

A COMPARATIVE STUDY OF COST AND RESISTANCE BETWEEN TUBULAR STEEL COLUMNS AND CONCRETE-FILLED TUBULAR STEEL COLUMNS

DÉBORA MAIA GUIMARÃES
TIAGO CETTO PIETRALONGA
ADENILCIA FERNANDA GROBÉRIO CALENZANI

deboramaiaag@gmail.com

tiagocettopietralonga@gmail.com

afcalenzani@gmail.com

*Department of Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo
Avenida Fernando Ferrari, 29075-910, Vitória, Espírito Santo, Brasil*

Abstract. The use of steel-concrete composite structures is not a recent trend in construction; however, it has significantly increased after the 1960s. The quest for streamlining construction processes encouraged the employment of steel and steel-concrete composite structures. Both structural systems provide reductions in cost with labor and materials, as well as increased dimensional precision, structural efficiency and cleaner construction sites. In this context, the use of steel-concrete composite columns is commonly observed, and these may present themselves as steel tubular sections, filled with concrete. Such sections provide an increase in compressive strength due to concrete confinement within the steel tube and eliminate the need for form-work and steel reinforcement during construction. Circular steel sections are more efficient to bear torsional forces, and present good behavior when subjected to combined actions. This study analyzes the main criteria and concepts for the design of composite columns with concrete-filled circular hollow sections and steel circular hollow sections according to the Brazilian standards ABNT NBR 8800 and ABNT NBR 16239, under compression and combined bending. A cost comparison between the two aforementioned types of column was obtained by means of an algorithm developed with Visual Basic for Applications, considering equivalent resistances and the prices applied in Brazil's Southeast region. As an additional analysis, the effect of the confined concrete on the overall mechanical resistance of the columns was also evaluated.

Keywords: steel-concrete composite columns, steel columns, design, cost, resistance.

1 Introdução

O aço é um material que possui uma ótima relação entre resistência e peso específico, com isto os elementos puramente em aços tendem a serem mais esbeltos e propícios a instabilidades. Tratando-se do concreto, o mesmo possui uma característica muito marcante, é possível com grande facilidade de execução moldá-lo (in loco) em qualquer formato. No entanto, este apresenta elevado peso próprio e baixa resistência à tração, necessitando de armaduras ou perfis de aço para resistir aos esforços de tração.

Sistemas mistos de aço e concreto tiram proveito das características benéficas dos dois materiais, pois são compostos por um perfil de aço trabalhando solidariamente com o concreto armado ou não. Podem ser utilizados em pilares, dadas as vantagens econômicas, construtivas e eficiência estrutural, como por exemplo, a redução das dimensões do elemento estrutural, a mão-de-obra reduzida e maior área livre por pavimento, o que tem promovido um crescimento significativo na sua utilização, Nóbrega [1].

Os pilares mistos podem ser constituídos, segundo a ABNT NBR 8800 [2], por seções transversais total ou parcialmente revestidas, conforme mostra as Fig. 2(a) e 2(b), ou por seções tubulares preenchidas com concreto (Fig. 2(c) e 2(d)).

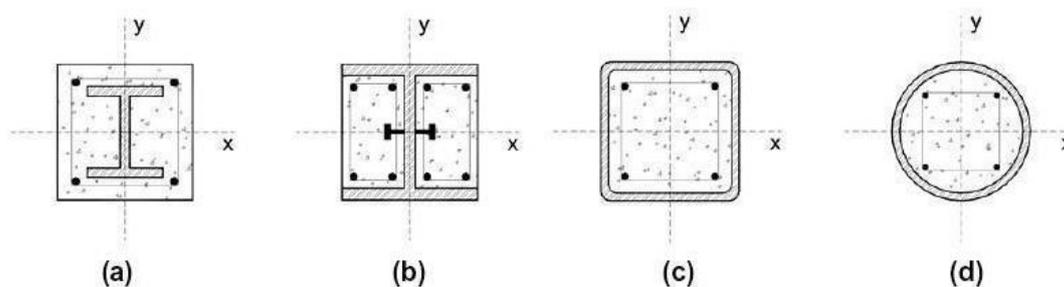


Figura 1. Tipos de pilares mistos. (a) Totalmente revestido, (b) Parcialmente revestido, (c) e (d) Tubular Preenchido. Fonte: Caldas, Fakury e Sousa Junior [3].

Os pilares mistos preenchidos apresentam vantagens adicionais em relação aos revestidos, por não haver a necessidade de armadura, fôrma e, nem sempre, de equipamentos especiais para a montagem. Segundo Bianchi e Coelho[4], nos perfis tubulares circulares, o efeito do confinamento causado pela seção de aço aumenta a resistência à compressão do concreto.

Ainda que as primeiras aplicações de pilares preenchidos tenham sido no século XX, em torno da década de 50, sabe-se que o primeiro estudo de flexão-compressão para estes elementos foi publicado apenas em 1967 por Furlong [5]. Os trabalhos teóricos-experimentais de Knowles e Park [6] e Neogi, Sen e Chapman [7] realizaram um amplo programa experimental localizado no Imperial College - Londres, os quais foram utilizados para incorporar os pilares preenchidos à norma britânica BS 5400 de 1979. Ademais, em 1988, Shakir-Khalil [8] iniciou vários estudos que envolviam a norma britânica BS 5400 e pilares preenchidos flexo-comprimidos.

No ano de 1990, Shakir-Khalil e Mouli [9] analisaram a influência do núcleo de concreto na capacidade resistente à flexo-compressão por meio de ensaios experimentais. Observando diversas variáveis, tais como: resistência dos materiais, esbeltez do pilar, plano de flexão e excentricidade de até 45% em relação ao perfil tubular isolado.

Já na esfera nacional, o primeiro trabalho abordando os pilares preenchidos foi o de Gomes [10]. Ele abrange uma série de fatores que interferem no comportamento dos pilares preenchidos, submetidos à compressão simples. Matsui *et al.* [11] publicaram um trabalho com embasamento teórico e experimental, avaliando o comportamento de pilares preenchidos esbeltos, de seção quadrada e circular, submetidos à flexo-compressão. Hayashi *et al.* [12] finalizaram um estudo experimental com pilares preenchidos de seção quadrada, submetidos a força axial constante e forças laterais cíclicas. Fang *et al.* [13] realizaram o primeiro estudo do comportamento de pilares preenchidos flexo-comprimidos em altas temperaturas, o qual foi fundamental para criar os primeiros métodos para elaboração de projetos de

pilares preenchidos flexo-comprimidos em situação de incêndio.

De Nardin [14] apresentou um estudo teórico-experimental sobre pilares mistos preenchidos com concreto de alta resistência submetidos à compressão simples. O estudo foi feito a partir de ensaios experimentais e modelagem pelo método dos elementos finitos. Logo depois, Oliveira, De Nardin e El Debs [15] fizeram uma investigação do efeito de confinamento nos pilares preenchidos de seção circular e constataram que os pilares mais curtos apresentam ganho de capacidade resistente devido à resistência à compressão do concreto, enquanto os pilares esbeltos não o apresentam devido à ocorrência da instabilidade global antes do concreto atingir sua resistência à compressão.

Tarnoczy Jr. [16] e Braga e Ferreira [17] realizaram estudos comparativos de custos de pilares de aço e mistos de aço e concreto voltados para a realidade brasileira. O primeiro faz uma avaliação da viabilidade econômica do uso de pilares mistos preenchidos e o segundo inclui a análise de custos de pilares de aço.

Neste artigo, determina-se a resistência à compressão e à flexo-compressão de pilares de seção tubular circular de aço com e sem preenchimento de concreto. Além de uma comparação em termos de resistência, os custos desses pilares foram determinados e confrontados considerando diferentes resistências características à compressão do concreto. Conclusões a respeito da viabilidade econômica das estruturas estudadas são discutidas.

2 Metodologia

Para se realizar as análises deste estudo, foi elaborado um programa de cálculo em Visual Basic for Application, no Excel com vistas à determinação dos esforços resistentes de pilares mistos preenchidos e de pilares de aço, de seção transversal circular, submetidos à compressão pura e à flexo-compressão. O programa é composto por duas rotinas de cálculo: uma para compressão pura e outra para flexo-compressão.

Os pilares foram considerados bi-rotulados, ou seja, com coeficientes de flambagem por flexão iguais a 1. Perfis tubulares do catálogo da Vallourec [18] com diâmetro externo de 219,1 a 355,6 mm foram analisados. Além disso, os dados de entrada mostrados na Tabela 1 foram adotados para todos os testes.

Tabela 1. Parâmetros adotados para os dados de entrada.

PARÂMETRO	VALOR	UNID
1. Perfil de Aço		
Módulo de Elasticidade	200.000	MPa
Resistência ao escoamento	350	MPa
2. Armaduras		
Módulo de Elasticidade	210.000	MPa
Resistência ao escoamento	500	MPa

Foram realizadas 8 baterias de testes com variação do comprimento do pilar e da resistência à compressão característica do concreto, conforme mostrado na Tabela 2. Os testes foram feitos para dois casos de pilares mistos, sem e com armadura (4 barras de 12,5mm).

Tabela 2. Baterias de testes.

VARIÁVEIS	BATERIA 1	BATERIA 2	BATERIA 3	BATERIA 4
Comprimento do pilar [m]	3	3	3	3
Resistência à compressão do concreto [f_{ck}]	20	30	40	50
VARIÁVEIS	BATERIA 5	BATERIA 6	BATERIA 7	BATERIA 8
Comprimento do pilar [m]	6	6	6	6
Resistência à compressão do concreto [f_{ck}]	20	30	40	50

Em cada bateria de testes foram utilizados parâmetros diferentes para que a comparação entre as seções mista e metálica fosse possível. Os tópicos a seguir explicam como foram realizados os cálculos das resistências e como se deu a comparação entre os tipos de pilares.

Posteriormente, a fim de analisar e comparar os custos dos materiais (perfis aço, armaduras e concreto) que compõem os pilares, utilizou-se os resultados obtidos com as rotinas descritas nos itens 2.1 e 2.2. O valor do quilograma de aço do perfil tubular utilizado foi tomado igual a um valor médio de 5,00 reais conforme Vallourec. O metro cúbico de concreto foi cotado em 274,00, 300,00, 340,00 e 360,00 reais para as resistências de 20, 30, 40 e 50 MPa, respectivamente, conforme concreteiras da Grande Vitória e o preço do quilograma de aço das armaduras foi de 3,21 reais conforme a RDG Aços do Brasil.

2.1 Rotina de cálculo para pilares submetidos à compressão pura

A rotina de cálculo de pilares submetidos à compressão pura foi dividida em três sub-rotinas, sendo que as duas primeiras, uma para pilar misto e outra para pilar de aço, conversam entre si para que seja determinado o pilar de aço com resistência à compressão pura equivalente à da seção mista considerada.

A primeira sub-rotina foi implementada conforme as orientações do Anexo P da NBR 8800 [2] para cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo (N_{Rd}). Assim, a força axial de compressão é dada por:

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd} \quad (1)$$

onde $N_{pl,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total e χ é o fator de redução da resistência à compressão, dado em função do índice de esbeltez reduzido explicitado na Equação 3.

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y}{1,1} A_a + \alpha \frac{f_{ck}}{1,4} A_c + \frac{f_{ys}}{1,15} A_s \quad (2)$$

O coeficiente α é tomado igual a 0,95 para seções tubulares preenchidas com concreto.

$$\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_e}} \quad (3)$$

A força axial de compressão resistente da seção transversal à plastificação total, $N_{pl,R}$, é calculada de forma análoga à Equação 2, porém sem os coeficientes de segurança. N_e é a força axial de flambagem elástica, dada por:

$$N_e = \pi(EI)_e / (KL)^2 \quad (4)$$

onde KL é o comprimento de flambagem do pilar. Neste trabalho, foi considerado o mesmo comprimento de flambagem para os dois eixos centrais de inércia.

Por ser uma estrutura mista, a carga crítica de Euler depende da rigidez efetiva à flexão $((EI)_e)$. Para o caso de pilares mistos constituídos por perfis tubulares, a norma NBR 16239 [19] fornece o cálculo da rigidez conforme a Equação 5. Tal fórmula permite que o valor da rigidez efetiva à flexão seja um pouco maior que o valor dado pela NBR 8800 [2].

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,7 E_c I_c + E_s I_s \quad (5)$$

E_a , E_c , E_s são referentes aos módulos de elasticidade do aço estrutural, concreto e aço da armadura, respectivamente. Assim como I_a , I_c e I_s referem-se aos momentos de inércia do aço estrutural, concreto e aço da armadura

Após a implementação da primeira sub-rotina, obteve-se os valores das forças resistentes de compressão de pilares mistos compostos por perfis do catálogo Vallourec. A segunda sub-rotina tem como função determinar, para cada pilar misto calculado, o pilar de aço que possui força resistente de compressão igual ou superior a do pilar misto considerado. Desta forma, tem-se para cada seção mista, um pilar de aço equivalente.

A força axial de compressão resistente dos pilares de aço, conforme a NBR 8800 [2], é dada por:

$$N_{c,Rd} = \chi Q A_g f_y / \gamma_{a1} \quad (6)$$

onde A_g é a área bruta do perfil de aço, Q é o fator de redução para flambagem local, que no caso de paredes de seções tubulares circulares é dado conforme o Anexo F da NBR 8800 [2], e o fator de redução, χ , para perfis tubulares é especificado pela NBR 16239 [22], mostrado na Equação 7.

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4.48})^{1/2.24}} \quad (7)$$

O índice de esbeltez reduzido para seções tubulares é dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (8)$$

onde a força axial de flambagem elástica para colunas de aço é calculada por meio da Eq. (9).

$$N_e = \pi EI / (KL)^2 \quad (9)$$

Por fim, a terceira sub-rotina foi criada para averiguar a influência do comprimento de flambagem na resistência à compressão dos pilares misto e de aço. Para isso, as fórmulas supracitadas foram utilizadas e uma varredura variando-se o comprimento do pilar de 3 à 7 metros, com 1 metro de decalagem, foi realizada. Primeiro, calculou-se a resistência à compressão dos pilares de aço com os perfis: TC 219,1x8, TC 273x8, TC 323,8x8 e TC 355,6x8. Em sequência, pilares mistos com os mesmos perfis de aço preenchidos com concretos de resistências iguais a 20, 30, 40 e 50 MPa tiveram a sua resistência à compressão determinada.

2.2 Rotina de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão

A rotina de cálculo de pilares submetidos à flexo-compressão subdividiu-se em duas sub-rotinas, sendo interligadas e referentes ao cálculo de pilares mistos e puramente de aço.

As formulações apresentadas no Anexo P da NBR 8800 [2] foram utilizadas para obtenção dos momentos fletores resistente de cálculo, M_{Rd} , para todos os perfis mistos catalogados. Para o cálculo dos perfis mistos, encontra-se a posição da linha neutra plástica conforme a Eq. (10).

$$h_n = \frac{A_c f_{cd1} - A_{sn}(2f_{sd} - f_{cd1})}{2Df_{cd1} + 4t(2f_{yd} - f_{cd1})} \quad (10)$$

onde A_{sn} é a soma das áreas das barra da armadura na região de altura $2h_n$, f_{cd1} é dado por $\alpha \frac{f_{ck}}{1.4}$, sendo α igual a 0,95 por tratar-se de perfis tubulares, D é o diâmetro externo da seção tubular e t é a espessura da seção. Os módulos resistentes plásticos do concreto, Z_{cn} , do aço, Z_{an} , e das armaduras, Z_{sn} , localizados na zona $2h_n$ são definidos por:

$$Z_{sn} = \sum_{i=1}^n |A_{sni} e_{yi}| \quad (11)$$

$$Z_{cn} = (D - 2t)h_n^2 - Z_{sn} \quad (12)$$

$$Z_{an} = Dh_n^2 - Z_{cn} - Z_{sn} \quad (13)$$

nas quais A_{sni} é a área de cada barra de armadura na região citada e e_{yi} é a distância do eixo da barra ao eixo x .

Por conseguinte, é possível encontrar o momento fletor resistente de plastificação de cálculo para o perfil misto, devendo-se, também, verificar o valor máximo para o mesmo, conforme as equações seguintes:

$$M_{pl,Rd} = f_{yd}(Z_a - Z_{an}) + 0,5f_{cd1}(Z_c - Z_{cn}) + f_{sd}(Z_s - Z_{sn}) \quad (14)$$

Segundo o modelo de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão da NBR 16239 [19], tem-se duas inequações para verificação deste tipo de solicitação em pilares mistos tubulares circulares,

são elas:

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0; \text{ caso } N_{Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (15)$$

$$\frac{N_{Sd} - N_{c,Rd}}{N_{Rd} - N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0; \text{ caso } N_{Sd} > N_{c,Rd} \quad (16)$$

Nas quais $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, nos eixos x e y , dados por $0,9M_{pl,x,Rd}$ e $0,9M_{pl,y,Rd}$, respectivamente.

Neste trabalho, o caso de flexão composta com momento fletor em torno do eixo principal de maior inércia foi estudado. A força axial de compressão solicitante de cálculo (N_{Sd}) foi tomada igual à força axial resistente da seção de concreto apenas, Eq. (17), e o momento fletor solicitante máximo foi determinado pela Eq. (15).

$$N_{pl,c,Rd} = f_{cd} A_c \quad (17)$$

A primeira sub-rotina obteve o momento solicitante máximo dos pilares mistos compostos pelas seções do catálogo Vallourec. De posse desses resultados e da força axial de compressão solicitante considerada, a implementação da segunda sub-rotina foi realizada a fim de se determinar, para cada seção mista, uma seção de aço pura que atenda às solicitações.

O momento resistente dos pilares de aço foi definido de acordo com a NBR 8800 [2] pelas equações 18 a 20:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}; \text{ caso } \lambda \leq \lambda_p \quad (18)$$

$$M_{Rd} = \left[\frac{0,021E}{D/t} + fy \right] \frac{W}{\gamma_{a1}}; \text{ caso } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (19)$$

$$M_{Rd} = \frac{0,33E}{D/t} \frac{W}{\gamma_{a1}}; \text{ caso } \lambda > \lambda_r \quad (20)$$

sendo, os parâmetros de esbeltez dados por:

$$\lambda = D/t \quad (21)$$

$$\lambda_p = 0,07E/f_y \quad (22)$$

$$\lambda_r = 0,31E/f_y \quad (23)$$

A verificação da flexo-compressão em perfis de aço foi realizada por meio da Eq. (24).

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1,0 \quad (24)$$

3 Resultados

Os resultados são apresentados para dois tipos de análises: comparativa de custos e comparativa de resistência. Cada análise discute separadamente os casos de compressão pura e flexo-compressão. Na discussão, utiliza-se a sigla “ L ” para comprimento de flambagem, “ f_{ck} ” para resistência a compressão característica do concreto e “ N_{Rd} ” para força axial de compressão resistente de cálculo.

3.1 Análise Comparativa de Resistências

Compressão Pura

Com o objetivo de analisar a influência da variação do comprimento de flambagem na resistência à compressão do pilar, submetido à esforço de compressão puro, foram elaborados os gráficos vistos nas Fig. 2 e 3. Os gráficos mostram a força axial resistente de compressão de uma dada seção transversal, TC 219,1x8mm para Fig. 2 e TC 355,6x8mm para a Fig. 3, para diferentes resistências à compressão características do concreto, variando-se o comprimento de flambagem de 3 a 7 metros, com intervalo de 1 metro.

Observa-se que com o aumento do comprimento do pilar, a compressão axial resistente de cálculo cai notavelmente e de forma mais marcante para os pilares mistos do que para os de aço, principalmente para as seções de menores diâmetros. Enquanto o pilar de aço da Fig. 2 reduz sua resistência em aproximadamente 43% quando passa de 3 para 7 metros de comprimento, os pilares mistos com f_{ck} de 20, 30, 40 e 50 MPa tem uma redução de 46%, 49%, 52% e 54%, respectivamente.

Para a Figura 3, o pilar de aço de 7 metros de comprimento é 11% menos resistente que o de 3 metros, enquanto para os pilares mistos, com f_{ck} de 20, 30, 40 e 50 MPa, esta redução é de 13%, 16%, 18% e 20%, respectivamente. Ou seja, sempre maior que a redução do pilar de aço.

Isto deve-se ao fato de que o aumento do comprimento do pilar reduz consideravelmente a carga crítica de Euler, o que gera um aumento da esbeltez reduzida, e, consecutivamente, uma diminuição no fator de redução (χ). Assim, tem-se uma menor força axial de compressão resistente de cálculo. A resistência dos pilares mistos decresce mais intensamente do que as dos pilares de aço por efeito do numerador ($N_{pl,R}$) da equação da esbeltez reduzida, Eq. (3). Tendo em vista que ele é maior que o numerador da esbeltez reduzida para pilares de aço, Eq. (8), resultando numa diminuição maior no fator de redução.

Também é possível identificar que com o aumento do diâmetro da seção de 219,8 mm para 355,6mm, existe um afastamento das retas plotadas pelos gráficos das figuras 2 e 3. Isto ocorre, pois, a contribuição do concreto para a resistência a compressão do pilar misto aumenta, visto que seu volume é maior para a seção de maior diâmetro. Desta forma, o aumento da resistência característica do concreto contribui mais ainda para a resistência final do pilar.

Cabe ressaltar também que para a Fig. 3 a redução da resistência nos pilares mistos é maior que a dos pilares de aço ao se aumentar o comprimento de flambagem, porém, o aumento do diâmetro tornou essa redução menos marcante. Estas afirmações foram observadas também para as demais seções testadas na sub-rotina 3 de compressão pura.

Assim, percebe-se que o aumento do comprimento de flambagem faz com que o acréscimo de esforço de compressão resistente dos pilares mistos sob os pilares de aço reduza. Podendo o pilar misto não ser economicamente mais viável para comprimentos de flambagem grandes, principalmente para seções de menor diâmetro. Pois, mesmo ainda sendo mais resistente, os pilares mistos são mais caros e seu aumento de resistência pode não valer a pena, como será visto no próximo item.

No caso de pilares com seções de diâmetros pequenos, a influência da resistência característica do concreto tende a ser menos relevante no resultado do N_{Rd} . Assim, nestes casos, não seria eficiente utilizar concreto de resistências relativamente altas nos pilares mistos com pé-direito elevados. Pois o acréscimo de resistência final proporcionado poderia ser irrelevante quando se comparado com um concreto de baixa resistência, acarretando em grandes custos.

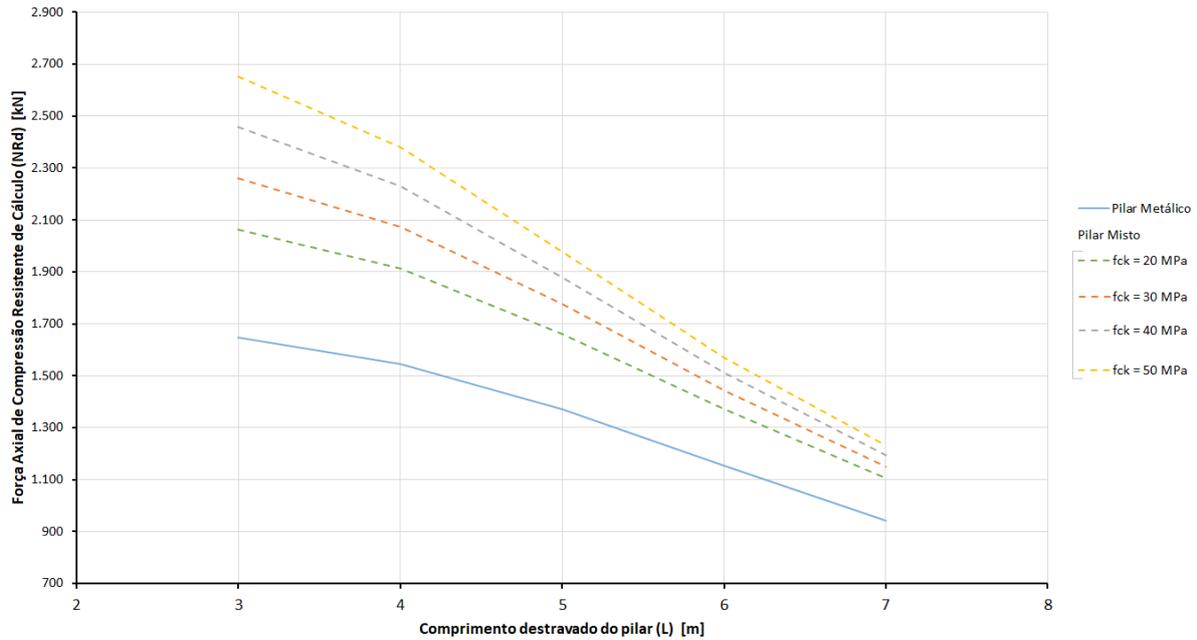


Figura 2. Força axial de compressão resistente de cálculo versus comprimento de flambagem do pilar para seções mistas e metálica pura com diâmetro de 219,1 mm e 8 mm de espessura.

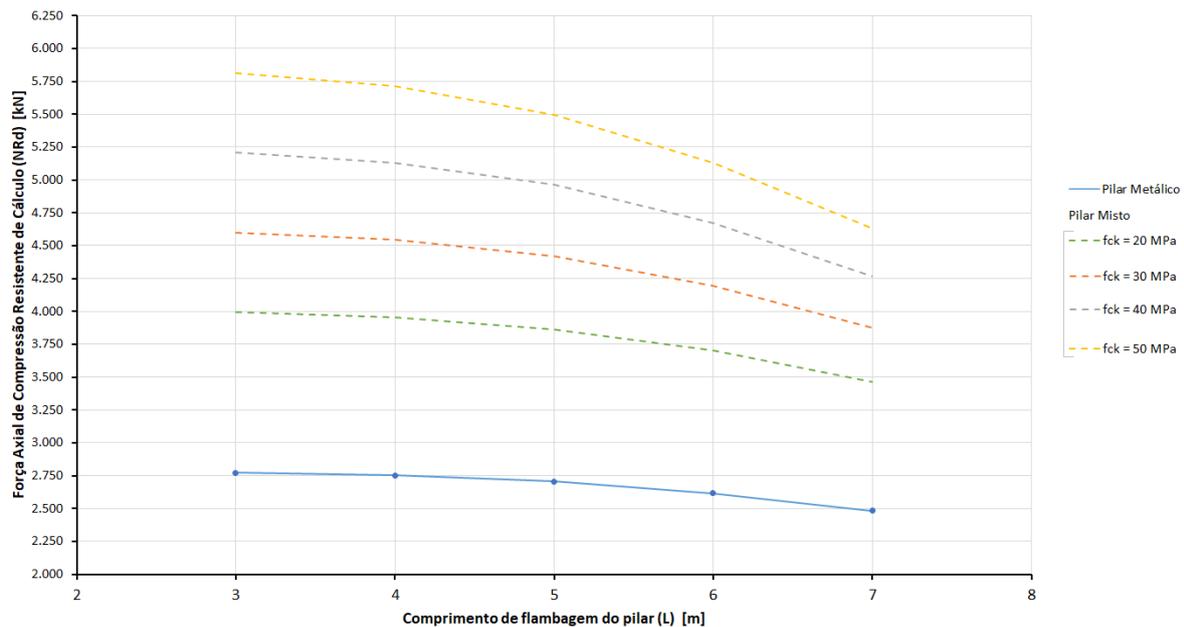


Figura 3. Força axial de compressão resistente de cálculo versus comprimento de flambagem do pilar para seções mistas e metálica pura com diâmetro de 323,8 mm e 8 mm de espessura.

Flexo-Compressão

Por meio da rotina de flexo-compressão foi elaborado o gráfico da Figura 4 para os pilares mistos de f_{ck} igual a 20 MPa e seus pilares de aço equivalentes. Ele apresenta a força axial de compressão resistente de cálculo dos pilares mistos e de aço versus o momento fletor resistente de cálculo. Os resultados obtidos para cada tipo de pilar apresentam uma relação aproximadamente linear entre a força axial de compressão resistente de cálculo e o momento fletor resistente, como pode ser observado pela

linha de tendência que melhor se encaixa as situações visto na Fig. 4.

Tomando uma seção transversal, como a TC 355,6x8,0, constata-se que ao preenchê-la com concreto de resistência característica de 20 MPa resulta num acréscimo de força axial de compressão resistente de cálculo de 44%, enquanto há redução do momento fletor resistente de cálculo em 1%.

Considerando pilares mistos e de aço com forças axiais de compressão resistente de cálculo, nota-se que os pilares de aço apresentam momento fletor resistente de cálculo mais elevados que o dos pilares mistos. Por exemplo, o uso do pilar de aço de seção transversal igual a TC 355,6x11 ao invés do pilar misto de seção TC 355,6x8 causa um acréscimo de 27% no momento fletor resistente.

Assim, percebe-se que os pilares mistos resistem bem a grandes esforços axiais de compressão e momentos fletores não muito elevados.

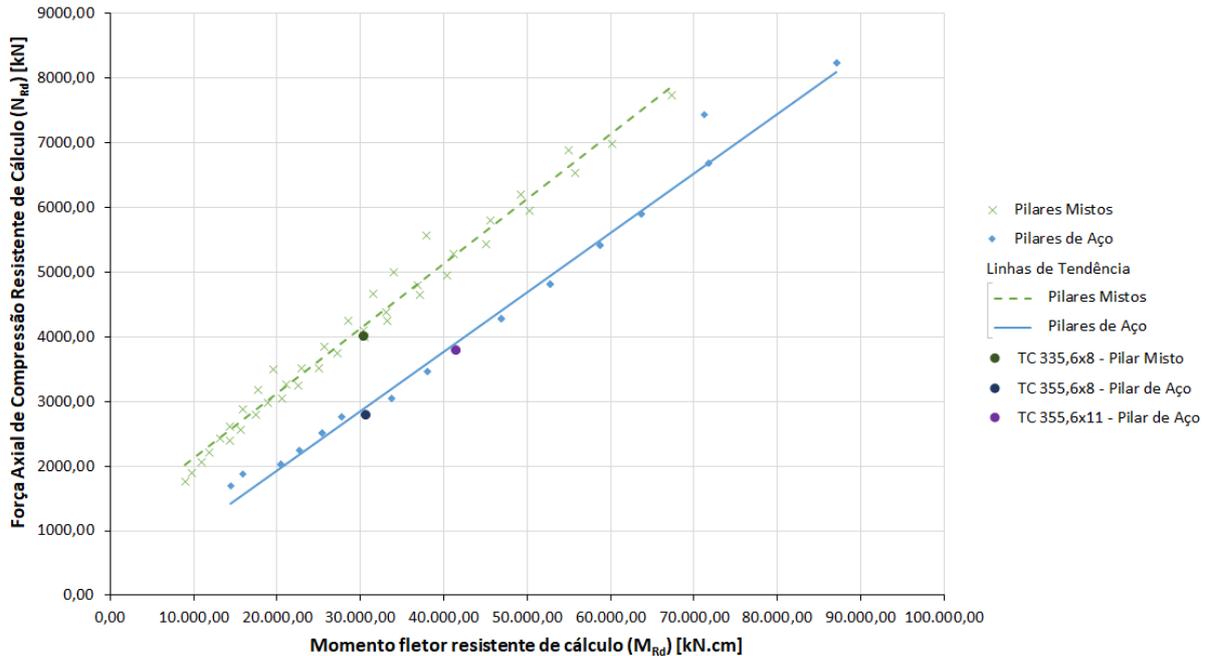


Figura 4. Força axial de compressão resistente de cálculo versus momento fletor resistente de cálculo para os pilares mistos de f_{ck} igual a 20 MPa e seus respectivos pilares de aço equivalentes.

3.2 Análise Comparativa de Custos

Compressão Pura

O gráfico mostrado na Fig. 5 apresenta um comparativo de custos entre os pilares mistos e os pilares de aço com resistência equivalente, são representados os resultados para o comprimento de flambagem igual a 3 m e f_{ck} igual a 20 MPa para as seções mistas. Observa-se que os pilares puramente em aço submetidos à compressão pura, sem armadura, apresentaram em todos os casos um custo mais elevado do que os do custo dos pilares mistos.

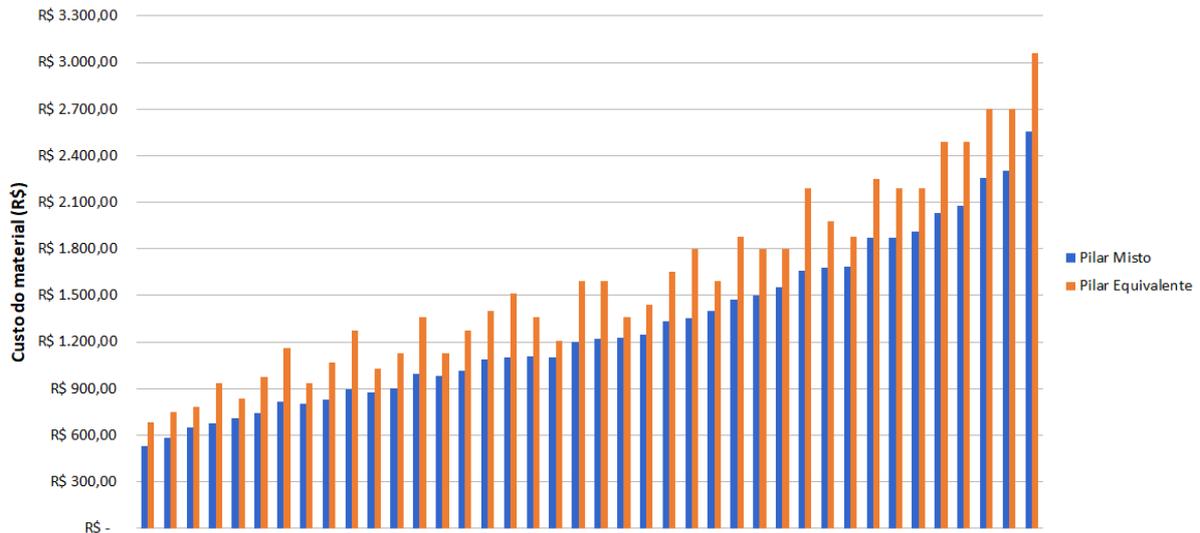


Figura 5. Comparação de custo de material entre perfis mistos e perfis de aço equivalentes de mesma resistência à compressão quando submetido à Compressão Pura, f_{ck} igual a 20 MPa e comprimento de flambagem igual a 3 m.

Este resultado também foi constatado para as demais baterias de testes com comprimento de flambagem de 3 m. A variação do custo entre o pilar misto e o seu pilar de aço equivalente cresce com o aumento da resistência característica do concreto. Como pode ser notado na Figura 6, onde são apresentados os aumentos percentuais (A_p) do custo do pilar ao se utilizar o pilar de aço ao invés do misto, com resistências características do concreto iguais a 20, 30, 40 e 50 MPa, sem armadura e com comprimento de 3 metros.

$A_{p,média}$ é o aumento médio percentual do custo do pilar, $A_{p,mín}$ e $A_{p,máx}$ são os aumentos percentuais mínimos e máximo, respectivamente, obtidos por meio de desvio padrão. Destaca-se que os pilares de aço são em média 24%, 34%, 44% e 55% mais caros que os pilares preenchidos com concreto, sem armadura, de resistência característica à compressão de 20, 30, 40 e 50 MPa, respectivamente. Adicionando-se armadura aos pilares mistos, os aumentos médios percentuais são 1% maiores àqueles supracitados.

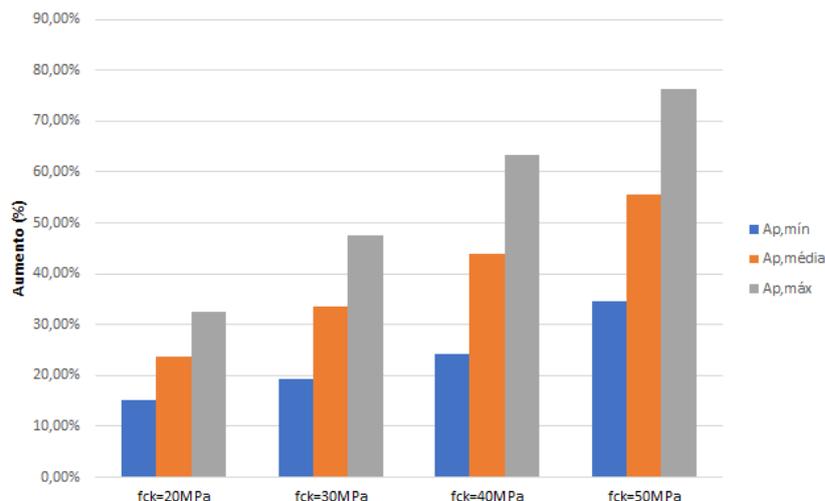


Figura 6. Aumento do custo de material para o uso de perfis de aço equivalentes às seções mistas, quando submetidos à Compressão Pura, com L igual a 3 m, sem armadura, para diversas resistências à compressão do concreto.

A Figura 7 mostra o custo de todos os pilares de aço e mistos das seções catalogadas utilizadas,

para as diferentes baterias de testes. O uso de concretos mais resistentes em pilares mistos de seção circular tubular não implica em uma grande variação de custo quando se comparado a um pilar misto de resistência inferior. Ao mesmo tempo em que se tem um acréscimo de resistência bem mais relevante. A seção TC 355,6x10,0 quando preenchida com concreto de resistência característica à compressão de 40 MPa é 1,30% mais cara que a mesma seção preenchida com concreto de f_{ck} igual a 20 MPa. Sendo que sua resistência à compressão aumenta em 25,50%. Conclui-se então que a utilização de concretos mais resistentes para obtenção de pilares mistos mais econômicos é uma opção vantajosa na Grande Vitória conforme já havia sido observado por Braga e Ferreira [20].

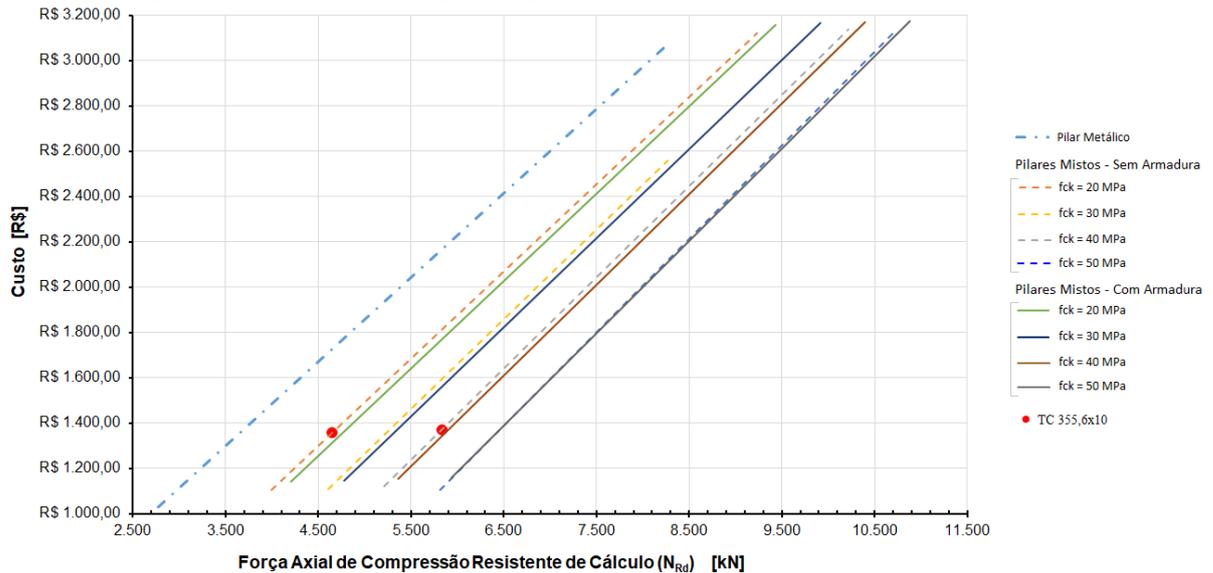


Figura 7. Custo dos diferentes pilares versus força axial de compressão resistente de cálculo para pilares submetidos à compressão pura, com comprimento de 3 metros e diâmetro de 355,6 milímetros.

A Figura 8 mostra o custo dos pilares mistos contra o custo dos pilares de aço de resistência equivalente, para comprimento de flambagem de 6 metros e pilares mistos com f_{ck} de 20 MPa. Observa-se que, para pilares com 6 metros de comprimento, nem sempre as seções mistas são economicamente viáveis. Já que é possível encontrar pilares de aço de menor área de aço que atenda às solicitações, ou seja, pilares com custo mais barato.

Na Figura 8 existem 12 pilares mistos que não são viáveis, que são todas as seções de diâmetro de 219,1 mm, exceto a de 6,4 mm de espessura, e as de 273,0 mm de diâmetro e espessura de 20, 25 e 30 mm.

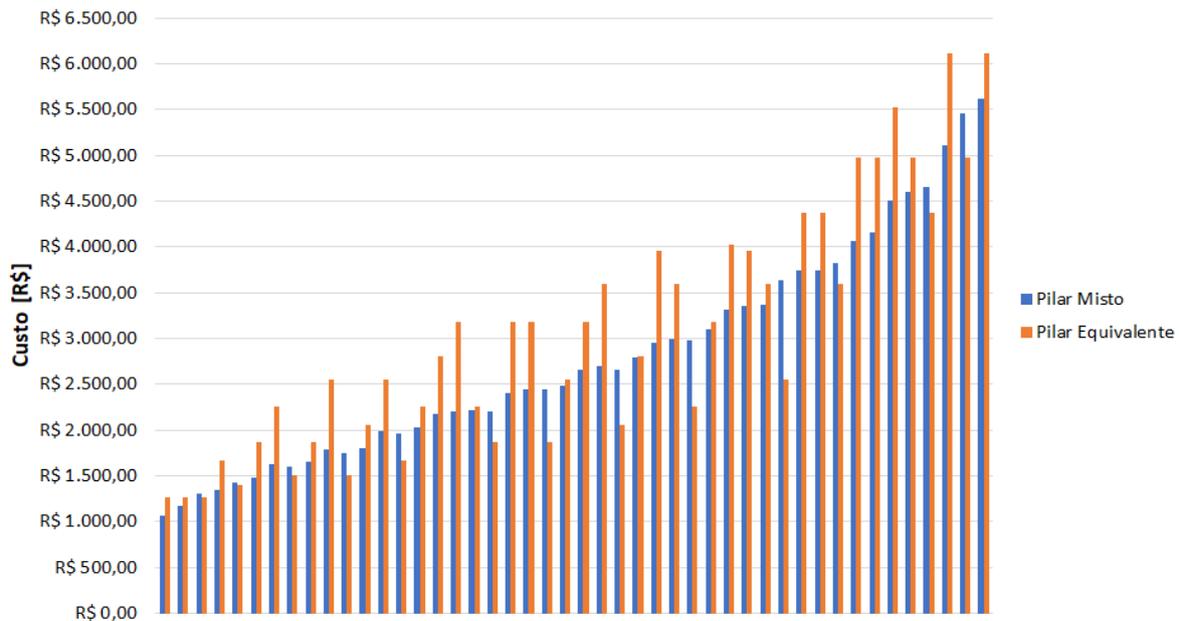


Figura 8. Comparação de custo de material entre perfis mistos e perfis de aço equivalentes de mesma resistência à compressão quando submetido à Compressão Pura, f_{ck} igual a 20 MPa e comprimento de flambagem igual a 6 m.

Para resistências à compressão característica do concreto maiores (30, 40 e 50 MPa) tem-se uma maior quantidade de seções mistas desvantajosas. Como já descrito nas figuras 2 e 3, o aumento do comprimento do pilar reduz consideravelmente a resistência à compressão das seções mistas. Assim, os pilares mistos de seção tubular com pequeno diâmetro e espessuras maiores apresentam resistência à compressão menor ou igual a de pilares de aço com maior inércia e menor área. Ou seja, existem seções transversais que não são viáveis para compor pilares mistos de 6 metros de comprimento, pois o preenchimento da seção com concreto não representará um grande ganho de resistência.

O gráfico da Figura 9 expõe os custos dos pilares mistos e metálicos para todas as seções catalogadas versus a força axial de compressão resistente. As seções foram separadas de acordo com seu diâmetro em linhas de tendência, nas quais percebe-se uma relação linear entre o aumento da espessura da seção e o aumento do custo e da resistência à compressão.

Entretanto, o fato de existirem perfis tubulares que não são viáveis para formar um pilar misto, não indica que os pilares mistos são uma opção ruim. Pois em alguns casos é possível encontrar outro pilar misto que atende à solicitação e apresenta um menor custo que o metálico. Por exemplo, para a seção TC 219,1x16 a rotina encontrou o pilar de aço de resistência equivalente composto pela seção TC 323,8x8,0. Porém, um pilar misto com seção transversal TC 328,8x6,4 também atende à solicitação e é R\$241,11 mais barato.

O gráfico da Figura 9 representa o custo dos pilares versus a força axial de compressão resistente de cálculo para todos os pilares mistos e de aço catalogados. Nela para cada diâmetro observa-se uma relação aproximadamente linear entre a espessura, o custo e a força resistente de compressão do pilar, desta forma, a Fig. 9 apresenta os resultados em linhas de tendências para cada diâmetro.

É possível notar que os pilares mistos de diâmetro de 219,1 mm e 273 mm não são sempre mais econômicos que os de aço, visto que as linhas de tendência dos pilares de aço de 273 e 323,8 mm de diâmetro encontram-se abaixo delas para uma mesma resistência. Por exemplo, quando o esforço de compressão resistente é de 1500 kN, a reta do pilar de aço de diâmetro de 273 mm está abaixo da reta do pilar misto de 219 mm de diâmetro, assim, provavelmente, existe uma seção de aço pura que atenda à solicitação com um menor custo.

Em suma, quando pilares de 6 metros de comprimento são submetidos à compressão pura, os pilares de aço são economicamente mais viáveis que os mistos para as seções mistas de diâmetro pequeno e

principalmente para esforços menos severos.

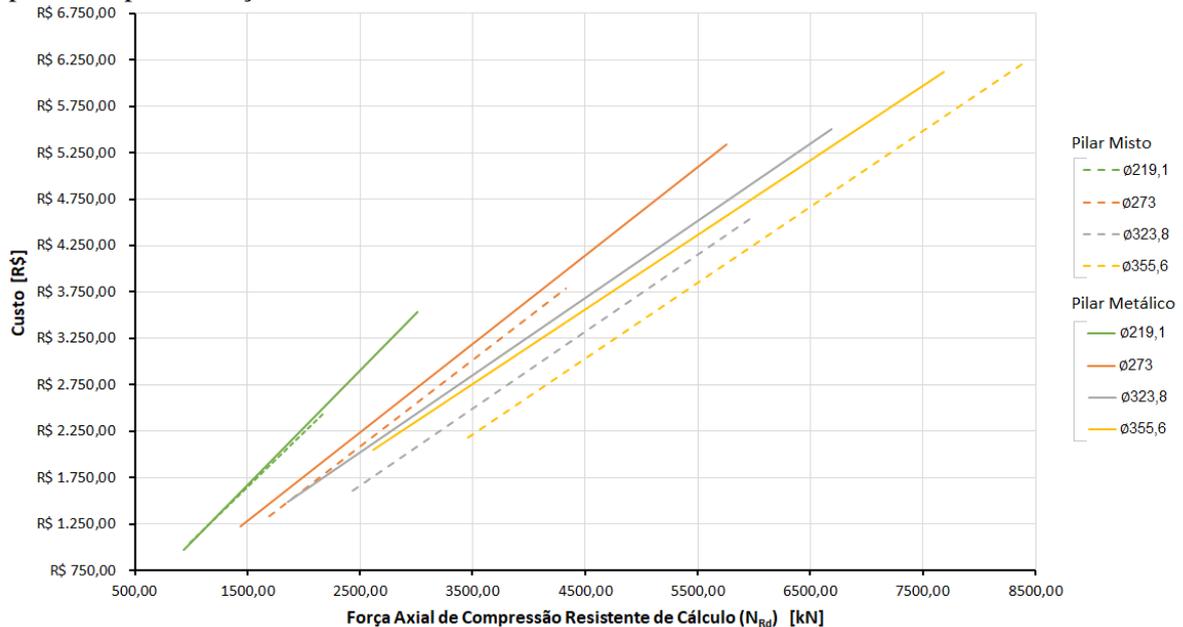


Figura 9. Gráfico do custo versus força axial de compressão resistente de cálculo para pilares submetidos à compressão pura, comprimento de flambagem de 6 metros e f_{ck} igual a 20MPa, variando os diâmetros das seções e as espessuras.

Flexo-Compressão

Já quando os pilares são submetidos à flexo-compressão, com um esforço axial de compressão igual à força axial resistente de cálculo à plastificação do concreto ($N_{pl,c,Rd}$) e um momento solicitante igual ao resistente do perfil misto ($0,9M_{pl,Rd}$), a rotina encontrou pilares de aço com área de aço inferior aos mistos que atendiam à segurança. Uma vez que, devido à rotina implementada utilizar o momento resistente do pilar misto como o solicitante para o de aço, quem predomina na verificação é o momento fletor. Assim, como tem-se descrito mais adiante, em alguns casos é possível encontrar pilares de aço com maior diâmetro e menor espessura que se adequam à verificação estrutural.

Na Figura 10 são apresentados os custos dos pilares mistos e de seus pilares de aço equivalentes com comprimento de flambagem igual a 3 metros e f_{ck} de 20 MPa para os pilares mistos, obtidos por meio das rotinas de flexo-compressão. Nota-se que em 8 casos, a rotina encontra pilares de aço mais econômicos que os mistos, são eles os pilares mistos compostos pelas seções TC 219,1x10, TC 219,1x11, TC 219,1x12,5, TC 219,1x14,2, TC 219,1 x 16,0, TC 273,0 x 16,0, TC 273,0 x 17,5 e TC 273,0 x 20,0.

Entretanto, é importante salientar, que podem existir pilares mistos com menor custo que também atendem aos requisitos. Como por exemplo, para o pilar misto de seção TC 219,1 x 10,0, foi encontrado o pilar de aço de seção TC 323,8 x 6,4 que atende à solicitação. Porém, o pilar misto de seção TC 273,0 x 6,4 também resiste a esta situação, sendo R\$76,29 mais barato que o pilar de aço. Ou seja, é preciso analisar caso a caso para saber se os pilares mistos são ou não opções mais viáveis.

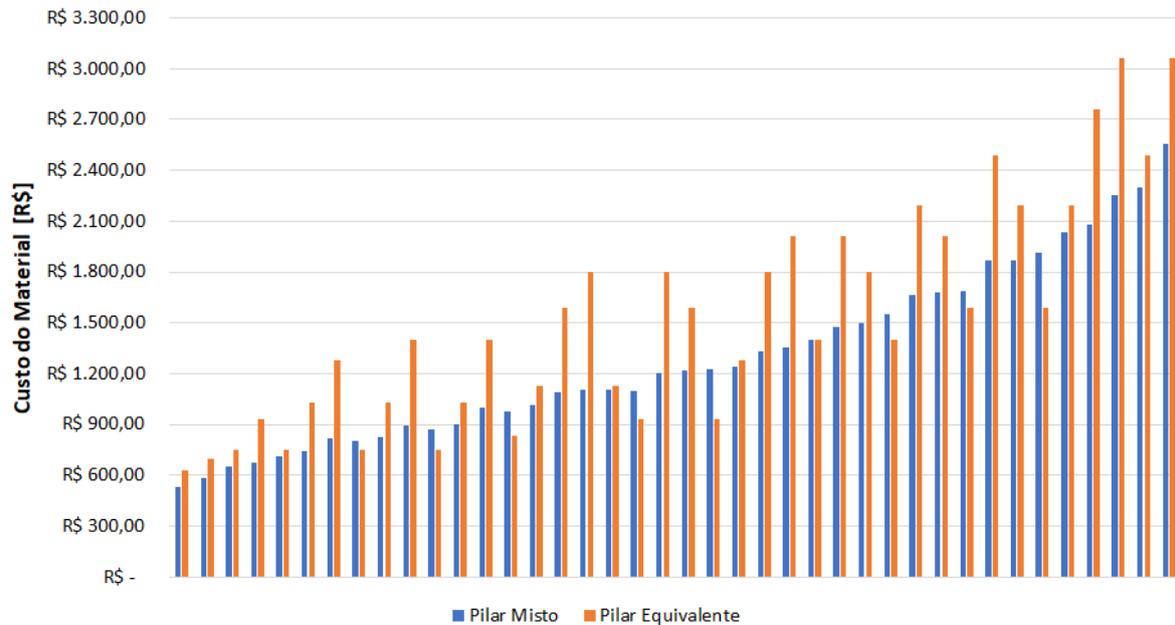


Figura 10. Comparação de custo de material entre perfis mistos e perfis de aço equivalentes de mesma resistência à compressão quando submetido à Flexo-Compressão, f_{ck} igual a 20 MPa e L igual a 3m.

Na Figura 11, verificam-se os aumentos percentuais mínimos, médios e máximos no total de custos dos materiais ao se utilizar pilares de aço face aos pilares mistos, para pilares de comprimento de 3 metros sem armadura. Nela foram considerados apenas os pilares mistos que obtiveram pilares de aço equivalentes mais caros. Destaca-se que os pilares de aço, quando submetidos à flexo-compressão na situação exemplificada, apresentam um valor médio em torno de 28%, 44%, 60% e 74% superior aos dos pilares preenchidos com concreto de resistência característica à compressão de 20, 30, 40 e 50 MPa respectivamente.

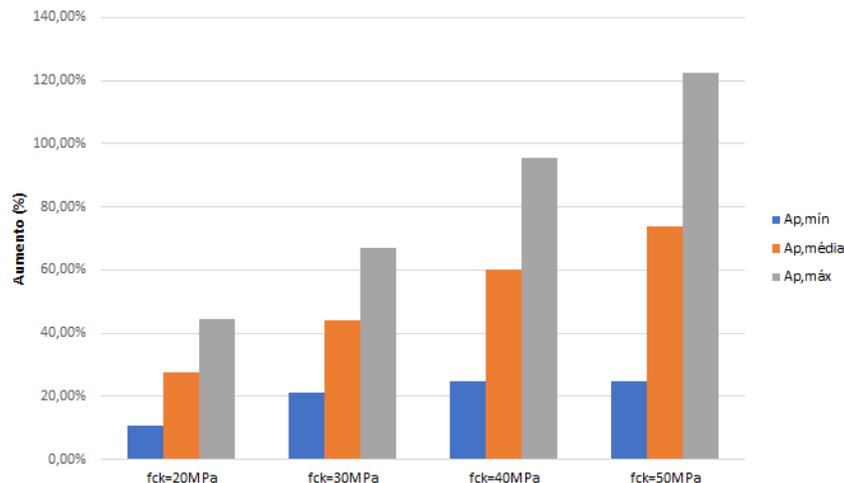


Figura 11. Aumento do custo de material entre perfis mistos e perfis de aço equivalentes quando submetidos à Flexo-Compressão, com comprimento de flambagem de 3 m, sem armadura, para diversas resistências à compressão do concreto.

Na Figura 12 pode-se observar os custos dos pilares mistos e de seus pilares de aço equivalentes para um comprimento de flambagem igual a 6 metros. Observando os resultados obtidos para 6 metros de comprimento, percebe-se que os casos em que a rotina encontra perfis de aço economicamente mais viáveis que os mistos aumentam quando comparados aos pilares de 3 metros de comprimento. A Figura 12 apresenta 15 casos de pilares mistos não viáveis para as solicitações testadas contra 8 casos vistos na

Fig. 10. Este aumento de ocorrências chega a ser em torno de 88% para pilares mistos com f_{ck} de 20 MPa.

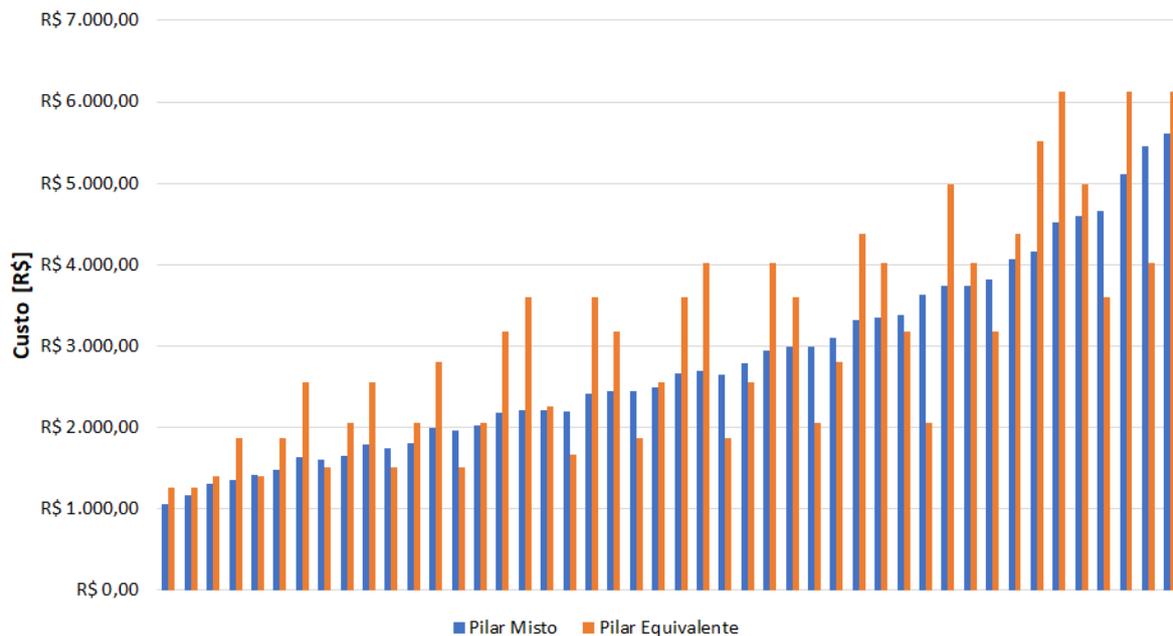


Figura 12. Comparação de custo de material entre perfis mistos e perfis de aço equivalentes de mesma resistência à compressão quando submetido à Flexo-Compressão, f_{ck} igual a 20 MPa e L igual a 6m.

4 Conclusões

Neste trabalho foram realizadas análises comparativas de resistência e custo entre pilares mistos e de aço submetidos à compressão pura e à flexo-compressão. Foram considerados comprimentos de flambagem de 3 e 6 metros e resistências à compressão característica do concreto iguais a 20, 30, 40 e 50 MPa. Também foram testados pilares mistos com armadura de 4 barras com 12,5 mm de diâmetro. Uma análise da influência do comprimento de flambagem na resistência à compressão do pilar para comprimentos de 3 a 7 metros também foi efetuada para o caso de compressão pura.

Verificou-se que os pilares circulares preenchidos com concreto apresentam diversas vantagens quando comparados com os pilares de aço, principalmente quando submetidos à compressão pura. Neste caso, para comprimentos de flambagem de 3 metros, eles são sempre mais econômicos, apresentando uma gama variada de seções que podem ser utilizadas ao invés da seção metálica pura. Além da possibilidade de adição de concreto com resistências maiores e armaduras, conforme a necessidade.

Ainda sobre a compressão pura, a utilização de concretos com maiores resistências é uma opção economicamente viável para comprimentos de flambagem de 3 metros. Visto que sua resistência à compressão melhora consideravelmente, cerca de 25,50% de aumento quando se utiliza um concreto de resistência característica de 40 MPa para a seção TC 355,6x10, ao invés de um f_{ck} de 20 MPa. Enquanto o custo adicional do concreto é pouco impactante no custo total de material, em torno de 1,30% para a mesma situação. Com isto, é possível encontrar para uma mesma resistência à compressão do pilar, seções com menos aço, ou seja, mais baratas, preenchidas com concreto de alta resistência. Braga e Ferreira [17] afirmaram que o fato dos pilares mistos com concretos mais resistentes serem mais econômicos que os pilares preenchidos com concreto menos resistentes é devido ao preço do concreto praticado na Grande Vitória.

Em contrapartida, para as análises com comprimento de flambagem de 6 metros, existem pilares mistos compostos por seções transversais que não são economicamente viáveis. Pois, é possível encontrar pilares de aço mais baratos que resistem a esforços resistentes similares aos resistidos por

esses pilares mistos. Isto foi observado em 13 casos na compressão pura, com f_{ck} de 20 MPa, e em 15 casos na flexo-compressão, para a mesma resistência característica à compressão do concreto.

Na compressão pura isto ocorre, pois, o comprimento de flambagem impacta significativamente na redução da resistência axial à compressão do pilar. Desta forma, a adição de concreto tem menor influência na sua resistência, conforme também constatado por Braga e Ferreira [17]. A Figura 2 mostrou que houve uma redução de 49% na resistência do pilar misto, TC 219,1x8, com concreto de f_{ck} de 30 MPa, contra 43% de redução da resistência à compressão do pilar de aço de mesma seção, quando comprimento de flambagem sobe de 3 para 7 metros. Já na flexo-compressão é preciso analisar a combinação de esforços aplicados para verificar qual tipo de pilar é mais econômico.

Para comprimentos de flambagem de 3 metros, quando os pilares são submetidos à flexo-compressão, a rotina encontrou 8 situações onde os pilares de aço foram mais econômicos. Entretanto, observa-se que podem existir outras seções transversais de pilares mistos que atendam aos requisitos e sejam mais baratos que os pilares de aço equivalentes. Como é o caso do pilar misto de seção TC 219,1 x 10,0, onde a rotina encontrou o pilar de aço mais barato de seção TC 323,8 x 6,4 que atende à solicitação. Porém, o pilar misto de seção TC 273,0 x 6,4 também atenderia, sendo R\$76,29 mais barato que o de aço.

Em suma, as estruturas mistas representam um método construtivo extremamente viável para pilares submetidos à compressão pura e à flexo-compressão em comprimentos de flambagem de 3 metros. Enquanto, para comprimentos de 6 metros, os pilares de aço podem apresentar melhor desempenho econômico. Cabe a trabalho futuros analisar a flexo-compressão em mais combinações de forma a melhor identificar a viabilidade dos pilares mistos.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi inicialmente incentivada pelo Departamento de Estruturas da Universidade Federal do Espírito Santo, fazendo parte como atividade complementar do programa da disciplina de Estruturas Mistas ministrada pela Prof. Dr. Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani, a qual também incentivou a aprofundar mais o estudo e submetê-lo ao CILAMCE 2019.

Referências

- [1] A. P. M. Nóbrega. Análise do comportamento de pilares mistos aço-concreto em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] R. B. Caldas, R. H. Fakury and J. B. M. de Souza Junior. Bases do dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto segundo o projeto de revisão da NBR 8800. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, vol. 60, n. 2, pp.271-276., 2007.
- [4] F. R. Bianchi e L. H. Coelho. Análise do comportamento dos pilares mistos considerando a utilização de conectores de cisalhamento. 1º Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. São Paulo, 2004.
- [5] R. W. Furlong. Strength of steel encased concrete beam column. ASCE Journal of the Structural Division, 1967.
- [6] R. Knowles, H. K. Sen and R. Park. Strength of concrete filled steel tubular columns. Journal of Structural Division, vol. 95, n.12, pp.2565-2587. 1969.
- [7] P. K. Neogi, H. K. Sen and J. C. Chapman. Concrete-filled steel columns steel columns under eccentric loading. The Structural Engineer, vol. 47, n. 5, pp. 187-195. 1969.
- [8] H. Shakir-Khalil. Steel-concrete composite columns I. Steel-concrete composite structures: stability and strength, Cap. 06, pp.163-193, 1988.

- [9] H. Shakir-Khalil and M. Mouli. Further tests on concrete-filled rectangular hollow section columns. *The Structural Engineer*, vol. 68, n.20, pp.405-413, 1990.
- [10] N. S. Gomes. Pilares mistos tubulares de aço e concreto. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.
- [11] S. Matsui, K. Tsuda and Y. Ishibashi. Slender concrete filled steel tubular columns under combined compression and bending. 4th Pacific Structural Steel Conference, Singapore, 1995. Proceedings. Oxford, Elsevier. *Steel-concrete Composite Structures*, vol. 3, pp.29-36.
- [12] N. Hayashi, T. Fukumoto, T. Inoue, H. Akiyama and T. Okada. Shear-flexural behavior of concrete-filled square steel tubular columns using high-strength materials. 4th Pacific Structural Steel Conference, Singapore, 1995. Proceedings. Oxford, Elsevier. *Steel-concrete Composite Structures*, vol. 3, pp.13-20.
- [13] T. Fank, R. Igaki and T. Nakamura. Elastic-plastic behavior of concrete-filled tubular steel columns. 4th Pacific Structural Steel Conference. Singapore, 1995. Proceedings. Oxford, Elsevier. *Steel-concrete Composite Structures*, vol.3, pp. 45-52.
- [14] S. de Nardin. Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- [15] W. L. A. de Oliveira, S. de Nardin and A. L. H. de C. El Debs. Dimensionamento de pilares preenchidos de seção circular submetidos à compressão simples, segundo a NBR 8800:2008 e Eurocode 4:2004: comparação com resultados experimentais. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, vol. 1, n. 62, pp.73-85, 2009.
- [16] E. Jr Tarnoczy. Custo comparativo entre colunas mistas e metálicas. 1º Congresso internacional da construção metálica, São Paulo, Brasil, 2001.
- [17] A. C. G. Braga and W. G. Ferreira. Pilares mistos aço-concreto e comparativo de custo com pilares de aço e pilares de concreto armado. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, vol. 4, n. 64, pp.407-414, 2011.
- [18] Vallourec. Tubos Estruturais: Seção Circular, Quadrada e Retangular.
- [19] 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.