

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Análise numérica de conectores de cisalhamento em pilar
misto tubular circular preenchido com concreto.**

MARINA DE FÁTIMA FERREIRA CHAVES

ORIENTADORA: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Ouro Preto
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Análise numérica de conectores de cisalhamento em pilar
misto tubular circular preenchido com concreto.**

MARINA DE FÁTIMA FERREIRA CHAVES

ORIENTADORA: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas e Construção.

Ouro Preto
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C512a Chaves, Marina De Fátima Ferreira .
Análise numérica de conectores de cisalhamento em pilar misto tubular circular
preenchido com concreto. [manuscrito] / Marina De Fátima Ferreira Chaves. - 2019.
148 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Engenharia Civil.
Área de Concentração: Estruturas e Construção.

1. Pilar misto . 2. Cisalhamento. 3. Pilares- Analise numérica. 4. Concreto. I.
Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.01

Bibliotecário(a) Responsável: ANGELA MARIA RAIMUNDO - SIAPE:1.644.803

**ANÁLISE NUMÉRICA DE CONECTORES DE CISALHAMENTO EM PILAR
MISTO TUBULAR CIRCULAR PREENCHIDO COM CONCRETO**

AUTORA: MARINA DE FÁTIMA FERREIRA CHAVES

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 22 de novembro de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc. – UFOP (Presidente)

PARTICIPAÇÃO POR VÍDEO CONFERÊNCIA
Prof. André Tenchini da Silva, D. Sc. – UERJ


Prof. Joel Donizete Martins, D. Sc. – IFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, principalmente à minha mãe Lúcia que nunca permitiu que eu me abatesse mesmo nas dificuldades e também a toda a minha família, minha irmã Juliana, meu irmão Luciano por todo amor e apoio.

À orientadora Arlene pela oportunidade e confiança. Agradeço também a Ellen por toda a paciência, pelos conselhos, ensinamentos e pelo apoio.

Aos meus amigos do mestrado, por todos os momentos de ensinamento e de descontração e partilha, vocês foram muito importantes nessa caminhada.

Agradeço ao Laboratório de estruturas metálicas e mistas não só pela excelente infraestrutura, mas por todos os momentos de ensinamento e também de descontração.

Agradeço ao Gabriel e ao IFMG de Congonhas por ter cedido o laboratório para o ensaio de caracterização.

Agradeço também aos órgãos de fomento CAPES, CNPQ, FAPEMIG e UFOP pela ajuda financeira sem a qual não seria possível realizar essa e muitas outras pesquisas.

Resumo

Os pilares mistos preenchidos com concreto (PMPCs) trazem uma série de vantagens, porém é de extrema importância assegurar que os dois materiais, aço e concreto, trabalhem em conjunto. Em regiões de introdução de cargas, muitas vezes a tensão de aderência entre os dois materiais não é o suficiente para garantir a interação. Nessas regiões é necessário a colocação de conectores de cisalhamento, que tem o objetivo de assegurar transferência de carga entre o aço e o concreto, assegurando o comportamento em conjunto. No presente trabalho foi realizada a análise numérica de modelos de PMPCs tubulares circulares preenchidos com concreto, com a presença de conectores de cisalhamento do tipo parafuso estrutural. Os modelos numéricos foram construídos e analisados no software Simulia ABAQUS 6.14 (2014) e então calibrados com os modelos experimentais Neto (2016). Os modelos contemplam conectores com diferentes geometrias, além da variação da espessura do tubo e da resistência do concreto. A malha de elementos finitos utilizada conta com elementos do tipo C3D8 e C3D10. Foi utilizado o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* para o concreto. Os modelos numéricos, em sua maioria, representam com fidelidade o comportamento de carga por conector *versus* deslocamento dos modelos experimentais. Dentre os modelos construídos, os com parafuso de menor diâmetro do fuste apresentaram resultados mais próximos aos resultados experimentais. Os resultados de carga máxima por conector assim como os experimentais apresentaram valores maiores que os previstos pela norma ABNT NBR 16239: 2013. Com a parametrização de algumas variáveis foi possível concluir que o diâmetro do fuste do conector é a variável de maior influência para o PMPC e a espessura do tubo de aço deve ser compatível com o diâmetro do fuste para que não haja subaproveitamento dos materiais. A relação entre diâmetro do conector e espessura do tubo de aço deve estar entre 1,3 e 2,0. A mudança de comprimento do conector não acarretou alteração significativa na capacidade de carga. A distância mínima entre linhas de conectores de seis vezes o diâmetro, estabelecida pela norma ABNT NBR 16239: 2013 é o suficiente para que não haja sobreposição dos modos de falha dos conectores na direção longitudinal. Os conectores de cisalhamento se mostraram em todos os casos bastante eficientes em transferir as cargas entre os materiais e assegurar o comportamento em conjunto do PMPC. Palavras-chave: pilar misto preenchido com concreto, conectores de cisalhamento, análise numérica.

Abstract

The use of concrete filled steel tubes (CFSTs) has many advantages, although is crucial to guarantee the composite action between the steel tube and the concrete core. In regions of load introduction the bond strength between the steel and the concrete is not enough to prevent the relative slip, for that cases is necessary the use of shear connectors. The shear connectors have the purpose of assure the load transference between the steel and the concrete. In this research is presented a numerical analysis of shear connectors, specifically stud bolts, used in circular CFSTs. The numerical models were build and analyzed on the software Simulia ABAQUS 6.14 (2014) and then calibrated with the experimental results of Neto (2016). Stud bolts with distinct geometries were analyzed, were used also different thickness of the steel tube and different concrete strength in the models. In the finite element mesh were used two different types of element, C3D8 and C3D10. The constitutive model for the concrete used *Concrete Damage Plasticity*. Most part of the numerical models faithfully represents the behavior of the load per connector *versus* displacement of the experimental models. The results of load per connector on this research demonstrate that the formulation of the predicted strength present in Brazilian standard ABNT NBR 16329: 2013 is overrated. With the parameterization of some variables is possible to conclude that the diameter of the connector is the most influent variable in the behavior of the CFST and the thickness of the steel tube must be compatible with the diameter of the shear connector. The ideal relation between the diameter of the connector and the thickness of the steel tube must be between 1.3 and 2.0. The change in the length of the connector didn't cause significant change in load capacity. The minimum distance between the shear connectors of six times the diameter, established by the ABNT NBR 16239: 2013 standard is enough to prevent overlap of the failure modes between the connectors. Shear connectors in all cases proved to be very efficient in transferring the load to the concrete core for the steel tube, assuring the composite action.

Keywords: concrete filled steel tube, shear connectors, numerical analyses.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Revisão Bibliográfica	4
1.2.1 Pilares mistos.....	4
1.2.2 Interface entre o concreto e o aço.....	5
1.2.3 Conectores de cisalhamento	7
1.3 Objetivo	11
1.4 Metodologia.....	11
1.5 Justificativa	11
1.6 Estrutura da dissertação	12
CAPÍTULO 2.....	14
2 Análise teórica.....	14
2.1 Generalidades.....	14
2.2 Pilares Mistos Preenchidos com Concreto (PMPC)	16
2.3 Confinamento do concreto.....	19
2.4 Interface entre o concreto e o aço	21
2.5 Conectores de cisalhamento.....	23
2.5.1 Valores de resistência dos conectores	25
2.5.2 Classificação dos conectores de cisalhamento	26

CAPÍTULO 3.....	29
3 Modelo experimental.....	29
3.1 Dados dos ensaios e dos protótipos.....	29
3.1.1 Dados geométricos da terceira série.....	30
3.1.2 Instrumentação.....	31
3.1.3 Dados do perfil de aço.....	32
3.1.4 Dados do parafuso.....	32
3.1.5 Dados do concreto.....	33
3.1.6 Dados gerais dos protótipos.....	33
3.2 Metodologia dos ensaios.....	35
3.3 Resultados experimentais.....	35
CAPÍTULO 4.....	38
4 Modelo numérico.....	38
4.1 Visão geral do modelo.....	39
4.2 Malha de elementos finitos.....	40
4.3 Condições de Contorno e aplicação de carga.....	42
4.4 Interações de contato.....	44
4.5 Análise utilizada.....	47
4.6 Modelos constitutivos.....	47
4.6.1 Modelo constitutivo usado no concreto.....	48
4.6.2 Comportamento do concreto à compressão e à tração.....	51

4.6.3	Curva de comportamento do concreto.....	53
4.7	Modelo constitutivo do tubo de aço e do parafuso	64
CAPÍTULO 5.....		66
5	Resultados e discussões	66
5.1	Modelos Série A (db=1/2")	70
5.2	Modelos Série B (db=5/8")	82
5.3	Modelos Série C (db=3/4")	94
5.4	Observações gerais	106
CAPÍTULO 6.....		112
6	Parametrização.....	112
6.1	Estudo da influência da espessura do tubo de aço	113
6.2	Estudo da influência do comprimento dos conectores.....	116
6.3	Estudo da influência da posição dos conectores	118
6.4	Estudo da influência da quantidade de conectores	119
6.5	Estudo da influência da disposição de conectores	120
CAPÍTULO 7.....		124
7	Considerações finais	124
7.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	126

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Imagens do prédio Concordia Corporate Tower em diferentes estágios da sua construção. Fonte: Téchné (2018)	2
Figura 1.2 - Edificações que utilizam PMPCs localizadas na China. Fonte: Wang e Zhang (2017)	3
Figura 1.3 - Pilares mistos preenchidos com concreto em fase de construção. Fonte: Araújo <i>et al.</i> (2016)	3
Figura 2.1 Tipos de seções transversais de pilares mistos. Fonte: Modificado de ABNT NBR 8800 (2008)	15
Figura 2.2 - Comportamento à compressão axial de colunas curtas. Fonte: Modificado de Han, Li, e Bjorhovde (2014).....	16
Figura 2.3 - Estado de tensões no pilar misto na tração e na compressão. Fonte: Araújo et al. (2016).....	20
Figura 2.4 - Efeito de confinamento na seção retangular e circular. Fonte: Oliveira (2008)	20
Figura 2.5 - Irregularidades na superfície do tubo mostrando o desvio em relação cilindro sem imperfeições. Fonte: Modificado de Viridi e Dowling (1980).....	22
Figura 2.6 - Curva qualitativa de força deslizamento. Fonte: Modificado de Qu et al. (2015)	23
Figura 2.7 Esquema de emprego do dispositivo tipo 1 - parafuso estrutural. Fonte: Modificado de ABNT NBR 16329:2013.....	26
Figura 2.8 - Características típicas de conectores. Fonte: Bärtschi (2005) <i>apud.</i> Xavier (2017)	27
Figura 2.9 - Relação força deslizamento de conectores rígidos e flexíveis. Fonte: Modificado de Ranković, Slobodan e Drenić (2002).....	28

Figura 3.1- Representação esquemática do ensaio. Fonte: Xavier <i>et al.</i> (2019)	30
Figura 3.2 Configuração dos protótipos da série. Fonte: Neto (2016)	31
Figura 3.3 - Esquema de instrumentação mostrando a posição dos LVDT's.....	32
Figura 3.4 - Curvas carga x deslocamento de alguns modelos experimentais	37
Figura 4.1- Imagens dos modelos numéricos A4 e A6.....	40
Figura 4.2- Elemento C3D8. Fonte: Dhondt (2014).....	41
Figura 4.3- Elemento C3D10. Fonte: Dhondt (2014).....	41
Figura 4.4 - Imagem mostrando o detalhe da malha com os diferentes tipos de elementos	42
Figura 4.5 – Imagem mostrando a base no modelo experimental e a representação no modelo numérico	43
Figura 4.6- Recursos de simetria presente no modelo.....	43
Figura 4.7 - Imagem mostrando o local de aplicação da carga	44
Figura 4.8 – Contatos existentes no modelo.....	45
Figura 4.9 – Detalhe da geometria do parafuso do modelo numérico e do experimental	46
Figura 4.10 – Curvas de avaliação mudando ângulo de dilatância utilizado	49
Figura 4.11 - Curvas de avaliação da mudança parâmetro de viscosidade utilizado	50
Figura 4.12 - Curvas de compressão e tração no concreto. Fonte: Simulia ABAQUS 6.14 (2014)	51
Figura 4.13 - Curvas tensão-deformação a) norma europeia e b) de Van Gysel e Terwe (1996) para concreto com resistência de 19,7MPa.....	54
Figura 4.14 - Comparação do modelo experimental com o numérico utilizando curva do concreto de Van Gysel e Terwe (1996).....	55

Figura 4.15 - Modelo de curva tensão-deformação. Fonte: Modificado Tao, Wang e Yu (2013)	56
Figura 4.16 – Comparação do modelo experimental com o modelo numérico utilizando a curva do concreto de Tao, Wang e Yu (2013).....	57
Figura 4.17 – Comparação do modelo experimental com o modelo numérico utilizando a curva do concreto de Huang <i>et al.</i> (2002)	58
Figura 4.18 - Comparação do modelo experimental com o modelo numérico utilizando a curva do concreto de GB50010-2002 do a) modelo A4 e b) modelo A6.....	59
Figura 4.19- Curva de comportamento uniaxial do concreto à compressão (a) e tração (b)	61
Figura 4.20 - Comparação do modelo experimental com o modelo numérico utilizando a curva do concreto de Alfarah, López-Almansa e Oller (2017)	63
Figura 4.21 - Curva de tensão <i>versus</i> deformação dos tubos de aço utilizados	65
Figura 4.22 - Curva de tensão <i>versus</i> deformação dos parafusos utilizados	65
Figura 5.1 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo A1.....	71
Figura 5.2 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo A2.....	72
Figura 5.3 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo A3.....	74
Figura 5.4 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo A4.....	75
Figura 5.5 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo A5.....	77
Figura 5.6 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo A6.....	78

Figura 5.7 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo B1	83
Figura 5.8 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo B2	85
Figura 5.9 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo B3	86
Figura 5.10 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo B4	87
Figura 5.11 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo B5	88
Figura 5.12 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo B6	90
Figura 5.13 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo C1	95
Figura 5.14 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo C2	96
Figura 5.15 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo C3	97
Figura 5.16 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo C4	99
Figura 5.17- Comparação da deformada de dano dos modelos a) A4 e b) C4	100
Figura 5.18 - Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo C5	100
Figura 5.19- Curva de comparação dos resultados experimentais e numérico e curvas de deformadas do modelo C6	102

Figura 5.20 – Imagens da abertura dos protótipos a) A1 e b) C4 depois de ensaiados. Fonte: Neto (2016)	109
Figura 5.21 -Representação da posição dos conectores com comprimento de 4” no modelo experimental. Fonte Neto (2016).....	110
Figura 6.1 – Curva de comportamento das tensões de von Mises nos pontos A, B, C e D dos modelos numéricos	114
Figura 6.2 - Tensões de von Mises dos tubos de aço	116
Figura 6.3- Curva de comparação da análise do comprimento dos conectores.....	117
Figura 6.4 - Curva de comparação da análise da distância entre conectores.....	119
Figura 6.5 - Curva de comparação da análise da quantidade de conectores	120
Figura 6.6- Curva de comportamento da comparação dos modelos com diferentes posições de conectores juntamente com as tensões de von Mises e o dano retirados no final da análise	121
Figura 6.7 - Curva de comportamento da comparação dos modelos com diferentes posições de conectores juntamente com as tensões de von Mises e o dano retirados no final da análise	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Propriedades dos perfis de aço. Fonte: Modificado de (Neto, 2016)	32
Tabela 3.2- Resistência parafuso com diâmetro de 1/2"	32
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do parafuso com diâmetro igual a 5/8"	33
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas do parafuso com diâmetro igual a 3/4"	33
Tabela 3.5- Divisão das séries de análises	33
Tabela 3.6 - Nomenclatura e características dos perfis ensaiados.....	34
Tabela 3.7 – Valores de resistências teóricas e experimentais dos modelos.....	36
Tabela 4.1 - Parâmetros do CDP utilizados no modelo numérico.....	51
Tabela 4.2 - Resumo da comparação das formulações.....	63
Tabela 4.3- Propriedades dos tubos inseridas utilizadas	64
Tabela 4.4 - Propriedades dos conectores utilizados.....	65
Tabela 5.1- Geometria dos parafusos utilizados.....	67
Tabela 5.2 – Séries de modelos analisadas.....	68
Tabela 5.3 - Nomenclatura dos modelos analisados.....	69
Tabela 5.4 - Dados dos modelos da Série A.....	70
Tabela 5.5 -Resultados e comparação dos valores de resistência teóricas e experimentais	79
Tabela 5.6 - Comparação dos valores de resistência teóricas segundo a NBR 16239:2013, experimentais e numéricas da série A.	80
Tabela 5.7 – Comparação dos valores de resistência teóricas segundo a EN 1994-1-1: 2004, experimentais e numéricas da série A.	81

Tabela 5.8 - Dados dos modelos da Série B	82
Tabela 5.9 - Resultados e comparação dos valores de resistência teóricos e experimentais	91
Tabela 5.10 - Comparação dos valores de resistência teóricos segundo a ABNT NBR 16329:2013, experimentais e numéricos da série B.	92
Tabela 5.11 - Comparação dos valores de resistência teóricos segundo a EN 1994-1-1: 2004, experimentais e numéricos da série B.	93
Tabela 5.12 - Dados dos modelos da série C.....	94
Tabela 5.13 - Resultados e comparação dos valores de resistência teóricos e experimentais	103
Tabela 5.14 - Comparação dos valores de resistência teóricos segundo a ABNT NBR 16329:2013, experimentais e numéricos da série C.	105
Tabela 5.15 - Comparação dos valores de resistência teóricos segundo a EN 1994-1-1: 2004, experimentais e numéricos da série C.	106
Tabela 5.16 - Seções transversais dos modelos e as áreas correspondentes a cada material	111
Tabela 6.1 – Dados de resistência nominais do aço do parafuso e do tubo	113
Tabela 6.2 - Dados de resistência nominal do concreto	113
Tabela 6.3- Modelos Numéricos de Parametrização da Espessura	113
Tabela 6.8 - Modelos numéricos de análise da disposição de conectores.....	121
Tabela 6.9 - Valores de carga máxima dos modelos de parametrização da disposição	122