixo dele. Usado para medir a deformação devido a transmissão de carga do parafuso.

Na Figura 18 estão representadas a instrumentação utilizada durante o ensaio experimental do protótipo 4P(10r) - t4,75\*.

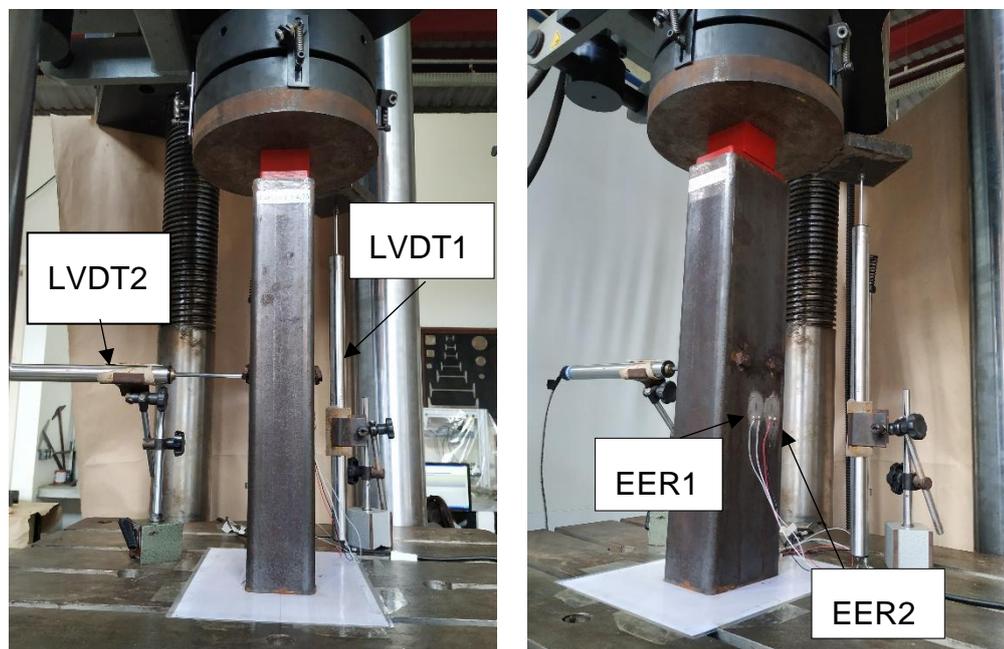


Figura 18 – Instrumentação do protótipo 4P(10r)-t4,75\*.

#### 3.4.4 Aquisição de dados

Para a aquisição de dados foram utilizados:

1. *Parter*: programa que controla o sistema de aquisição de dados da prensa, armazenando as cargas aplicadas e também interpreta os dados de deslocamento relativo entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, medido pelo LVDT 1. Fornece, portanto, uma curva Carga Aplicada *versus* Deslocamento Relativo.
2. *Spider 8*: equipamento que adquire os dados de deformações dos extensômetros e dos LVDTs 1 e 2 usados para medir os deslocamentos dos parafusos.
3. *Catman 4.5*: software que controla e armazena os valores de deformações e dos deslocamentos dos LVDTs 1 e 2, obtidos pelo *Spider 8*.

### **3.4.5 Aplicação das cargas**

Para os ensaios experimentais foi adotado o procedimento de ensaio de cisalhamento direto adaptado, já realizado pelos autores Xavier (2017) e Neto (2016), Xavier et al. (2019) e descrito no item 2.4 . O procedimento de ensaio inicia-se com o deslocamento do prato de aplicação de carga, usando um controle de deslocamento de 2 mm/min, até atingir um carregamento de 3 kN.

Em seguida, os protótipos devem ser submetidos a cinco ciclos de pré-cargas, com cargas máximas correspondentes a 40% da transferência de carga teórica prevista por parafuso. Essas pré-cargas são aplicadas com o intuito de romper possíveis aderências que ainda existam entre a parede do tubo de aço e o núcleo de concreto. Após os ciclos de pré-cargas iniciou-se o processo de carregamento dos protótipos, aumentando-se gradativamente a carga aplicada no protótipo com controle de deslocamento de 0,005 mm/s. Como critério de parada dos ensaios determinou-se um deslocamento relativo máximo, medido pelo LVTD 1, de 10 mm. Entretanto havia um outro critério de parada para os ensaios: interromper o ensaio caso ocorresse a perda de carga de 20% da carga máxima atingida no ensaio, utilizado como critério de segurança da prensa. Contudo este último critério não foi necessário para nenhum dos protótipos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios experimentais deste trabalho. Os valores experimentais da capacidade máxima de transferência de carga ( $V_{Rn,experimental}$ ) obtidos nesse trabalho serão comparados com os resultados de Xavier (2022) e com os valores teóricos da ABNT NBR 16239:2013, considerando ou não o confinamento do concreto abaixo do parafuso utilizando as formulações da norma europeia EN 1994-1-1:2004 e da ABNT NBR 8800:2008.

Para compreender o funcionamento dos parafusos como conectores, os dados foram compilados em gráficos. Foram feitas curvas de:

- Carga Total Aplicada *versus* Deslocamento Relativo entre Concreto e tubo: para analisar a capacidade do parafuso em transmitir os esforços do concreto para o aço, e também a ductilidade do mesmo. O deslocamento relativo foi obtido pela leitura de dados do LVDT 1.

- Carga Total Aplicada *versus* Deslocamento do Parafuso: para permitir entender o comportamento do parafuso com o aumento de carga. O deslocamento do parafuso foi obtido pela leitura de dados dos LVDTs 2 e 3.

- Carga Total Aplicada *versus* Deformação Vertical: para analisar a deformação do tubo de aço e a eficiência dos parafusos em transmitir esforços. A deformação foi obtida pelos extensômetros EER1 e EER2.

### 4.1 Apresentação e análise dos resultados experimentais

Na Figura 19 está ilustrada a curva de Carga Total Aplicada *versus* Deslocamento Relativo, para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*. A carga máxima obtida durante o ensaio experimental para esse protótipo foi de 157,01 kN. O deslocamento relativo máximo obtido foi de 9,51 mm, que foi o momento em que o ensaio foi interrompido.

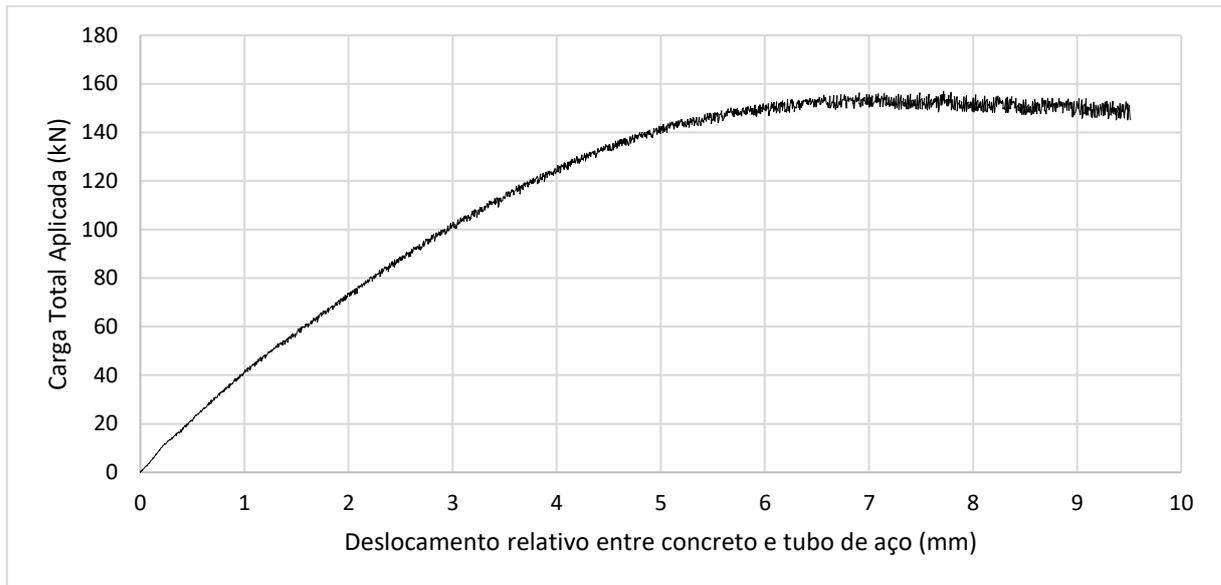


Figura 19 - Curva Total Aplicada x Deslocamento Relativo para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*.

Analisando a curva da Figura 19, observa-se um crescimento do deslocamento conforme aumenta-se a carga aplicada. Essa ascendência na curva acontece até atingir-se a carga máxima, onde é perceptível uma mudança de comportamento da curva, havendo a partir de então uma perda na carga suportada, tendo os conectores aos poucos sua capacidade de resistir a esforços reduzida. Entretanto, essa mudança não é brusca, não identificando um rompimento abrupto de nenhum dos materiais.

No estudo de Chaves *et al.* (2021) os autores citam a importância de se manter a razão entre diâmetro do parafuso ( $d_b$ ) e espessura do tubo de aço ( $t$ ) no intervalo de 1,3 e 2,0. Para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*, essa relação é de 1,79, estando de acordo com esses valores considerados ideais. Para essa verificação, foi utilizado o diâmetro de parafuso igual a 8,5 mm, valor real do menor diâmetro da rosca. Essa consideração será mantida para todo o trabalho, por ser um valor experimental, e assim mais representativo.

Já no protótipo 4P(12r)-t4,75\* observou-se uma carga máxima obtida durante o ensaio experimental igual a 141,61 kN. O deslocamento relativo máximo obtido foi de 10,16 mm, momento em que o ensaio foi interrompido. O comportamento da curva de Carga Total Aplicada *versus* Deslocamento Relativo do protótipo 4P(12r)-t4,75\* pode ser observado na Figura 20.

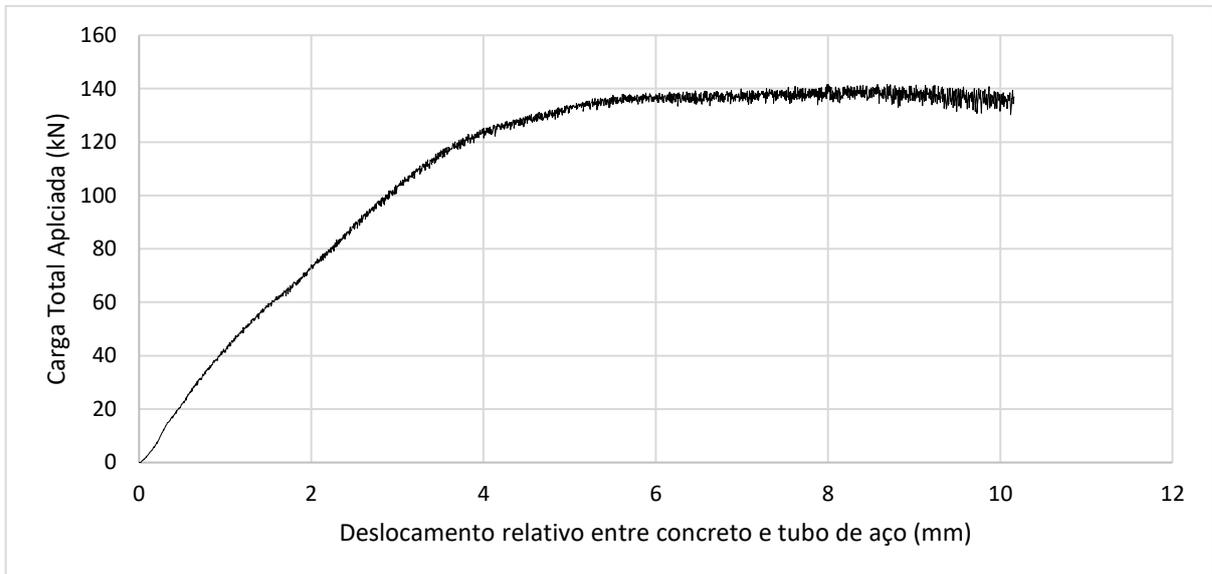


Figura 20 - Gráfico de Carga Total Aplicada x Deslocamento Relativo para o protótipo 4P(12r)-4,75\*

O protótipo 4P(12r)-4,75\* também apresentou um comportamento ascendente até atingir a carga máxima. Posteriormente, a capacidade de carga total suportada, decresce, mas de forma sutil, não havendo uma ruptura brusca do sistema.

A razão  $d_b/t$  para o protótipo 4P(12r)-4,75\* é de 2,14, excedendo os valores sugeridos nos estudos de Chaves *et al.* (2021).

Comparando o resultado dos dois protótipos, 4P(10r)-4,75\* e 4P(12r)-4,75\*, observa-se que ao aumentar o diâmetro do parafuso para 12 mm, há uma diminuição na carga total suportada. O comportamento das curvas pode ser comparado na Figura 21, apresentada a seguir.

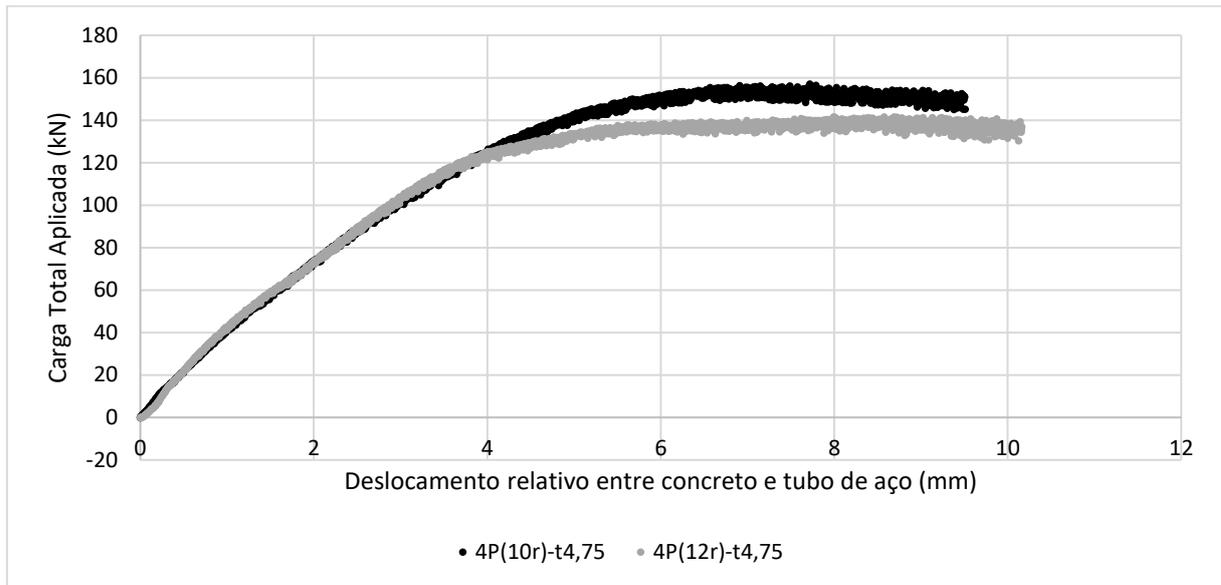


Figura 21 – Comparação entre as curvas de carga total aplicada *versus* deslocamento relativo dos protótipo 4P(10r)-t4,75\* e 4P(12r)-t4,75\*.

Analisando a Figura 21, observa-se que o comportamento das curvas é semelhante, sendo praticamente igual até uma determinada carga. A partir de então, há uma pequena variação dos valores, sendo a carga total suportada pelo protótipo com parafusos de 12 mm, pouco menor, o que não era esperado, visto que o parafuso de maior diâmetro apresenta maior resistência ao cisalhamento. Uma possível justificativa para essa menor carga suportada por um parafuso de maior diâmetro é a relação de  $d_b/t$  ser maior do que 2,0, o que, segundo Chaves *et al.* (2021), faz com que a parede do tubo de aço seja mais solicitada, ocasionando o escoamento do tubo de aço. Outra hipótese é a distribuição dos parafusos: estando os parafusos do protótipo 4P(12r)-t4,75\* distribuídos em duas alturas dos planos de seção transversal. Nessa situação os parafusos que estão na seção superior serão solicitados primeiro, os conectores da seção transversal inferior só serão solicitados depois que os parafusos de cima forem sacrificados, havendo, portanto, uma distribuição de esforços entre os parafusos de forma não igualitária. Em PMPCs há ainda uma variação do efeito do confinamento nas seções retangulares, onde as regiões próximas aos vértices do retângulo e na região central possuem efeito de confinamento maior, como

representado na Figura 6. Um maior confinamento garante um aumento da resistência do concreto nessas regiões, permitindo ao sistema suportar maiores cargas. Como no protótipo 4P(10r)-t4,75\* esses parafusos estão próximos aos vértices, dispostos em regiões de maior resistência, pode esta ser uma das justificativas para esse protótipo apresentar maior carga total aplicada. Além disso, o tubo retangular utilizado é um perfil formado a frio, havendo o encruamento do aço na região da dobra próximo aos vértices, deixando o aço com maior resistência nessas regiões. Como os conectores foram instalados próximo aos vértices no protótipo 4P(10r)-t4,75\*, pode haver a influência de maior resistência do aço do tubo combinado ao concreto confinado para maior carga total suportada nesse protótipo.

Comparando as curvas da Figura 21 e Figura 8 observa-se uma semelhança de comportamento, identificando-se, portanto, um comportamento dúctil do conector parafuso ensaiado, o que permite compreender a capacidade desse conector em transmitir esforços e de se deformar.

Para analisarmos a ductilidade de um conector, a norma EN 1994-1-1:2004 estabelece que a capacidade de deslizamento característico ( $\delta_{uk}$ ) deve ser maior ou igual a 6 mm para o material ser considerado dúctil. Para o cálculo de  $\delta_{uk}$  a norma europeia informa que a capacidade de deslizamento característico é  $0,9\delta_u$ , sendo  $\delta_u$  o deslocamento relativo correspondente à força característica do conector ( $P_{Rk}$ ), onde  $P_{Rk}$  equivalente a 90% da carga de ruptura ( $P_u$ ), na parte decrescente da curva. Como a norma faz a análise de carga por conector, para esta discussão a carga total será dividida por quatro (número de parafusos nos protótipos), admitindo-se que todos os conectores tenham mesma taxa de contribuição sobre a carga suportada. Os valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo da capacidade de deslizamento característico ( $\delta_{uk}$ ).

<i>Protótipo</i>	$P_{Rk}$ (kN)	<i>Valor mais próximo de <math>\delta_u</math></i> (mm)	$\delta_{uk}$ (mm)
4P(10r)-4,75*	35,325	9,51	8,56
4P(12r)-4,75*	31,86	10,161	9,14

O valor da força característica por parafuso para este estudo equivale a 35,325 kN para 4P(10r)-4,75\* e 31,86 kN para 4P(12r)-4,75\*, entretanto, o experimento foi interrompido antes de atingir-se tal carga. Porém, ainda que o experimento tenha sido paralisado antes de atingir a carga  $P_{Rk}$ , para ambos os protótipos, noventa por cento do deslocamento final atingido já foi superior a 6 mm, o que comprova a ductilidade do conector. Para o cálculo de  $\delta_{uk}$ , foi feito 90% do valor de deslocamento mais próximo de  $\delta_u$ , ou seja, o último deslocamento atingido para as curvas dos protótipos.

A partir da leitura dos LVDTs colocados perpendicular à cabeça dos parafusos, foi possível analisar o deslocamento do conector durante o ensaio experimental para cada protótipo. Na Figura 22 é apresentada a curva de Carga Total Aplicada *versus* Deslocamento do parafuso para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*, medido a partir do LVDT 2. Analisando a Figura 22, observa-se que o deslocamento do parafuso aumenta com o aumento da carga aplicada durante todo o ensaio.

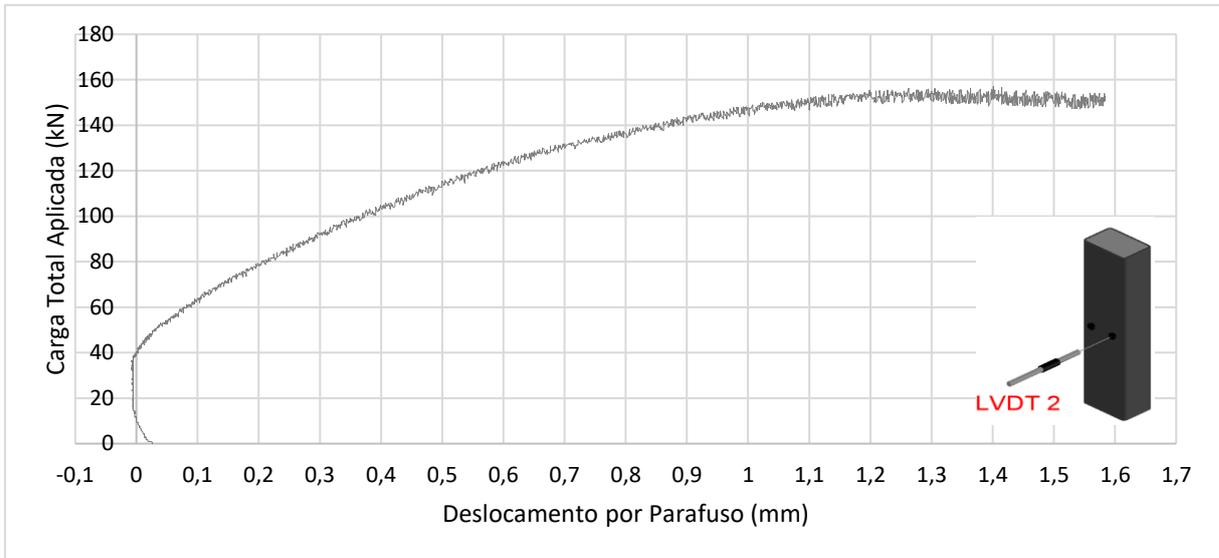
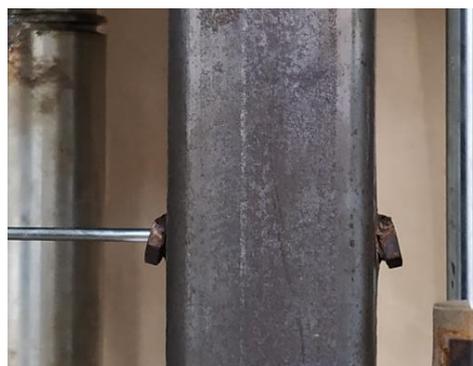


Figura 22 – Curva de Carga Total Aplicada x Deslocamento do Parafuso - protótipo 4P(10r)-t4,75\*

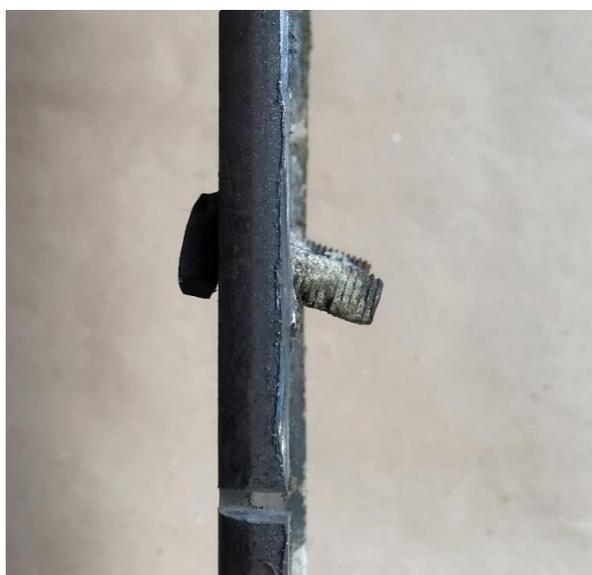
Esse aumento do deslocamento do parafuso fica evidente quando comparamos as imagens do parafuso antes e depois da realização do ensaio deste protótipo, Figura 23-a e Figura 23-b respectivamente. Analisando a Figura 23-c, onde mostra a parte interna do parafuso após o ensaio experimental, verifica-se que o parafuso rotacionou durante o ensaio, o que provocou esse deslocamento medido na cabeça do parafuso pelo LVDT2, apresentado na Figura 22.



(a) Visualização externa antes do ensaio



(b) Visualização externa após o ensaio



(c) Visualização interna após ensaio

Figura 23 – Deslocamento do parafuso - protótipo 4P(10r)-t4,75\*.

Foram avaliados também o deslocamento dos parafusos durante o ensaio experimental para o protótipo 4P(12r)-t4,75\*. Nesse protótipo foram colocados 2 LVDTs, um em cada linha de parafusos, a fim de se medir os deslocamentos nos parafusos para os 2 níveis de altura. Na Figura 24 são apresentados os dados para LVDT 2 e LVDT 3, em forma de curva de Carga Total Aplicada *versus* Deslocamento do parafuso. Os parafusos nos dois níveis de altura possuem comportamentos semelhantes, entretanto, o parafuso inferior (LVDT 3) apresentou um deslocamento um pouco maior para uma mesma carga aplicada, por haver uma sobrecarga nos

parafusos superiores e um mal aproveitamento da capacidade dos parafusos inferiores.

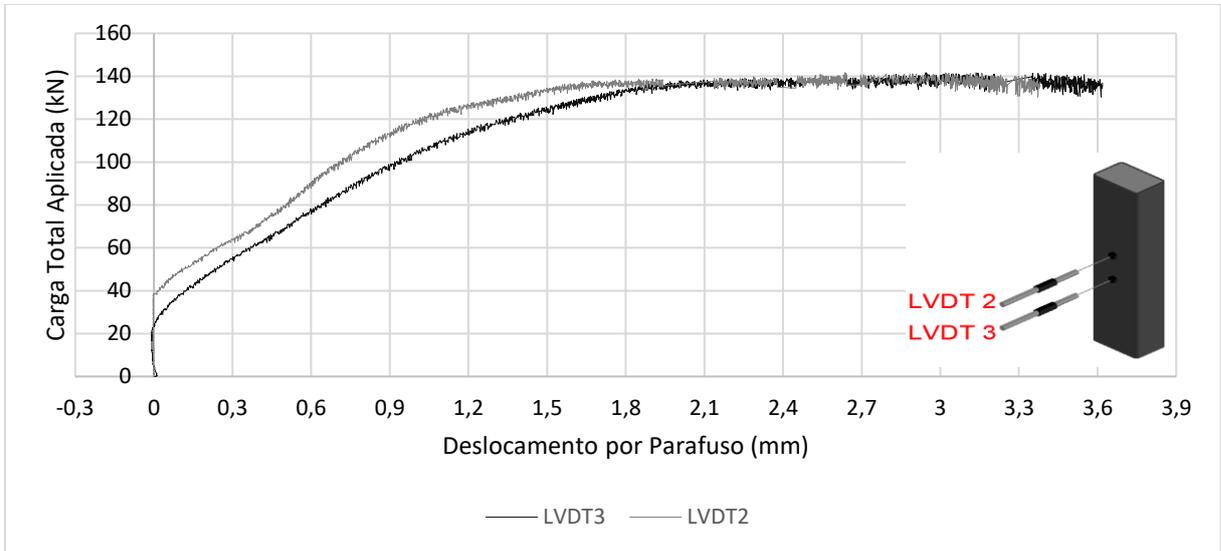


Figura 24 – Curva de Carga Total Aplicada x Deslocamento do Parafuso – protótipo 4P(12r)-t4,75\*.

Na Figura 25, apresentada a seguir, comparamos as imagens a e b do parafuso antes e depois da realização do ensaio para o protótipo 4P(12r)-t4,75\*. Percebe-se a rotação dos parafusos. A Figura 25-c mostra a parte interna do parafuso após o ensaio experimental, onde verifica-se que o parafuso rotacionou durante o ensaio.



(a) Antes do ensaio

(b) Depois do ensaio



(c) Visualização interna após ensaio

Figura 25 – Deslocamento do parafuso – protótipo 4P(12r)-t4,75\*.

Para compreendermos melhor o que ocorreu no protótipo 4P(12r)-t4,75\*, foram feitas duas aberturas, uma na parede lateral do tubo de aço (sem parafusos) e outra na parede frontal onde os parafusos estavam instalados, conforme apresentado na Figura 26. Observou-se que houve uma ruptura do concreto na altura dos parafusos inferiores, onde houve maior deslocamento (LVDT 3 da Figura 24). Isso fica evidente na Figura 26-a e b, onde é destacado em vermelho a trinca gerada no concreto do protótipo, conseqüente da falha nessa região. Na imagem não fica evidente acúmulo de tensões na região entre os parafusos, por não haver grandes danos na estrutura do concreto.



(a) Corte na parede lateral do tubo

(b) Corte na parede frontal do tubo

Figura 26 – Aberturas do protótipo 4P(12r)-t4,75\* após ensaio, para verificação dos modos de falha.

Percebe-se semelhança do comportamento das Curvas Total Aplicada x Deslocamento do Parafuso (Figura 22 e Figura 24), com as Curvas de Carga Total Aplicada x Deslocamento relativo do concreto e o tubo de aço (Figura 19 e Figura 20) de cada protótipo. Isso porque em ambas as curvas, quanto maior a capacidade de carga suportada pelo protótipo maior é o deslocamento. Isso até o ponto de carga máxima, em que nos dois gráficos é possível identificar uma mudança de comportamento, havendo a diminuição da carga com o aumento do deslocamento. Essa semelhança de comportamentos comprova a transmissão de esforços e a eficiência do parafuso como conector.

Quanto aos resultados obtidos pelos extensômetros, para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*, os extensômetros EER1 e EER2 determinaram as deformações dos pontos a 5 cm abaixo dos parafusos, no centro da parede do tubo e abaixo do parafuso

respectivamente (Figura 27). As curvas de Carga Total Aplicada *versus* deformação específica de ambos os pontos instrumentados são apresentadas na Figura 27.

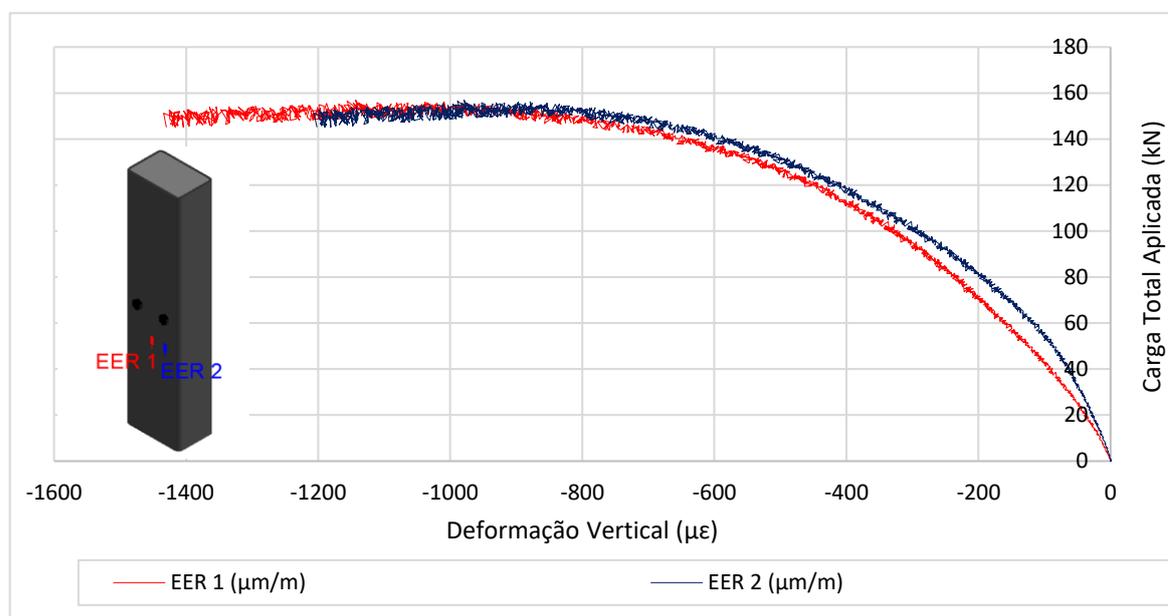


Figura 27 – Curvas de Carga Total Aplicada *versus* Deformação Vertical – protótipo 4P(10r)-t4,75\*

Analisando as curvas apresentadas na Figura 27, verificou-se que o extensômetro EER1 mediu deformação máxima de 1434,09 µm/m e o EER2 mediu deformação máxima de 1206,37 µm/m. Observa-se que as maiores deformações foram medidas na região entre os dois parafusos (EER1). Essas deformações maiores podem ter origem devido ao acúmulo de tensões entre os parafusos, decorrente de ser uma região de influência dos dois parafusos. A partir do módulo de elasticidade encontrado na caracterização do tubo de aço ( $E=166.000$  MPa), é possível verificar se houve escoamento do aço nas duas regiões instrumentadas com extensômetros utilizando a lei de Hooke – apesar de haver um estado triaxial de tensões, será considerado o estado biaxial, para simplificar a análise. A tensão atingida no ponto instrumentado pelo EER1 foi de 238,06 Mpa e a tensão no ponto instrumentado pelo EER2 foi de 200,26 Mpa. Como a tensão de escoamento do aço do tubo é de 353,47 Mpa, não houve escoamento em nenhum dos pontos instrumentados.

O protótipo 4P(10r)-t4,75\* apresentou também um amassamento da parede do tubo nas regiões inferiores de contato do parafuso com o tubo, após os ensaios, como ilustrado na Figura 28, o que comprova a transferência de carga aplicada no núcleo de concreto para o tubo de aço através do parafuso conector.



Figura 28 – Amassamento da parede do tubo de aço para o protótipo 4P(10r)-t4,75\*.

No protótipo 4P(12r)-t4,75\*, utilizou-se apenas um extensômetro (EER1) colado à 5 cm abaixo da linha inferior de parafusos. A partir dos dados de deformação medidos por esse extensômetro, obteve-se a Curva de Carga Total Aplicada *versus* Deformação Específica, apresentada na Figura 29. Analisando essa curva, vemos um crescimento na deformação conforme aumenta-se a carga aplicada. Atinge-se a carga total máxima, e a partir desse ponto, há um grande aumento de deformação para uma carga total praticamente constante. Verificou-se que o extensômetro EER1 atingiu uma deformação máxima de 2371,79  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Portanto, nesse ponto a 5 cm abaixo da linha de parafusos o aço do tubo atingiu uma tensão de 393,72 Mpa, superior à tensão de escoamento desse aço caracterizado, de 353,47 Mpa. Com isso comprova-se que houve o escoamento do tubo na região de contato com o parafuso. Na Figura 30 são apresentados o amassamento da parede do tubo de aço na região de contato com o parafuso para o protótipo 4P(12r)-t4,75\*.

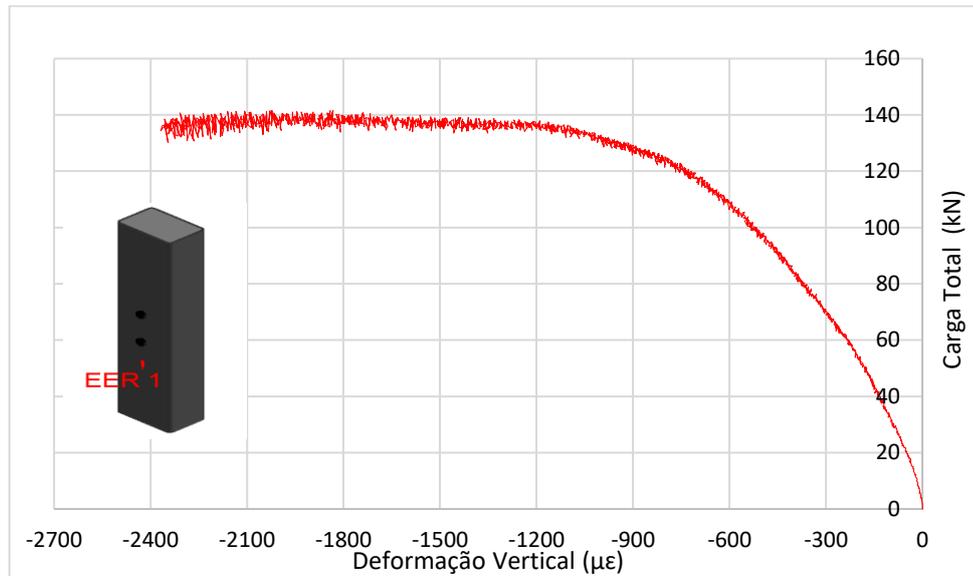
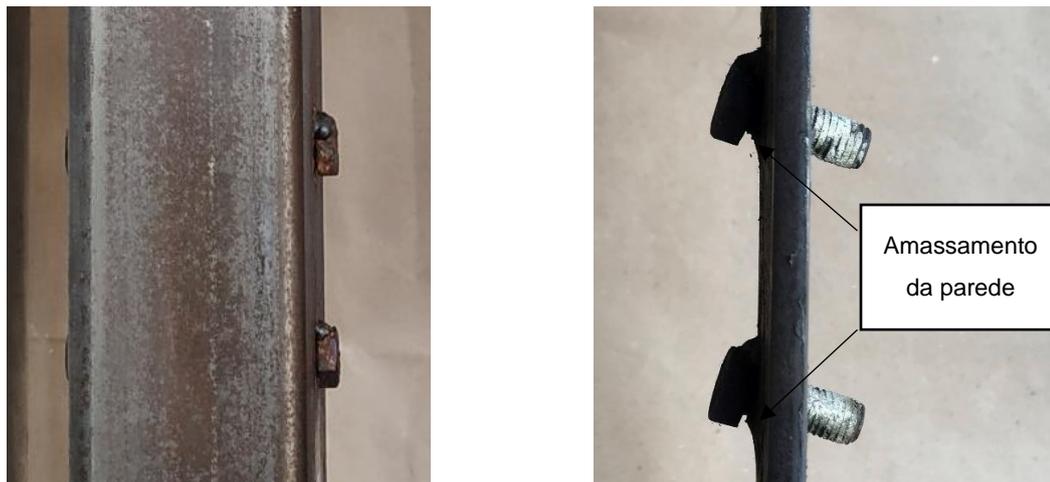


Figura 29 – Gráfico de Carga Total Aplicada *versus* Deformação Vertical – protótipo 4P(12r)-t4,75\*.



(a) Parede do tubo antes do ensaio

(b) Parede do tubo de aço após o ensaio

Figura 30 – Amassamento da parede do tubo de aço – protótipo 4P(12r)-t4,75\*.

Comparando os resultados dos extensômetros localizados abaixo dos parafusos, para o protótipo AP4(10r)-t4,75\* as deformações foram de 1206,37  $\mu\text{m/m}$  e para AP4(12r)-t4,75\* as deformações foram de 2371,79  $\mu\text{m/m}$ . Há portanto, deformações muito maiores para o protótipo com parafusos de diâmetro igual a 12 mm. A relação

$d_b/t$  para AP4(10r)-t4,75\* é de 1,78, estando dentro do limite estabelecido por Chaves *et al.* (2021) como ideal para a eficiente do sistema. Já para AP4(12r)-t4,75\*, essa razão é de 2,15, ultrapassando os valores sugeridos pelos autores. Com isso, a parede do tubo de aço do protótipo AP4(12r)-t4,75\* encontra-se mais solicitada e por isso sujeita a maiores deformações, o que mostra-se de acordo com os resultados medidos pelo extensômetro.

## 4.2 Comparação dos resultados

### 4.2.1. Resultados fornecidos por Xavier (2022)

Os dados dos protótipos 4P(10r)-4,75\* e 4P(12r)-4,75\*, e a capacidade de carga total máxima verificada após os ensaios experimentais são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Resultados dos protótipos 4P(10r)-t4.75\* e 4P(12r)-t4.75\*.

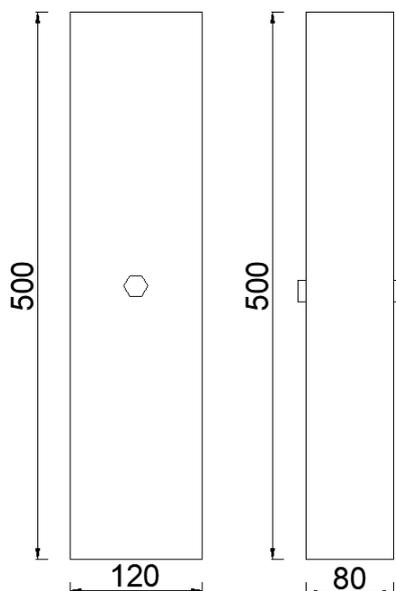
Nomenclatura	Dimensões do tubo (mm)	Diâmetro do parafuso (mm)	Quantidade de parafusos	Capacidade de carga total (kN)
4P(10r)-t4.75*	120x80x4.75	10	4	157,01
4P(12r)-t4.75*	120x80x4.75	12	4	141,61

Foram cedidos por Xavier (2022), alguns dos resultados experimentais da sua tese, apresentados no Quadro 2, para serem comparados com os resultados dos protótipos 4P(10r)-4,75\* e 4P(12r)-4,75\*, deste trabalho.

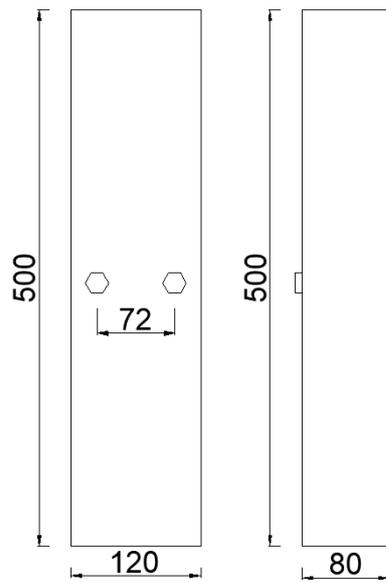
Quadro 2 – Resultados concedidos por Xavier (2022).

Nomenclatura	Dimensões do tubo (mm)	Diâmetro do parafuso (mm)	Quantidade de Parafusos	Capacidade e de carga total (kN)	Média (kN)
2P(12r)-t4.75(1)	120x80x4.75	12	2	80,18	86,31
2P(12r)-t4.75(2)				88,32	
2P(12r)-t4.75(3)				90,42	
4P(12r)-t4.75(1)	120x80x4.75	12	4	195,56	199,93
4P(12r)-t4.75(2)				190,76	
4P(12r)-t4.75(3)				213,48	
4P(10r)-t3.00(1)	120x80x3.00	10	4	88,84	91,12
4P(10r)-t3.00(2)				89,28	
4P(10r)-t3.00(3)				95,24	

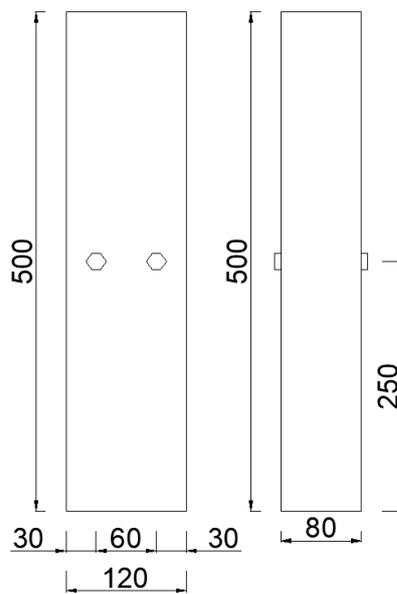
A seguir, na Figura 31, são representados os protótipos de Xavier (2022).



(a) 2P(12r)-t4,75



(b) 4P(12r)-t4,75



(c) 4P(10r)-t3,00

Figura 31 - Protótipos Xavier (2002)

Analisando os dados apresentados no Quadro 2, verifica-se a partir da média dos resultados experimentais que o protótipo 2P(12r)-t4,75 suportou uma carga máxima

de 86,31 kN. Nesse protótipo há apenas dois parafusos, distribuídos simetricamente no protótipo, a uma mesma altura, o que permite admitir que a distribuição de cargas está sendo feita de forma igualitária, onde cada conector suporta uma carga de 43,16 kN.

A partir desse resultado, analisando o protótipo 4P(12r)-t4,75\*, se todos os conectores trabalhassem de maneira igual, a carga total suportada seria de 172,62 kN, o que não acontece, visto que a carga máxima obtida no ensaio foi de 141,41 kN (Quadro 1). Acredita-se com isso que, ao adotar duas alturas diferentes de parafuso, cada linha de conectores terá uma taxa de contribuição diferente. Admite-se, portanto, que a carga suportada pela linha da seção superior é equivalente à carga total do protótipo 2P(12r)-t4,75, de 86,31 kN (contribuindo com 60,89% da carga total). Com isso, considera-se que os parafusos dispostos na seção transversal inferior do protótipo 4P(12r)-t4,75 suportou 55,31 kN, o que equivale a uma taxa de contribuição de 39,11%.

Além disso, pode-se comparar os resultados do protótipo 4P(12r)-t4,75\*, com carga de 141,41 kN, com o protótipo 4P(12r)-t4,75 de Xavier (2022), de mesmas características variando apenas a disposição dos parafusos – ao invés de serem dispostos em duas alturas, os conectores foram distribuídos em uma única linha de altura da seção transversal. A carga total suportada pelo protótipo com única altura de conectores é de 199,93 kN, sendo inclusive superior à carga esperada para quatro conectores (172,62 kN).

Como a distância entre os parafusos é a mesma para 4P(12r)-t4,75\* e 4P(12r)-t4,75, entende-se que esse não foi o fator influente para a baixa capacidade de resistência.

Além disso, como a carga total suportada pelo protótipo 4P(12r)-t4,75 foi superior à carga prevista para quatro conectores, acredita-se que um dos fatores influentes seja o encruamento do aço na região dos cantos do tubo e o efeito do confinamento, citados anteriormente, que aumentam a resistência na região onde os parafusos estão instalados. Entretanto, acredita-se que o impacto desses dois aspectos não seria de tão grande influência, a ponto de aumentar a resistência do protótipo em mais de 27 kN.

Portanto, dentre as hipóteses levantadas anteriormente, a que melhor justifica a baixa capacidade de carga do protótipo 4P(12r)-t4,75\* é a disposição dos parafusos, havendo um sacrifício dos conectores presentes na seção transversal superior, e prejudicando o desempenho da transferência de carga total no protótipo. Um fator influente para essa divergência na taxa de contribuição é o comportamento do concreto: por ser um material que não possui ductilidade, trinca com deslocamentos baixos. Com isso, o concreto em maiores deslocamentos possivelmente não estará contribuindo mais ao sistema, havendo uma ruptura, sobrecarregando a parede do tubo e os parafusos superiores.

Para analisarmos a influência do diâmetro do parafuso na eficiência deste como conector, foi comparada a capacidade de carga total do protótipo 4P(10r)-4,75\*, de 157,01 kN, com a do protótipo 4P(12r)-4,75 de Xavier (2022), com capacidade de carga total de 199,93 kN. Os protótipos comparados possuem mesmas dimensões para o tubo de aço, mesmo concreto utilizado, respeitando a distância dos parafusos, a quantidade e a distribuição destes, variando apenas o diâmetro dos conectores. Observe que tendo um acréscimo de diâmetro de 20%, há um aumento de capacidade de carga total de 27,34%. Portanto, quanto maior o diâmetro do parafuso, maior a carga total suportada pelo protótipo.

Com o objetivo de compreender melhor a influência da espessura do tubo de aço, o protótipo 4P(10r)-t4,75\*, foi comparado com o protótipo 4P(10r)-t3,00 de Xavier (2022). Fazendo a redução da espessura do tubo de aço em 36,84%, houve uma variação da capacidade de carga total de 157,01 kN para 91,12 kN, havendo uma redução de 41,97%. Há, portanto um impacto da variação da espessura do tubo, sendo a redução de capacidade de carga pouco maior que a redução referente à espessura.

Analisando a relação  $d_b/t$ , vemos que reduzindo a espessura do tubo de aço, aumentamos a razão entre esses parâmetros, situação essa em que, segundo Chaves *et al.* (2021), há uma maior solicitação do tubo, aumentando a possibilidade de escoamento deste. Enquanto para o protótipo 4P(10r)-4,75 a relação entre diâmetro do parafuso e espessura do tubo é de 1,78, no protótipo 4P(10r)-t3,00\* essa relação é de 2,83, excedendo os limites sugeridos pelos autores. Essa análise contribui para

validar a perda de capacidade total de carga do protótipo ao se diminuir a espessura do tubo de aço.

Além disso, Xavier (2017) cita que a esbeltez da parede do tubo ( $B/t$ ) impacta na capacidade de transferência de carga por parafuso: quanto mais esbelta, menor será essa capacidade suportada. Comparando os protótipos 4P(10r)-t4,75\* e 4P(10r)-t3,00, diminuindo a espessura, temos uma maior esbeltez, e obteve-se uma menor capacidade de carga, o que está de acordo com o que foi verificado pela autora.

#### 4.2.2. Resultados teóricos

Os resultados experimentais da capacidade máxima de transferência de carga total ( $V_{Rn,experimental}$ ) de cada protótipo foram comparados aos valores teóricos ( $V_{Rn,teorico}$ ), obtidos pelas equações (6) e (7), do item 2.6.1 da ABNT NBR 16239:2013. Para fins de comparação, os coeficientes de ponderação das formulações teóricas foram adotados igual a 1. Os resultados teóricos e experimentais, e a comparação entre esses estão apresentados no Quadro 3. O menor valor determinado pelas equações será o modo de falha do sistema. Esse valor será multiplicado pelo número de conectores, admitindo que todos tenham a mesma taxa de contribuição, para determinar-se um valor teórico ( $V_{Rn,teorico}$ ) que possa ser comparado com o valor experimental ( $V_{Rn,experimental}$ ). Para a utilização das equações da ABNT NBR 16239:2013, bem como as equações da ABNT NBR 8800:2008 e a norma europeia EN 1994-1-1:2004, será adotado como  $d_b$  o diâmetro interno real da rosca do parafuso, sendo  $d_b = 8,5 \text{ mm}$  para 4P(10r)-t4,75\* e  $d_b = 10,2 \text{ mm}$  para 4P(12r)-t4,75\*.

Quadro 3 - Comparação entre os resultados experimentais e teóricos a partir das equações da ABNT NBR 16239:2013.

Protótipo	Esmagamento do Concreto (kN)		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo de aço (kN)	$V_{Rn,teo}$ (kN)	$V_{Rn,exp}$ (kN)	$\frac{V_{Rn,exp}}{V_{Rn,teo}}$
	$l_b d_b f_{cm}$	$5d_b^2 f_{cm}$	$\frac{0,4\pi d_b^2 f_{ub}}{4}$	$2,4d_b t f_u$			
4P(10r)-t4,75	5,69	9,58	23,78	38,13	22,78	157	6,89
4P(12r)-t4,75	6,83	13,80	33,56	45,75	27,33	141,6	5,18

Analisando os resultados apresentados no Quadro 3, observa-se que o modo de falha prevalente, de acordo com as equações ABNT NBR 16239:2013, é o esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso, como comprova os valores destacados. Como esse é o menor valor encontrado dentre os resultados das equações da norma brasileira, multiplica-se por quatro, admitindo-se que os conectores terão mesma contribuição na força resistente teórica ( $V_{Rn,teorico}$ ). Comparando os resultados teóricos com os resultados experimentais ( $V_{Rn,experimental} / V_{Rn,teorico}$ ) verifica-se que os valores experimentais estão cerca de 6,9 vezes e 5,2 vezes maiores do que os valores encontrados pelas equações da norma, mostrando que a ABNT NBR 16239:2013 dimensiona conectores parafuso a favor da segurança, porém é muito conservadora para esse cálculo.

Um dos motivos para tal divergência é que a ABNT NBR 16239:2013 não considera o confinamento do concreto localizado abaixo do parafuso. Segundo Xavier (2017), o confinamento deveria ser considerado para verificação do esmagamento do concreto, sugerindo duas hipóteses: a utilização da  $\sigma_{c,Rn}$  obtida pela Equação (8) da ABNT NBR 8800:2008, e o cálculo da  $\sigma_{c,Rn}$  recomendado pela EN 1994-1-1:2004 (Equação (9)).

$$\sigma_{c,Rd} = f_{cd} \left( 1 + \eta_{cL} \frac{t f_y}{a f_{ck}} \right) \sqrt{\frac{A_c}{A_1}} \leq \frac{A_c f_{cd}}{A_1} \leq f_{yd} \quad (9)$$

Onde,

$f_{cd}$  é resistência do cálculo do concreto à compressão.

$\eta_{cL}$  é fator de confinamento, sendo 3,5 para seções retangulares.

$t$  é a espessura do tubo de aço

$a$  é a maior dimensão do tubo retangular

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço

$A_c$  é a área da seção do concreto dividida pelo número de parafusos dispostos nessa seção.

$A_1$  é área de contato do fuste do parafuso com o concreto.

$f_{yd}$  é resistência de cálculo ao escoamento do aço

O Quadro 4 apresenta os dados obtidos adotando o  $\sigma_{c,Rn}$ , de acordo com a norma ABNT NBR 8800:2008.

Quadro 4 - Comparação entre os resultados experimentais e teóricos considerando o efeito do confinamento, adotando  $\sigma_{c,Rn}$  da ABNT NBR 8800: 2008.

Protótipo	Esmagamento do Concreto (kN)		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo de aço (kN)	$V_{Rn,teo}$ (kN)	$V_{Rn,exp}$ (kN)	$\frac{V_{Rn,exp}}{V_{Rn,teo}}$
	$l_b d_b \sigma_{c,Rn}$	$5d_b^2 \sigma_{c,Rn}$	$\frac{0,4\pi d_b^2 f_{ub}}{4}$	$2,4d_b t f_u$			
4P(10r)-t4,75	11,4	19,17	23,78	38,13	45,55	157	3,45
4P(12r)-t4,75	13,67	27,60	33,56	45,75	54,66	141,6	2,59

Há uma significativa melhora na representatividade dos valores normativos quando considerado o estado de confinamento do concreto de acordo com a ABNT NBR 8800:2008. Analisando os resultados apresentados no Quadro 4, observa-se que os resultados experimentais são aproximadamente 3,5 e 2,6 vezes superior ao calculado por norma, mantendo-se conservador, mas apresentando um dado mais próximo do real. Com essa consideração, o modo de falha permanece sendo o esmagamento do concreto.

Analisou-se então os valores obtidos utilizando-se o  $\sigma_{c,Rn}$ , conforme cálculo da EN 1994-1-1:2004 para a verificação do esmagamento do concreto próximo ao parafuso. Os dados encontrados nessa análise estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Comparação entre os resultados experimentais e teóricos considerando o efeito do confinamento, adotando  $\sigma_{c,Rn}$  da norma europeia EN 1994-1-1:2004.

Protótipo	Concreto (kN)		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo de aço (kN)	$V_{Rn,teo}$ (kN)	$V_{Rn,exp}$ (kN)	$\frac{V_{Rn,exp}}{V_{Rn,teo}}$
	$l_b d_b \sigma_{c,Rn}$	$5d_b^2 \sigma_{c,Rn}$	$\frac{0,4\pi d_b^2 f_{ub}}{4}$	$2,4d_b t f_u$			
4P(10r)-t4,75*	48,81	82,16	23,78	38,13	95,12	157	1,65
4P(12r)-t4,75*	75,62	152,74	33,56	45,75	134,23	141,6	1,05

Aplicando-se a tensão de confinamento localizada abaixo do parafuso, a partir da equação sugerida pela norma europeia, os resultados das equações da ABNT NBR 16239:2013 indicam uma falha pelo cisalhamento do parafuso para os dois protótipos analisados.

Entretanto, como já mencionado anteriormente, é um equívoco admitir para protótipos que apresentam duas alturas de conectores que haverá a mesma taxa de contribuição para todos os parafusos instalados. Já que a capacidade de transmissão

de esforços dos parafusos inferiores é 0,64 vezes a capacidade de carga dos parafusos superiores. Nesse caso, quatro parafusos dispostos em duas alturas equivalem a 3,28 parafusos. Verifica-se com isso, a necessidade do valor da capacidade de carga por parafuso para o 4P(12r)-t4.75\* seja multiplicada por 3,28, e não quatro, como feito anteriormente, alcançando os valores apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Comparação entre os resultados experimentais e teóricos considerando o efeito do confinamento, adotando  $\sigma_{c,Rn}$  da norma europeia EN 1994-1-1:2004, considerando a taxa de contribuição dos conectores do protótipo 4P(12r)-t4,75\*.

Protótipo	$V_{Rn,teo}$ (kN)	$V_{Rn,exp}$ (kN)	$\frac{V_{Rn,exp}}{V_{Rn,teo}}$
4P(10r)-t4,75*	95,12	157	1,65
4P(12r)-t4,75*	100,67	141,6	1,41

Portanto, considerando o efeito de confinamento sugerido pela norma europeia EN 1994-1-1:2004 e a taxa de contribuição para os parafusos instalados em alturas diferentes, são obtidos bons resultados, mais próximos do real.

Entretanto, analisando os materiais que compõe o protótipo, após o ensaio, observa-se danos no concreto, como expostos na Figura 26 e na Figura 32.



(a) Corte da parede do tubo para identificar o rompimento do corpo de prova



(b) Corte na região do concreto para identificar o modo de falha.

Figura 32 – Corte do protótipo 4P(10r)-t4,75\*.

Além disso, observa-se pelos dados do extensômetro que houve escoamento do aço para o protótipo 4P(12r)-t4,75\*. Verificando o estado que os conectores estavam após o ensaio, como apresentado na Figura 33, vemos que não houve cisalhamento do conector, mas houve a flexão deste, como mostrado na Figura 33.



(a) Parafuso de 10 mm



(b) Parafuso de 12 mm



(c) Flexão do parafuso de 10 mm



(d) Flexão do parafuso de 12 mm

Figura 33 – Conectores após o ensaio.

Portanto, observa-se que há um conjunto de falhas que atuam mutuamente para compor o modo de falha do sistema. As equações da ABNT NBR 16239:2013 analisam individualmente os modos de falha de cada material, mas não consideram uma equação que trabalhe essa ruptura conjunta com todos os modos de falha acoplados. Propõe-se com isso que sejam estudadas adequações para trabalhar com o modo de falha conjunto dos materiais que compõem no PMPC na região de transferência de carga do conector parafuso.

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados experimentais desse estudo dos protótipos 4P(12r)-t4,75\* e 4P(10r)-t4,75\*, verificou-se que a carga total suportada pelo protótipo com parafusos de diâmetro de 12 mm foi um pouco menor do que a carga total suportada no protótipo com parafuso de 10 mm, o que não era esperado devido a maior resistência ao cisalhamento do parafuso de maior diâmetro. Sendo o diâmetro do parafuso e a disposição dos parafusos as únicas características que os diferem entre si, constatou-se que a taxa de contribuição de transferência de carga dos parafusos não é igual nas duas alturas de conectores instalados no protótipo 4P(12r)-t4,75\*. Acredita-se que os parafusos que estão na seção superior serão solicitados primeiro ao carregamento aplicado no núcleo de concreto, enquanto que os conectores da seção transversal inferior só serão solicitados depois que os parafusos de cima forem sacrificados, havendo, portanto, uma distribuição de esforços entre os parafusos de forma não igualitária, possivelmente relacionada à baixa ductilidade do concreto, e conseqüente rompimento deste para elevados deslocamentos.

Para verificar os parâmetros que influenciam a eficiência dos parafusos como conectores, os resultados experimentais desse estudo foram comparados com os resultados obtidos na tese em andamento de Xavier (2022). Observou-se que aumentando o diâmetro do parafuso de 10 mm para 12 mm, comparando protótipos com parafusos instalados em uma única altura do plano da seção transversal, gera-se um aumento na capacidade de transferência de carga dos parafusos. Esse resultado é convergente com o que concluiu Xavier (2017).

Já o aumento na quantidade de parafusos não é proporcional ao aumento de capacidade de carga total do protótipo, havendo uma redução na capacidade de carga por conector. Observou-se que essa não proporcionalidade pode estar vinculada à disposição dos parafusos quando estes são distribuídos em duas alturas da seção transversal do protótipo. Porém, no estudo de Xavier *et al.* (2019) os autores citam que a disposição dos parafusos em duas alturas não interfere na capacidade de carga por conector, o que diverge das conclusões deste trabalho, já que foi identificado uma

divergência nos comportamentos dos protótipos 4P(12r)-t4,75\* e 2P(12r)-t4,75. Com isso, observa-se que a disposição dos parafusos em duas alturas da seção transversal impacta sim na eficiência de transferência de carga dos parafusos como conectores. Contudo, ao contrário do que foi determinado no estudo de Chaves (2019), onde para duas linhas de conectores a capacidade de carga por parafuso era maior, neste estudo os parafusos distribuídos em uma única altura tiveram maior capacidade de carga por parafuso.

A hipótese defendida aqui é a mesma já explicada no primeiro parágrafo dessa conclusão. Acredita-se que os parafusos que estão na seção superior do protótipo 4P(12r)-t4,75\* estão solicitados primeiro ao carregamento aplicado no núcleo de concreto, enquanto que os conectores da seção transversal inferior só serão solicitados depois que os parafusos de cima forem sacrificados, havendo, portanto uma distribuição de esforços entre os parafusos de forma não igualitária. Verificou-se a partir da comparação entre resultados que a linha superior de parafusos estaria contribuindo com 60,89% da carga total. Com isso, considera-se que os parafusos dispostos na seção transversal inferior do protótipo 4P(12r)-t4,75\* suportaram o equivalente a uma taxa de contribuição de 39,11%.

Quanto a espessura da parede do tubo de aço, observou-se que o aumento da espessura proporciona um aumento na capacidade de transferência de carga do parafuso. Verifica-se que tubos de parede menos esbelta, menor valor de  $B/t$ , apresentam maior capacidade de transferência de carga, assim como observado nos trabalhos de Chaves *et al.* (2021), Chaves (2019) e Xavier (2017).

Comparando os resultados experimentais desse trabalho com os resultados teóricos da norma brasileira, verificou-se que a ABNT NBR 16239:2013 propõe formulações conservadoras para o dimensionamento do parafuso como conector de cisalhamento em PMPC, conforme havia sido observado também por Xavier (2017), Almeida (2012), Neto (2016), Prates (2017), Chaves (2019), Xavier, *et al.* (2019). Observou-se que para os protótipos analisados nesse estudo não há um modo de falha brusco em nenhum dos materiais que compõe o PMPC.

A partir da adequação das formulações da ABNT NBR 16239:2013 com a consideração do efeito do confinamento localizado do concreto pela EN 1994-1-

1:2004, foi identificado que as equações da norma brasileira estavam a favor da segurança e menos conservadoras. Para essa verificação adotou-se também uma taxa de contribuição no cálculo do valor teórico no protótipo 4P(12r)-t4.75\*. Como verificado, é um equívoco admitir para protótipos que apresentam duas alturas de conectores que haverá a mesma taxa de contribuição para todos os parafusos instalados. Comparando os resultados experimentais chegou-se que o valor da capacidade de carga teórica por parafuso para o 4P(12r)-t4.75\* fosse multiplicado por 3,28 e não por 4 (relativo ao número de parafusos no protótipo).

Analisando os resultados teóricos a partir da adequação das formulações da ABNT NBR 16239:2013, verificou-se que as equações agora apontavam que ocorreu o modo de falha de cisalhamento do parafuso, mesmo modo identificado nos estudos de Xavier (2017) e Xavier, *et al.* (2019). Porém, ao abrir os protótipos após os ensaios, observa-se que há um conjunto de falhas que atuam mutuamente para a compor o modo de falha do sistema. Verifica-se que há uma compatibilização entre os materiais, em que nenhum modo de falha se sobressai entre os demais. As equações da ABNT NBR 16239:2013 analisam individualmente os modos de falha de cada material, mas não consideram uma equação que trabalhe essa ruptura conjunta com todos os modos de falha misturados.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

A partir dos resultados apresentados e das conclusões desse trabalho, verificou-se a necessidade de haver equações para o dimensionamento do parafuso conector que considerem os modos de falha dos materiais que compõem o PMPC de modo combinado. Sugere-se com isso que em trabalhos futuros sejam estudadas adequações das equações existentes ou elaboração de novas equações que considerem o modo de falha conjunto dos materiais que compõem no PMPC na região de transferência de carga do parafuso.

Verifica-se também a necessidade de estudos mais aprofundados, com análises numéricas, para verificar a hipótese levantada sobre a taxa de contribuição dos parafusos instalados em 2 alturas da seção transversal. Talvez a análise numérica seja a melhor forma de se observar se os parafusos que estão na linha superior do

protótipo estão sendo mais solicitados e sacrificados antes de haver distribuição de carga para os parafusos inferiores.

## 6 Referências Bibliográficas

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800**: Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16239**: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8522- 1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14323**: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio. Rio de Janeiro, 1999.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6892**: Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova**. Rio de Janeiro, 2015.

EN 1994-1-1. Eurocode 4: **Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings**. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

AGUIAR, O. P. **Estudo do Comportamento de Conectores Crestbond em Pilares Mistos Tubulares com concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ALMEIDA, P. H. F. D. **Estudo Numérico de um Dispositivo de Transferência de Cargas em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

BARTSCHI, R. **Load - Bearing Behaviour of Composite Beams in Low Degrees of Partial Shear Connection**. Dissertation (Doctor of Technical Sciences) - Swiss Federal Institute of Technology zurich, Sumiswald, Janeiro 2005.

BERGMANN, R. et al. **Design Guide for concrete filled hollow section columns under static and seismic loading**. Koln: Construction with hollow steel sections, v. 5, 1995.

CARDOSO, H. D. S. **Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado - Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CHAVES, M. D. F. F. **Análise numérica de conectores de cisalhamento em pilar misto tubular**. 2019. Dissertação (Mestrado – Engenharia Civil) – Estruturas e Construção – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

CHAVES, M. D. F. F. et al. Study of bolts used as shear connectors in concrete-filled steel tubes. **Engineering Structures**, n 231, p.1-16, 2021.

GIAKOUMELIS, G.; LAM, D. Axial Capacity of circular concrete-filled tube columns. **Journal of Constructional Steel Research**, Leeds, v. 60, p. 1049-1068, 2004.

HU, H.- T. et al. Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, p. 1322-1329, Outubro 2003.

JOHANSSON, M.; GYLLTOFT, K. Mechanical Behavior of Circular Steel – Concrete Composite Stub Columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, p. 1073-1081, 2002.

K.A.S.SUSANTHA, K. A. S.; GE, H.; USAMI, T. Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes. **Engineering Structures**, Nagoya, v. 23, p. 1331-1347, Fevereiro 2001.

NARDIN, S. D.; DEBS, A. L. H. C. E. Axial load behaviour of concrete-filled steel tubular columns. **Structures & Buildings**, v. 60, p. 13-22, Fevereiro 2007.

NATALI, J. F. et al. New methodology to analyze the steel-concrete bond in CFST filled with lightweight and conventional concrete. **Materials and Structures**, p. 1-12, Janeiro 2021.

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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Construção Metálica - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, abril 2016.

OLIVEIRA, W. L. A. D. **Análise Teórico-Experimental de Pilares Mistos Preenchidos de Seção Circular**. Tese (Doutorado - Engenharia de estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, junho 2008.

PRATES, J. A. **Conectores parafusos instalados com rebite para transferência de carga em pilares mistos com perfis formados a frio preenchidos com concreto**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

QU, X. et al. Load-reversed push-out tests on rectangular CFST columns. **Journal of Constructional Steel Research**, Tianjin, v. 81, p. 35-43, Fevereiro 2013.

QUEIROZ, F. D. **Modelos para Análise de Pilares Mistos pelo Método dos Elementos Finitos**. 2003. Dissertação (Mestrado - Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro 2003.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MARTINS, A. G. **Estruturas Mistas**. 2<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Instituto aço Brasil/ Centro Brasileiro da Construção em Aço, v. 1, 2012.

RANKOVIC, S.; DRENIC, D. Static Strength of the shear connectors in steel-concrete composite beamns regulations and research analysis. **Architecture and Civil Engineering**, Nis, v. 2, n. 4, p. 251-259, março 2002.

SOARES, A. F. F. **Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Produção Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009.

VIRDI, K. S.; DOWLING, P. J. Bond strength in concrete filled steel tubes. **IABSE proceedings**, London, v. 3, p. 124-139, 1980.

XAVIER, E. et al. 2019 Experimental Analysis of bolts employed as shear connectors in circular concrete-filled tube columns. **Ibracon structures and materials journal**, v. 12, n. 2, p. 337-370, Abril 2019.

XAVIER, E. M. **Análise teórico-experimental do uso de parafuso estrutural como conector de cisalhamento em pilar misto composto de perfil tubular retangular preenchido com concreto**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Construção Metálica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, abril 2017.

XAVIER, E. M. **Análise de dispositivos de transferência de carga tipo parafuso em pilar misto tubular retangular. Em andamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022.

ZHONG, S. T. The Comparison of Behaviors for Circular and Square Concrete-Filled Steel Tube (CFST) Under Axial Compression. **The School of Civil Engineering**, Harbin, p. 199-206, 2013.