

Capacidade resistente de pilares mistos preenchidos sob flexocompressão

Ruan Aparecido de Melo¹, Alex Sander Clemente de Souza^{2*}, Silvana De Nardin^{3*}

¹ Mestrando no PPGE Civ - Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar,
rwanmelo@hotmail.com

² Professor Doutor do PPGE Civ - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar,
alex@ufscar.br

³ Professora Doutora do PPGE Civ - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar,
snardin@ufscar.br

Load capacity of concrete filled steel tube columns under eccentric loads

Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para análise numérica de pilares mistos preenchidos de seção quadrada submetidos a flexocompressão. Para a modelagem foi utilizado o pacote computacional Ansys® versão 15.0 e o modelo numérico foi validado utilizando resultados experimentais. São discutidos aspectos importantes da escolha dos elementos finitos, malha e forma de aplicação da força, bem como os modelos constitutivos de aço e concreto. Após validado, o modelo numérico foi utilizado para avaliar a influência da resistência ao escoamento do aço e da excentricidade da força aplicada na capacidade resistente do pilar misto preenchido.

Palavras-chave: pilares mistos preenchidos, seção quadrada, modelo numérico, força excêntrica, resistência ao escoamento do aço.

Abstract

This paper reports the development of a methodology for the numerical analysis of the square concrete filled steel tube composite columns under eccentric loads. The software Ansys was used to develop the numerical models, which were validated using experimental results. Aspects as type of finite elements, mesh, load application and constitutive models of materials are considered in the present paper. After validation, the numerical model allowed evaluating the influence of the yielding strength of the steel and the eccentricity of the applied load on the load capacity of the composite columns.

Keywords: concrete filled steel tube column, square section, numerical model, eccentric load, yielding strength of steel.

* autor correspondente

1 Introdução

Pilares mistos de aço e concreto são muito utilizados em países da Europa, América e Ásia, porém no Brasil sua utilização ainda é bastante tímida. Isso deve-se a uma série de fatores dentre os quais se destacam o conservadorismo do setor da construção civil e o desconhecimento de engenheiros civis e arquitetos de soluções estruturais em elementos mistos de aço e concreto. Os pilares mistos de aço e concreto são caracterizados pela associação de perfis de aço e concreto estrutural simples ou armado a depender do tipo de pilar misto, de maneira a formar uma seção resistente. Nesse sistema, a combinação de aço e concreto visa tirar partido da resistência mecânica dos referidos materiais a saber, resistência a compressão do concreto e à tração do aço, em um único elemento estrutural. O concreto é um material estrutural com elevada resistência a compressão e quando associado ao concreto na forma de elemento misto, colabora com a proteção do aço em altas temperaturas e minimiza as instabilidades locais dos perfis de aço. Já o perfil de aço é um componente industrializado que apresenta grande precisão dimensional e (redundante) e elevada resistência a tração. Além disso, a ductilidade do aço melhora as características frágeis do concreto, sobretudo daqueles de alta resistência tornando a associação aço-concreto na forma de pilares mistos uma excelente alternativa para elementos predominantemente comprimidos. Em relação ao processo construtivo, esse tipo de elemento estrutural confere rapidez de execução, flexibilidade, liberdade na concepção estrutural, leveza, compatibilidade com outros materiais e uso racional de materiais. Dentre os pilares mistos, destaca-se o do tipo preenchido, caracterizado pelo preenchimento do perfil tubular de aço por concreto (Figura 1).

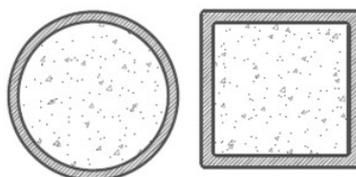


Figura 1 - Seção transversal característica dos pilares mistos preenchidos

Os primeiros documentos relatando estudos de pilares mistos preenchidos foram divulgados na década de 1960 (KNOWLES; PARK, 1969) e trazem resultados de ensaios realizados com elementos submetidos a compressão centrada. Desde então, vários

estudos teóricos e experimentais vêm sendo realizados; como exemplos citam-se Uy (1998), Hu *et al.* (2003), Sakino *et al.* (2004), Wang *et al.* (2012) e Hafiz (2016). Porém, somente a partir da década de 1990 é que são divulgados os primeiros estudos voltados para a modelagem numérica desses elementos estruturais.

A modelagem numérica é uma técnica que consiste na construção de modelos numéricos e calibração destes frente a resultados experimentais para posterior utilização em análises de situações não avaliadas experimentalmente visando a extrapolação dos resultados experimentais. Neste contexto, destacam-se autores como, Ellobody e Young (2006) e Masoudnia *et al.* (2011), Singh e Gupta (2013) e Kurian *et al.* (2016). Por exemplo, Ellobody e Young (2006) apresentam resultados de simulação numérica realizada no pacote computacional ABAQUS® e Masoudnia *et al.* (2011), resultados obtidos utilizando o pacote computacional LUSAS®. Ambos consideraram pilares preenchidos submetidos a compressão centrada. Estudo paramétrico permitiu avaliar a influência de parâmetros geométricos como a esbeltez do pilar preenchido de seção quadrada e a espessura do perfil aço (MASOUDNIA *et al.*, 2011). A exemplo de Ellobody e Young (2006), Singh e Gupta (2013) também utilizaram a ferramenta computacional ABAQUS® para avaliar o comportamento de pilares preenchidos. Os autores desenvolveram estudos numéricos com 16 modelos de pilares preenchidos de seção retangular submetidos à compressão axial. O aço do perfil tubular foi discretizado considerando material com comportamento elasto-plástico perfeito e módulo de elasticidade variando entre 182 a 213 GPa. O critério de plasticidade de “Drucker Prager” foi adotado para descrever o comportamento do concreto confinado. Em relação à interação entre os materiais, foi utilizado um coeficiente de atrito de 0,25. O elemento finito utilizado foi C3D8, elemento com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó. Os modelos numéricos desenvolvidos foram capazes de reproduzir com excelente aproximação o comportamento observado nos ensaios experimentais existentes na literatura.

Três anos mais tarde, Kurian *et al.* (2016) desenvolveram um modelo numérico no pacote computacional ANSYS® objetivando avaliar o comportamento de pilares preenchidos com seções circulares e quadradas submetidos a carregamentos axiais centrados. Foram utilizados elementos SOLID65 para o concreto e elementos

SHELL181 para o aço. A superfície de contato entre os materiais foi modelada utilizando elementos de contato e adotando coeficiente de atrito de 0,25. Após a validação do modelo numérico foi realizado um estudo paramétrico com 8 pilares mistos preenchidos em que foi avaliada a influência de algumas resistências a compressão do concreto na capacidade resistente da pilar. As principais conclusões foram que as deformações nos pilares preenchidos decrescia de 10 a 15% com o aumento da resistência a compressão do concreto. As deformações também eram influenciadas pela forma da seção: circular ou quadrada. A seção circular apresentou melhor comportamento frente às deformações do que a seção quadrada devido a maior eficiência do efeito de confinamento nesse tipo de seção.

No âmbito nacional, os estudos abordando pilares mistos preenchidos de seção quadrada ainda são bastante incipientes oferecendo um vasto campo a ser estudado. Dentre os estudos brasileiros destacam-se: De Nardin (1999), De Nardin (2003), Queiroz (2003), Oliveira (2008), Neuenschwander *et al.* (2014) e Dias *et al.* (2016). A exemplo, De Nardin (1999) apresentou um estudo numérico e experimental buscando avaliar o comportamento do pilar misto preenchido axialmente comprimido. Foram desenvolvidos cinco modelos numéricos por meio do pacote computacional ANSYS®. Para a modelagem dos pilares preenchidos foi empregado o elemento SOLID45. Para o concreto foi utilizado um modelo constitutivo denominado multilinear isotrópico (MISO) e para o aço considerou-se um modelo elasto-plástico perfeito denominado bi-linear isotrópico (BISO), ambos do ANSYS®. Os valores referentes a tensões e deformações para composição dos modelos constitutivos foram determinados experimentalmente. Após validado, o modelo numérico permitiu realizar inúmeras análises de comportamento do pilar misto preenchido axialmente comprimido.

Na sequência, Queiroz (2003) realizou um estudo numérico com pilares mistos de aço e concreto preenchidos e parcialmente revestidos submetidos à compressão e a flexo-compressão com o objetivo de expor e discutir os inúmeros aspectos envolvidos na modelagem como por exemplo a influência de alguns modelos constitutivos e elementos finitos presentes no ANSYS®. O autor concluiu que tanto o elemento SOLID65 quanto SOLID45 são ideais para discretizar o concreto em pilares preenchidos. No mesmo ano, De Nardin (2003) desenvolveu um estudo visando avaliar o

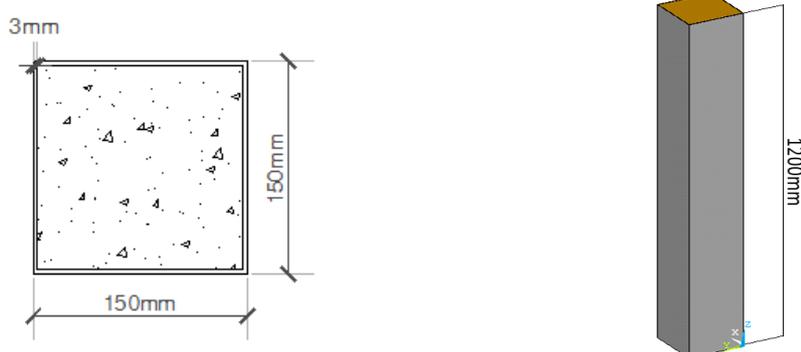
comportamento de pilares mistos preenchidos sob compressão excêntrica. Ao todo foram ensaiados 13 pilares, cujos valores de força última foram comparados aos valores provenientes da simulação numérica realizada via pacote computacional CFT. Após validado, o modelo numérico foi utilizado para avaliar a influência de parâmetros como resistência a compressão do concreto, resistência ao escoamento do aço, excentricidade da força axial, eixo de flexão e relação lado/espessura na capacidade resistente do pilar preenchido. Posteriormente, Oliveira (2008) realizou um estudo numérico-experimental a fim de investigar o efeito de confinamento em pilares mistos preenchidos de seções circulares submetidos a compressão centrada. A modelagem numérica foi realizada no pacote computacional DIANA®. Para modelagem do núcleo de concreto e parte interna do perfil tubular foram utilizados elementos sólidos PE6 TP18L. Para a modelagem do perfil de aço foram utilizados elementos sólidos HE8 HX24L. Além disso utilizou-se também elementos IS44 Q24IF para modelagem da interface entre os materiais. Após a validação o modelo numérico foi utilizado para estimar a capacidade resistente de pilares mistos preenchidos de seção quadrada mostrando boa correlação com os resultados experimentais.

Em Neuenschwander *et al.* (2014) foi realizado um estudo numérico-experimental onde foi ensaiado um pilar misto preenchido de seção quadrada submetido a flexocompressão. Foram avaliados parâmetros como a excentricidade da carga, capacidade resistente do pilar e comportamento da placa de base. Sequenciando os ensaios experimentais foi realizada a modelagem numérica no ABAQUS®. Por fim, Dias *et al.* (2016) realizaram um estudo numérico com o objetivo de analisar o comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de alto desempenho submetidos a flexocompressão. A modelagem foi realizada por meio do pacote computacional ANSYS®. O perfil de aço foi discretizado utilizando elemento SHELL181 e o concreto utilizando elemento SOLID65. O comportamento do aço do perfil foi considerado multilinear isotrópico com plasticidade definida pelo critério de Von Mises e comportamento uniaxial definido com base na curva proposta por Maggi (2004). O comportamento uniaxial do concreto foi representado pela curva tensão-deformação proposta na ABNT NBR 6118 (2004) com critério de falha de “Willam-Warnke”. Foram analisados 332 modelos numéricos de pilares mistos preenchidos. Os resultados foram

comparados aos das normas ANSI/AISC 360-10 (2010) e ABNT NBR 8800 (2008). O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico que represente o comportamento do pilar misto preenchido de seção quadrada submetido a flexocompressão e que seja capaz de prever sua capacidade resistente. Para isso foi utilizado o pacote computacional ANSYS® versão 15.0 e para validação do modelo numérico foram utilizados alguns resultados de De Nardin (2003). Após validado, o modelo numérico foi utilizado para avaliar a influência da excentricidade da força aplicada e da resistência ao escoamento do aço no comportamento e na capacidade resistente de pilares mistos preenchidos de seção quadrada.

2 Características do Modelo Físico ensaiado por De Nardin (2003)

O elemento estrutural aqui tratado consiste em um pilar preenchido de seção quadrada com 150x150mm, perfil tubular de aço com 3mm de espessura e 1200 mm de altura (Figura 2). Os perfis foram obtidos a partir de chapas de aço do tipo SAE 1020, cortadas e dobradas formando dois perfis U, os quais foram soldados com solda do tipo MIG a fim de se obter a seção tubular quadrada. A força excêntrica foi aplicada por meio de chapas de 25,4mm de espessura fixadas nas extremidades do pilar misto. Para evitar a ocorrência de ruptura prematura por concentração de tensões foi utilizada armadura de fretagem nas extremidades do pilar, na região de introdução da força excêntrica.



a) Seção Transversal

b) Seção longitudinal

Figura 2 – Características do modelo físico ensaiado por De Nardin (2003)

As propriedades mecânicas dos materiais do modelo ensaiado por De Nardin (2003) são apresentadas na Tabela 1 e foram determinadas por meio de ensaios de

caracterização e utilizadas no desenvolvimento da modelagem numérica do presente trabalho. Apenas o módulo de elasticidade do aço não foi determinado experimentalmente, tendo sido adotado o valor sugerido pela ABNT NBR 8800 (2008).

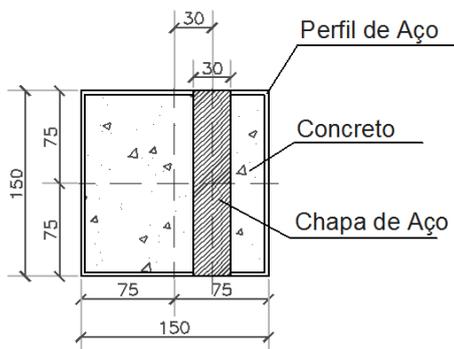
TABELA 1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo físico (DE NARDIN, 2003)

Material	Resistência a Compressão (MPa)	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Resistência última (MPa)
Aço	-	-	200.000	211,4	315,9
Concreto	52,84	3,33	31.514	-	-

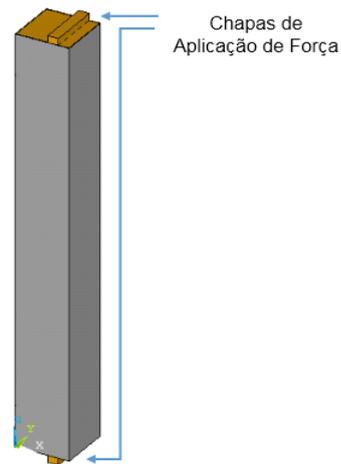
3 Modelo numérico

3.1 Elementos finitos e construção do modelo

Para a modelagem dos pilares mistos preenchidos foram utilizados três tipos de elementos finitos disponíveis da biblioteca do pacote computacional ANSYS®: elementos volumétricos SOLID65 e SOLID45 e elemento de casca SHELL181. O núcleo de concreto foi discretizado utilizando o elemento volumétrico SOLID65 que possui 8 nós com três graus de liberdade por nó (translação nos eixos x, y e z). Esse elemento permite simular a fissuração do concreto a tração (nas três direções ortogonais) e o esmagamento a compressão, possibilitando a consideração da não linearidade física. As chapas de aplicação de força foram discretizadas com elementos tridimensionais SOLID45 (Figura 3). Esse elemento também possui 8 nós e 3 graus de liberdade por nó; trata-se de um elemento bastante similar ao SOLID65, porém não permite simular algumas características típicas do concreto como fissuração e esmagamento. É ideal para promover a distribuição do deslocamento aplicado na face superior do pilar preenchido. O perfil de aço foi discretizado utilizando o elemento de casca SHELL181 que possui 4 nós com 6 graus de liberdade em cada nó (translação e rotação nos eixos x, y e z). O elemento SHELL181 é adequado à modelagem de placas e cascas de paredes finas apresentando bom desempenho na simulação de deformações lineares e não-lineares e na ocorrência de tensões distribuídas.



a) Vista da Chapa de aplicação de força



b) Vista 3D

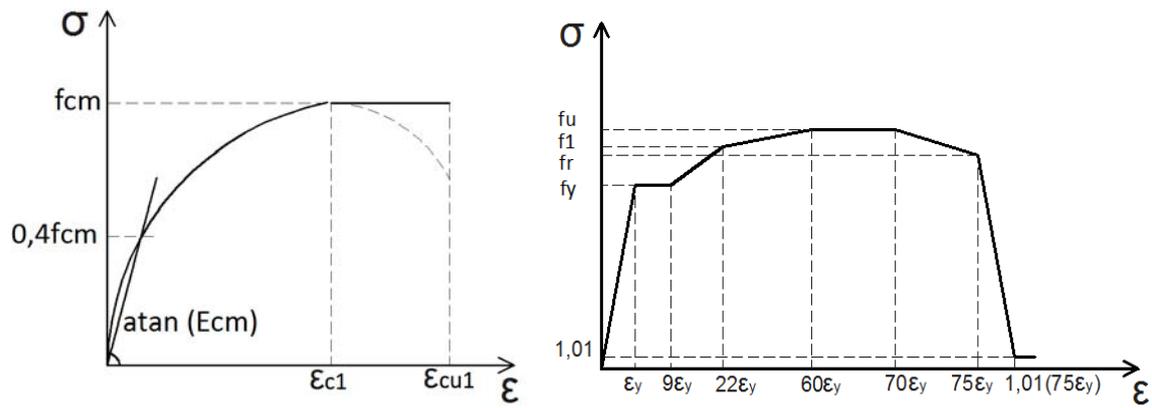
Figura 3 – Chapas de aplicação de força

3.2 Modelos Constitutivos e Propriedades Mecânicas dos Materiais

As curvas tensão vs. deformação do concreto foram definidas com base na curva sugerida pelo Eurocode 2 Parte 1-1 (2004), ilustrada na Figura 4a. O Coeficiente de Poisson do núcleo de concreto foi adotado igual a 0,2 e para o módulo de elasticidade foi utilizado o valor determinado experimentalmente (Tabela 1) e igual a 31514 MPa. O aço dos perfis foi representado pela curva tensão vs. Deformação já utilizada por Tineo (2016) e ilustrada na Figura 4b. Foi considerado módulo de elasticidade para o aço equivalente a 200000 MPa e Coeficiente de Poisson igual a 0,3.

3.3 Condições de vinculação

No modelo numérico em questão foram aplicadas condições de contorno nas faces da chapa de aço e estas foram conectadas ao pilar. Para representar a vinculação da extremidade inferior do pilar foram impedidos os deslocamentos dos nós da face inferior da chapa em todas as direções (x , y e z). Na extremidade superior foram restritos os deslocamentos nas direções x e y em todos os nós da face superior da chapa de aço e foi aplicado deslocamento prescrito na direção z (Figura 5).



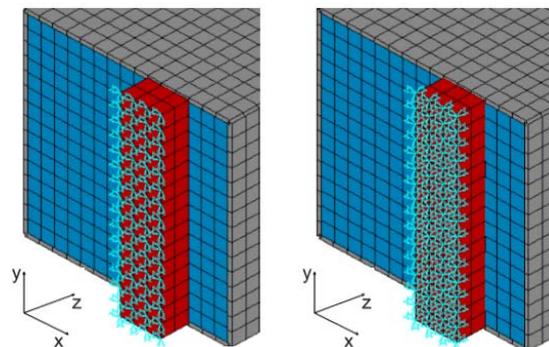
a) Concreto

$f_{cm} = 52,8 \text{ MPa}$
 $E_{cm} = 31510 \text{ MPa}$
 $\epsilon_{c1} = 0,003$
 $\epsilon_{cu1} = 0,0035$

b) Aço

$f_u = 315,9 \text{ MPa}$
 $f_1 = 263,6 \text{ MPa}$
 $f_r = 232,3 \text{ MPa}$
 $f_y = 211,4 \text{ MPa}$
 $\epsilon_y = 0,001057$

Figura 4 – Modelos constitutivos dos materiais utilizados na modelagem



a) Face superior do Pilar

b) Face inferior do Pilar

Figura 5 – Condições de Contorno aplicadas ao modelo numérico

Observando vários estudos voltados para a modelagem numérica de pilares preenchidos como o de DIAS et al. (2016) optou-se pelo Método de Newton-Raphson completo com critério de convergência em deslocamentos. Foi aplicado deslocamento vertical levemente maior que o máximo registrado no ensaio e este foi aplicado em incrementos; como critério de parada foi considerada a perda de convergência do modelo.

3.4 Análise de parâmetros que interferem na modelagem numérica

Levando em consideração alguns fatores já definidos anteriormente como os tipos de elementos finitos e os modelos constitutivos dos materiais, alguns outros parâmetros são avaliados isoladamente de forma que a interpretação da influência de cada um deles seja mais fácil de ser visualizada. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.tem-se um resumo dos parâmetros avaliados.

Tabela 2 – Parâmetros avaliados na modelagem numérica

Identificação	Parâmetros Variáveis		
	Mecanismo de Aplicação de Força	Densidade da malha	Aplicação de Força/Desloc.
Exemplar 1	Deslocamento aplicado diretamente na extremidade do modelo	1810 elementos e 2416 nós	Deslocamento
Exemplar 2	Utilização de uma Chapa de Aço resistente nas extremidades.	1810 elementos e 2416 nós	Deslocamento
Exemplar 3	Utilização de Concreto mais resistente (75MPa) nas extremidades do pilar.	1810 elementos e 2416 nós	Deslocamento
Exemplar 4	Utilização de Concreto mais resistente (75MPa) nas extremidades do pilar.	1810 elementos e 2416 nós	Força
Exemplar 5	Utilização de Concreto mais resistente (75MPa) nas extremidades do pilar.	1610 elementos e 2172 nós	Deslocamento
Exemplar 6	Utilização de Concreto mais resistente (75MPa) nas extremidades do pilar.	36090 elementos e 38604 nós	Deslocamento

No processo de validação do modelo numérico, a partir da análise da influência de um determinado parâmetro, o mesmo passa a ser mantido fixo para as análises posteriores. A fim de avaliar qual o melhor mecanismo de aplicação de deslocamento no modelo numérico três situações foram consideradas: aplicação de deslocamento diretamente no modelo (Exemplar 1), aplicação de deslocamento por meio de uma chapa de aço (Exemplar 2) e utilização de concreto mais resistente na região de aplicação de deslocamentos (Exemplar 3). Mais detalhes sobre cada um dos exemplares são encontrados na Tabela 2. Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos considerando as três situações descritas. De acordo com os resultados mostrados na Figura 6, a melhor representação dos resultados experimentais foi

obtida para o Exemplar 3 em que foi utilizado concreto mais resistente (75 MPa) numa altura de 12 cm nas duas extremidades do pilar para impedir a ocorrência de falha prematura por concentração de tensões na região de aplicação de deslocamento.

Como esperado, o Exemplar 1 apresentou concentração de tensões na região de aplicação de deslocamento atingindo uma força última bastante inferior à do modelo experimental enquanto o Exemplar 2 apresentou valores de força última bastante superiores ao modelo experimental. Já o Exemplar 3 apresentou uma trajetória de comportamento bastante similar à experimental. Cabe lembrar que no Exemplar 3, a fim de evitar a ruptura prematura devido à concentração de tensões na região de aplicação do deslocamento, foi utilizado o artifício de aumentar a resistência das regiões de extremidade (superior e inferior) do modelo por meio da utilização de concreto mais resistente (Figura 7). Esta solução apresentou menor grau de complexidade que a modelagem da armadura de fretagem utilizada no modelo físico, porém se mostrou capaz de produzir resultados experimentais de forma satisfatória. Na Figura 7 é apresentada a disposição dos concretos de 75MPa e 52,8MPa no núcleo do modelo cuja forma de aplicação de carga se demonstrou mais eficiente (Exemplar 3).

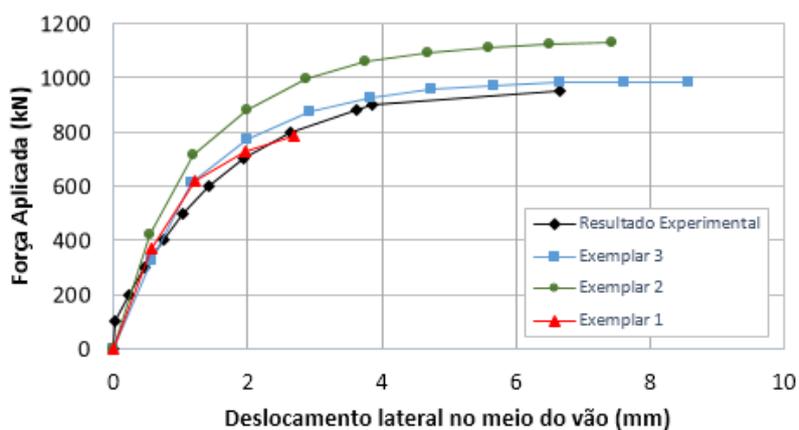


Figura 6 – Influência da forma de aplicação do deslocamento

Outro parâmetro avaliado foi a aplicação de força (Exemplar 4) ou de deslocamento prescrito (Exemplar 3), porém a primeira opção produziu resultados bem superiores aos experimentais (Figura 8).

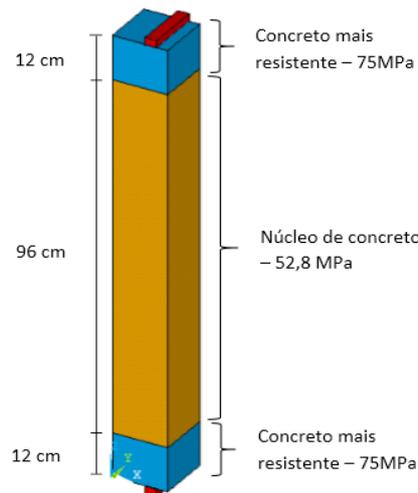


Figura 7 – Disposição dos concretos de 75 MPa e 52,8 MPa no núcleo do pilar

Dessa forma, conclui-se que a aplicação de deslocamentos no topo do pilar produz resultados mais representativos em relação ao modelo físico de referência. Embora no modelo experimental tenha sido aplicada força com controle de deslocamento, observa-se uma maior estabilidade e convergência do modelo numérico quando se faz a aplicação de deslocamentos em substituição à força. Isso deve-se aos métodos de convergência e de aproximação de forças e deslocamentos utilizados pelos modelos numéricos baseados em elementos finitos.

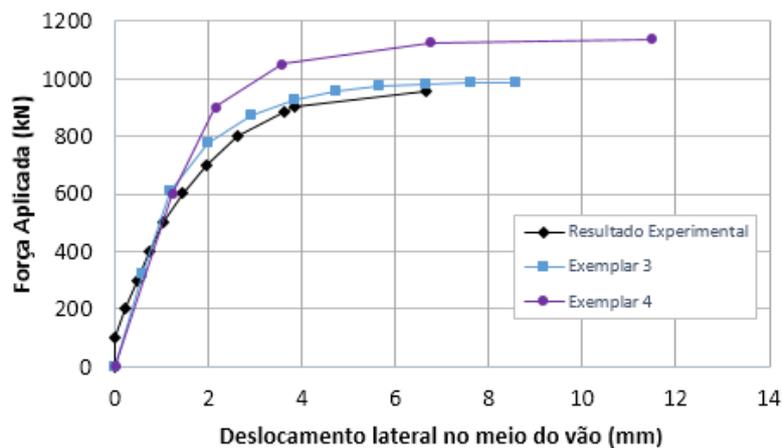
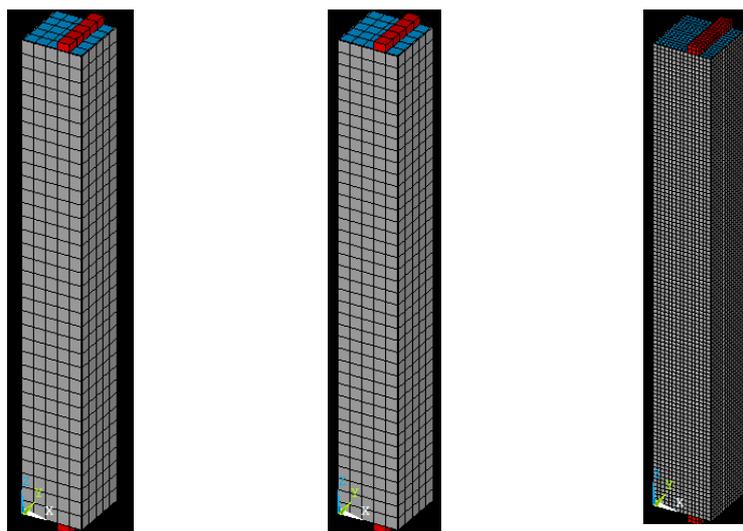


Figura 8 – Influência da aplicação de força x aplicação de deslocamento

Por fim, foi avaliada a influência da densidade da malha de elementos finitos na resposta do modelo numérico. Foram selecionadas três densidades de malhas: pouco densa (Exemplar 5), medianamente densa (Exemplar 3) e bastante densa (Exemplar 6). Os três modelos são ilustrados na Figura 9.



Exemplar 5 – malha pouco densa

Exemplar 3 – malha medianamente densa

Exemplar 6 – malha bastante densa

Figura 9 – Densidades de malha analisadas

Os resultados apresentados na Figura 10 indicam que as densidades de malha avaliadas não produziram influência significativa na resposta do modelo numérico, especialmente nos exemplares 5 e 6.

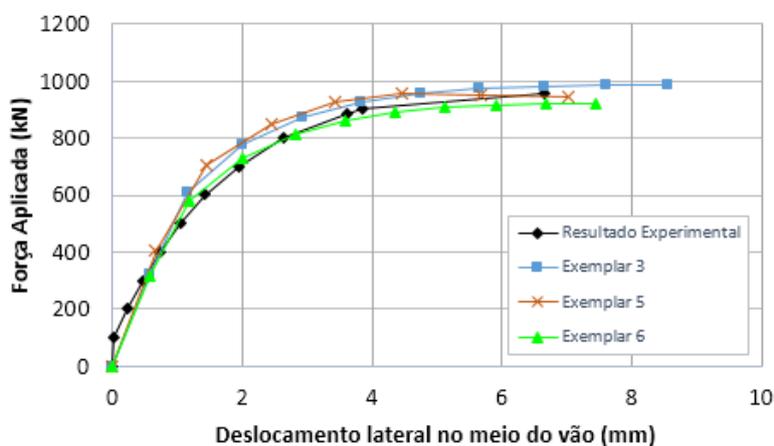


Figura 10 – Influência da densidade da malha

Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos resultados de força última e deslocamento lateral obtidos na análise numérica. A partir desses resultados foi selecionado o modelo numérico com a melhor representatividade para utilização nas análises paramétricas.

Como pode-se observar na Tabela 3, o Exemplar 6 foi o que apresentou os melhores resultados em relação aos experimentais e, portanto, será utilizado nas análises paramétricas.

Tabela 3 – Comparação de resultados: modelos numéricos e experimental

Exemplar	F _u Exp. (kN)	F _u Num. (kN)	Variação (%)	Desl. Lat. Exp. (mm)	Desl. Lat. Num. (mm)	Variação (%)	M Exp. (kN.cm)	M Num. (kN.cm)	Variação (%)
Exemplar 1	954,00	787,00	-17,50	6,65	2,70	-59,39	3496,40	2573,49	-26,39
Exemplar 2	954,00	1132,00	+18,65	6,65	7,43	+11,72	3496,40	4237,07	+21,18
Exemplar 3	954,00	984,64	+3,21	6,65	8,56	+28,72	3496,40	3796,77	+8,59
Exemplar 4	954,00	1137,00	+19,18	6,65	11,48	+72,63	3496,40	4716,27	+34,88
Exemplar 5	954,00	958,00	+0,41	6,65	4,45	-33,08	3496,40	3300,31	-5,60
Exemplar 6	954,00	921,33	-3,42	6,65	7,45	+12,03	3496,40	3450,38	-1,31

M: momento fletor
F: força axial excêntrica

3.5 Características do modelo numérico final

Após a análise de alguns dos principais fatores que interferem na representatividade do modelo numérico, verificou-se que o Exemplar 6 foi o mais representativo no que se refere à relação Força aplicada vs. Deslocamento lateral no meio do vão (Figura 11).

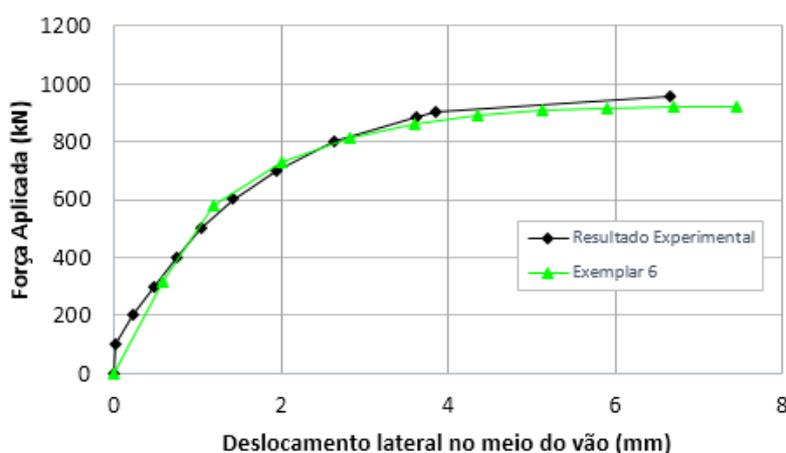


Figura 11 – Resultados do modelo numérico validado

A malha de elementos finitos do perfil de aço foi definida com dimensões de 10x10x3mm e a do concreto e da chapa de aplicação de deslocamento possui dimensões de 10x10x10mm (Figura 12). Em relação ao mecanismo de aplicação de força, os melhores resultados foram obtidos com a aplicação de deslocamentos prescritos e a utilização de concreto mais resistente em uma altura de 12cm em ambas as extremidades do pilar.

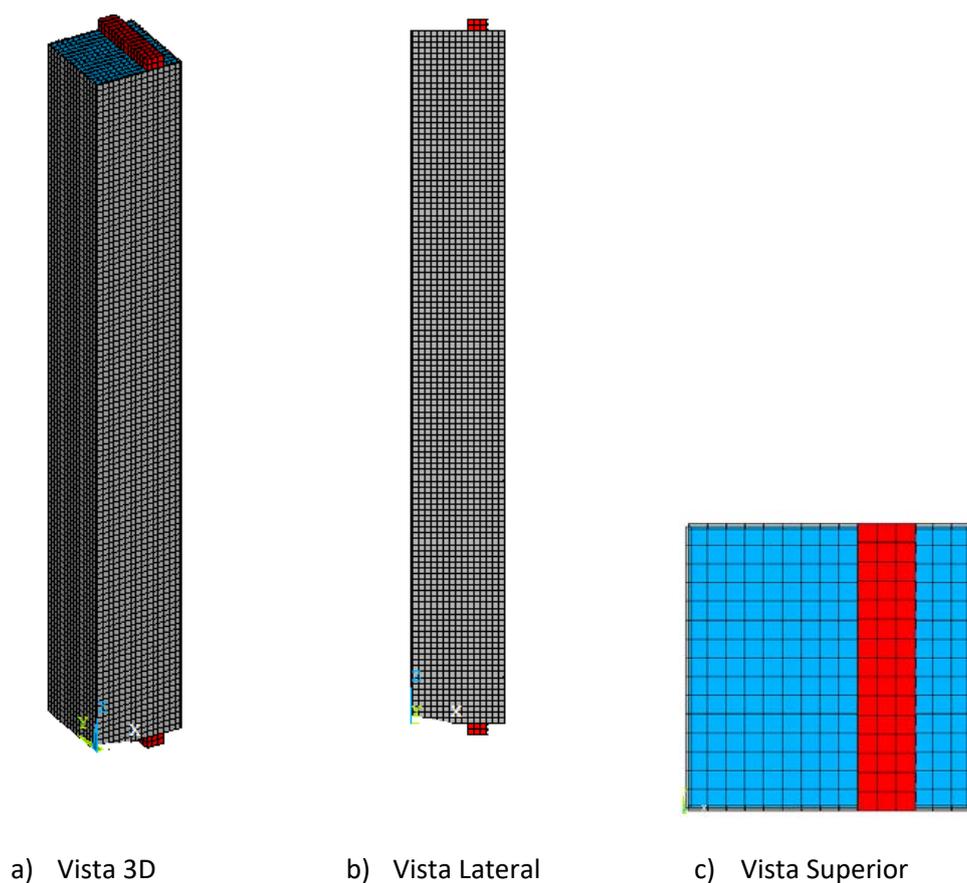


Figura 12 – Representação gráfica do modelo numérico final

4 Análises Paramétricas

Após a validação do modelo numérico, esse foi utilizado na realização de análises paramétricas nas quais foi avaliada a influência de dois parâmetros na capacidade resistente do pilar preenchido de seção quadrada submetido a flexo-compressão: resistência ao escoamento do aço e excentricidade da força aplicada. Três valores de resistência ao escoamento foram avaliados: 250, 300 e 450 MPa. Também foram avaliados três valores de excentricidade da força aplicada: 20, 30 e 40mm. Nessas análises foi considerado concreto com resistência a compressão de 52,8 MPa para preenchimento do perfil tubular. Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos.

- Resistência ao escoamento do aço

A Figura 13 apresenta a variação da capacidade resistente a compressão em função das diversas resistências ao escoamento do aço.

Tabela 4 – Resultados da análise paramétrica

Resistência ao escoamento (f_y) MPa	Excentricidade (mm)	Força última (kN)	Deslocamento no meio do vão (mm)	Momento último (kN.cm)
250	20	1069,20	5,74	2752,12
	30	958,74	7,90	3633,62
	40	859,00	9,52	4253,76
300	20	1113,09	5,23	2808,32
	30	1001,83	7,49	3755,86
	40	899,50	9,19	4424,64
450	20	1248,83	4,36	3042,14
	30	1135,40	6,87	4186,21
	40	1025,14	8,93	5016,01

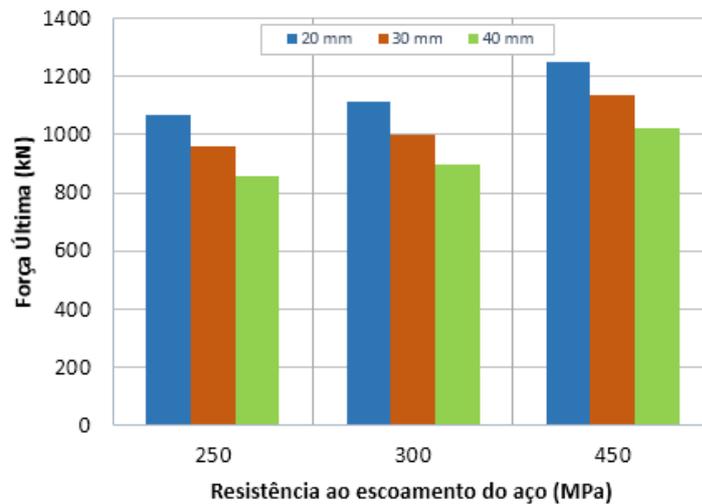


Figura 13 – Influência da resistência ao escoamento do aço na capacidade resistente do pilar preenchido

Observa-se que uma variação na resistência ao escoamento de 250 MPa para 300 MPa, que corresponde a 20% de aumento, resultou em aumento de 4,1% na capacidade resistente; por outro lado, ao passar de 300 MPa para 450 MPa, aumento de 50%, a capacidade resistente sofreu aumento de 16,8%. Essa análise foi feita considerando excentricidade de 20mm. Ou seja, não há proporcionalidade entre o aumento na resistência ao escoamento e o conseqüente aumento na capacidade resistente e, para resistências ao escoamento mais elevadas, há um aumento mais significativo na capacidade resistente a flexo-compressão. Isso ocorre porque ao aumentar a resistência ao escoamento do aço, aumenta-se a contribuição do perfil de aço para a capacidade resistente da seção mista.

- **Excentricidade da força aplicada**

A Figura 14 apresenta a variação da capacidade resistente do pilar preenchido para os três valores de excentricidade considerados no presente estudo.

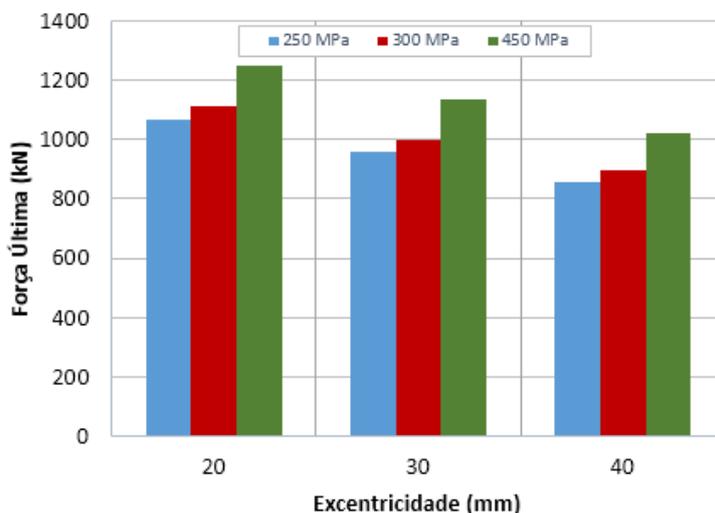


Figura 14 – Influência da Excentricidade da força na capacidade resistente do pilar preenchido

Observa-se que para pilares mistos com aços de menor resistência ao escoamento o decréscimo na capacidade resistente devido ao aumento da excentricidade é maior que o observado em pilares com maior resistência ao escoamento. Isso pode ser notado comparando os aços com 250 MPa e 450 MPa de resistência ao escoamento. No primeiro caso a excentricidade da força aplicada passou de 20 para 40 mm e produziu um decréscimo na capacidade resistente do pilar de 24,47 % enquanto que para o segundo caso o mesmo aumento na excentricidade da força resultou em decréscimo de 21,82 %. Na Figura 15 são apresentados os valores de momento último em função dos parâmetros avaliados: resistência ao escoamento do aço e a excentricidade da força aplicada.

É possível analisar a variação do momento último em função dos parâmetros avaliados sob duas perspectivas: mantendo-se fixa a excentricidade da força e variando a resistência ao escoamento do aço ou vice-versa. No primeiro caso observa-se que a variação do momento último é mais significativa para aços mais resistentes; ao contrário, quando se mantém a resistência ao escoamento fixa, nota-se maior variação do momento último para os aços com maiores valores de resistência ao escoamento.

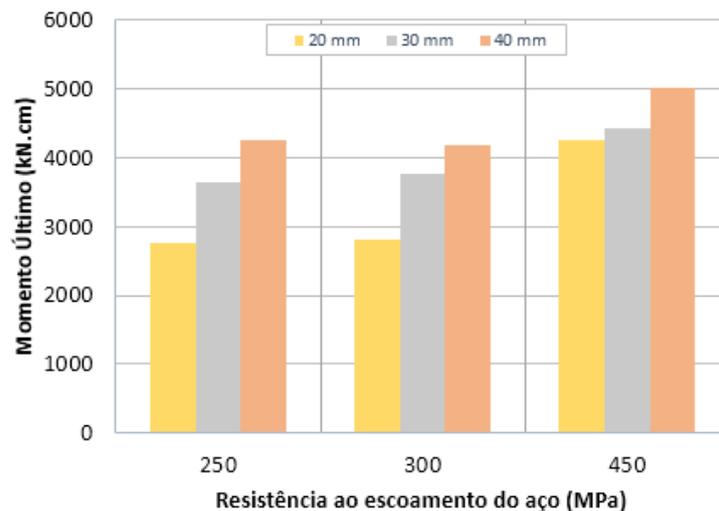


Figura 15 – Variação do momento último em função da resistência ao escoamento e da excentricidade da força axial

Isso se deve, basicamente, ao fato do acréscimo na capacidade resistente do pilar misto ser maior quando da utilização de aços com resistência ao escoamento mais elevadas. Ao manter a resistência ao escoamento em 250 MPa, por exemplo, o aumento da excentricidade se reflete diretamente no valor do momento último. Se a mesma análise for realizada para $f_y=450$ MPa, são observados aumentos bem menos expressivos no momento último (Figura 15). Isso indica que para resistência ao escoamento igual a 250 MPa a ruptura está mais associada ao nível de tensões no concreto que no aço e o aumento da excentricidade movimenta a linha neutra na seção mista de forma que passam a surgir tensões de tração na seção. Por outro lado, para $f_y=450$ MPa, a parcela de contribuição do aço para a capacidade resistente do pilar torna-se mais significativa e, mesmo aumentando a excentricidade e surgindo tensões de tração na seção, esse efeito não é tão pronunciado quanto na situação anterior por conta da maior contribuição do aço.

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados pelo modelo numérico é possível afirmar que a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste foi bastante satisfatória. Verifica-se, da comparação entre resultados experimentais e numéricos, que o modelo numérico tem robustez para representar satisfatoriamente tanto o comportamento

quanto a capacidade resistente. Além disso, a metodologia adotada para a entrada de dados (via script) mostrou agilidade e facilitou a geração de novos modelos numéricos, a partir do modelo inicial já validado, permitindo introduzir as variações na excentricidade da força e na resistência ao escoamento do aço de forma bastante simples. Em relação aos parâmetros avaliados verificou-se que o aumento da resistência ao escoamento do aço é mais significativo para o momento resistente quando associados a forças aplicadas com pequenas excentricidades. Isso porque, para pequenas excentricidades, a seção encontra-se predominantemente comprimida e, nesse caso, tanto aço quanto concreto contribuem significativamente para a capacidade resistente do pilar preenchido.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de São Carlos, ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil dessa universidade e à *FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo* pelo auxílio fornecido quando da realização dos ensaios (Processo número 1998/15499-9).

7 Referências

- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. ANSI/AISC 360. **Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 880**: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. Rio de Janeiro. 2008.
- DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 1999. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- DE NARDIN, S. **Pilares mistos preenchidos: estudo da flexo-compressão e de ligações viga-pilar**. 2003. 323p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- DIAS, J. V. F.; GOMES, H. D.; CALENZANI, A. F. G. Comportamento à flexo-compressão de pilares mistos de aço e concreto tubulares circulares preenchidos com concreto de alto desempenho. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia-RIPE**, v. 2, n. 2, p. 218-233, Brasília, 2016.
- ELLOBODY, E.; YOUNG, B. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns. **Thin-walled structures**, v. 44, n. 8, p. 919-930, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Building**, 226p, Bruxelas, 2004.

HAFIZ, F. Analytical and Numerical Study on Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Columns Subjected To Axial Compression Loads. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 7, n. 9, p. 1720-1727, 2016.

HU, H. T.; HUANG, C. S.; WU, M. H.; WU, Y. M. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, n. 10, p. 1322-1329, 2003.

KNOWLES, R.B.; PARK, R. Strength of concrete filled steel tubular columns. **Journal of the Structural Division**, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 95, n. ST12, p. 2565-87, 1969.

KURIAN, S. S.; PAULOSE, D.; MOHAN, S. Study On Concrete Filled Steel Tube, **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)** e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, p. 25-33, 2016.

MAGGI, Y. I. **Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida**. 2004. 269p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MASOUDNIA, R.; AMIRI, S.; BADARUZZAMAN, W. W. An analytical model of short steel box columns with concrete in-fill (part 1). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1715-1721, 2011.

NEUENSCHWANDER, R.; CARRASCO, E.V.M ; RODRIGUES, F. C.; FAKURY, R. H.- Pilares Mistos com Placas de Base abertas solicitados à flexo- compressão. In: **CNME 2014 - 9º. Congresso Nacional de Mecânica Experimental**, 2014, Aveiro. Anais do 9º. CNME. Aveiro - Portugal: Universidade de Aveiro, v 1, p. 175-176, 2014.

OLIVEIRA, W. L. A. **Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular**. 2008. 251p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

QUEIROZ, F. D. **Modelos para análise de pilares mistos pelo método dos elementos finitos**. 2003. 189p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SAKINO, K.; NAKAHARA, H.; MORINO, S.; AND NISHIYAMA, I. Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 130, n. 2, p. 180-188, 2004.

SINGH, H.; GUPTA, P.K. Numerical Modeling of Rectangular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v.4, n. 5, p. 170-173, 2013.

TINEO, R. P. **Ligação mista viga-pilar preenchido com chapa passante: modelagem numérica e análise paramétrica**. 2016. 154p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

UY, B. Local and post-local buckling of concrete filled steel welded box columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 47, n. 1-2, p. 47-72, 1998.

WANG, Y.; YANG, Y.; ZHANG, S. Static behaviors of reinforcement-stiffened square concrete-filled steel tubular columns. **Thin-Walled Structures**, v. 58, p. 18-31, 2012.