

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PILARES DE AÇO E MISTOS DE AÇO E CONCRETO UTILIZANDO TUBOS
COM COSTURA**

Clara Garcia Sanders¹

Lucas Fadini Favarato²

André Vasconcelos Soares Gomes³

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani⁴

Resumo

De modo a reduzir os impactos ambientais e o peso das estruturas, os perfis tubulares de aço com costura estão se tornando soluções cada vez mais utilizadas no setor da construção civil. Esses perfis desempenham diversas vantagens para aplicações estruturais como pilares, já que sua geometria permite grande versatilidade arquitetônica, soluções mais econômicas, diminuem o tempo de construção e garantem grande resistência à flexão, torção e flambagem. Ademais, também é possível utilizá-lo preenchido de concreto, os denominados pilares mistos. Esta opção se mostra uma solução econômica já que dispensa o uso de formas, aumenta a resistência mecânica, resistência ao fogo do elemento e reduz as dimensões das seções transversais, proporcionando justamente estruturas mais leves e menor gasto com materiais em comparação com os pilares executados em concreto armado. Dessa forma, perante a todas as vantagens oferecidas, torna-se evidente a elevada importância da realização de pesquisas para otimização do dimensionamento de pilares de aço em perfil soldado tubular com e sem preenchimento de concreto. Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional em MS Excel para dimensionamento otimizado de pilares com perfis em aço de seção tubular ou mistos através do algoritmo evolucionário do SOLVER. Assim será possível criar uma ferramenta que permita a projetistas otimizar seus projetos em aço, tornando as soluções mais competitivas para o mercado.

Palavras-chave: Pilares de aço; Pilares mistos de aço e concreto; Dimensionamento de Perfis tubulares soldado; Otimização.

OPTIMUM DESIGN OF STEEL AND STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMNS USING WELDED TUBULAR SECTIONS

Abstract

In order to reduce the environmental impacts and the weight of structures, welded steel tubular sections have become widely used in the civil construction. Because of their high compressive strength, these profiles have several advantages for structural applications as columns, since their geometry allows for great architectural versatility, with economy and great resistance to bending, twisting, and buckling. Furthermore, it can also be filled with concrete, which is a very economical strategy since it leads to a great reduction in the structural steel consumption due to the concrete. As such, it also increases both mechanical and fire resistances of the element. In this context, this project seeks to develop a computational tool in Excel to optimize the design of steel and steel and concrete composite tubular columns through SOLVER's evolutionary algorithm, considering the weight and environmental impacts of materials. Thus, this tool allows designers to optimize their steel projects, granting competitiveness and less carbon emissions to their projects.

Keywords: Steel columns; Steel and concrete composite columns; Welded tubular profile; Design.

¹ Graduanda em Engenharia Civil/ Pesquisador/ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Vitória – ES, Brasil. E-mail: clara.sanders@edu.ufes.br | claragarcia110499@gmail.com

² Engenheiro Civil/ Mestre em Engenharia Civil/ Pesquisador/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Vitória – ES, Brasil. E-mail: lucasffavarato@gmail.com

³ Engenheiro Civil/ Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Especialista de Desenvolvimento da Construção, ArcelorMittal Tubarão/ Vitória – ES, Brasil. E-mail: andre.vs.gomes@arcelormittal.com.br

⁴ Engenheira Civil/ Doutora em Engenharia de Estruturas/Professora Associada, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Vitória – ES, Brasil. E-mail: adenilcia.calenzani@ufes.br

1. INTRODUÇÃO

A construção civil no Brasil é essencialmente pautada em elementos cimentícios e cerâmicos, que apesar de atenderem aos requisitos de desempenho de uma edificação, apresentam desvantagens intrínsecas ao processo executivo que devem ser consideradas quando se opta por usá-los.

Os elementos convencionais possuem elevado peso próprio e intensificam diversos impactos ambientais, uma vez que seus processos de extração de matéria prima e fabricação geram resíduos e incluem processos de queima. Também há de se considerar que o setor da construção civil é responsável por consumir cerca de 75% das matérias-primas e emitir 1/3 dos gases de efeito estufa (MEYER, 2002).

Dessa forma, é preciso buscar alternativas que permitam à construção civil otimizar o uso de recursos no tocante aos aspectos ambiental, social e econômico. Neste contexto, o aço merece destaque por ser material 100% reciclável e, sobretudo, pela capacidade de reduzir o peso dos sistemas estruturais. Em específico, o emprego de perfis tubulares com costura como pilares, seja com ou sem preenchimento de concreto, apresenta diversas vantagens, tais como grandes versatilidades arquitetônicas, soluções mais econômicas, eliminação da necessidade de reforços extras e formas, redução o peso da estrutura, diminuição o tempo de construção e garante grande resistência à flexão, torção e flambagem (CANALES, 2014).

É imprescindível discutir que os perfis tubulares permitem o preenchimento com concreto (pilares mistos), de modo que a interação entre a peça de aço e o concreto evidencia-se muito vantajosa ao unir a capacidade de resistência do aço e a robustez do concreto (CANALES, 2014).

Os perfis tubulares com costura, em específico, são produzidos por meio da conformação mecânica, geralmente a frio, de chapas ou tiras de bobina de aço seguidos por uma solda, efetuando a emenda contínua da chapa. Eles podem se distinguir por meio da disposição da solda, longitudinal ou helicoidal, bem como pelo processo de soldagem empregado – solda por fusão com adição de material ou solda no estado sólido sem adição de material (ARAÚJO et. al, 2016).

Para produção dos tubos e comercialização, é possível encontrar no mercado brasileiro uma gama de fabricantes que adquirem as tiras e bobinas de aço de usinas siderúrgicas e realizam o processo de conformação, soldagem e distribuição. Essa variedade de fabricantes garante a sua vantagem de ser um produto de fácil disponibilidade em todas as regiões do Brasil. Além disso, devido à variedade de fabricantes e das propriedades de aços disponibilizados pelas usinas siderúrgicas para sua fabricação, estes tubos oferecem como vantagens a maior oferta de bitolas e espessuras, menores preços, tolerâncias mais estreitas e maior flexibilidade quanto à resistência mecânica do aço frente aos tubos sem costura, além de melhor acabamento superficial tanto na parte interna como externa.

Além disso, os tubos com costura possuem normas específicas que prescrevem as recomendações de fabricação e fornecem as propriedades do aço. Neste trabalho, a norma

NBR 8261 (ABNT, 2019) foi utilizada como base para desenvolvimento dos estudos. A tabela 1 apresenta as resistências mínimas ao escoamento e à ruptura prescritas pela norma.

Tabela 1– Propriedades de tração especificadas para os tubos com solda

Tabela 4 – Propriedades de tração

Característica	Propriedades de tração em função do grau do aço					
	Seção circular			Seções quadrada e retangular		
	A	B	C	A	B	C
Limite de resistência à tração LR mínimo MPa	310	400	427	310	400	427
Limite de escoamento LE mínimo MPa	228	290	317	269	317	345
Alongamento mínimo (Lo = 50 mm) %	25 ^a	23 ^b	21 ^c	21 ^a	19 ^b	16 ^c
^a Aplicável às espessuras de parede maiores ou iguais a 3,0 mm. Para espessuras de parede menores, o alongamento deve ser calculado de acordo com a seguinte equação: $A = [2,20e + 17,50]$ onde A é o alongamento, expresso em porcentagem (%); e é a espessura de parede, expressa em milímetros (mm). ^b Aplicável às espessuras de parede maiores ou iguais a 4,6 mm. Para espessuras de parede menores, o alongamento deve ser calculado de acordo com a seguinte equação: $A = 2,40e + 12,0$ ^c Aplicável às espessuras de parede maiores ou iguais a 3,0 mm. Para espessuras de parede menores, o valor do alongamento deve ser estabelecido por acordo prévio entre produtor e comprador.						

Fonte: ABNT NBR 8261 (2019)

Segundo Canales (2014), os pilares executados com esse tipo de perfil também apresentam esbelteza reduzida, ao ser comparado com os pilares convencionais de concreto armado.

Ainda, Samarra (2007) pesquisou as propriedades de grandes vãos em estruturas tubulares, para isso foi montado em tamanho real uma estrutura de cobertura de 900 m² e ensaiada simulando os carregamentos. Após os ensaios foram feitas análises numéricas no SAP2000 visando comparar os deslocamentos e as deformações da estrutura global e entender o seu mecanismo estático.

Costa (2004) avaliou o uso de estruturas em aço, em especial os perfis tubulares, através da abordagem de aspectos que devem ser planejados durante a elaboração do projeto arquitetônico e fatores que devem ser considerados na ligação entre a estrutura e o subsistema de fechamento vertical externo.

Araújo (2008), por sua vez estudou o efeito de altas temperaturas em pilares tubulares de aço preenchidos de concreto a partir de ensaios realizados à temperatura ambiente e ensaios de laboratório em forno que simula a situação de incêndio nos pilares.

Branco (2006) estudou e desenvolveu um software para projeto de estruturas planas treliçadas tubulares de aço com estudo comparativo entre treliças compostas por barras com ligações rotuladas e rígidas.

Por conseguinte, mediante todas as vantagens expostas e o aumento do uso dessa solução em aço para pilares, infere-se conveniente desenvolver pesquisas na área e torna-se interessante buscar soluções mais econômicas e racionais, cenário em que a otimização se torna relevante.

Neste contexto, esta pesquisa tem por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para automatizar o dimensionamento de pilares de aço de seção tubular com costura e de pilares mistos, com base nas normas nacionais aplicáveis. A otimização é voltada principalmente para redução de impactos ambientais por meio do algoritmo evolucionário do SOLVER, que, considerando as limitações impostas pela norma, trabalha para potencializar o desempenho dos elementos estruturais

2. DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE AÇO E MISTOS DE AÇO E CONCRETO

2.1 Pilar de aço

Para o desenvolvimento dos cálculos referentes ao dimensionamento de pilares de aço, os estados últimos limites possíveis para estes elementos foram verificados conforme as normas NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2008).

2.1.1. Força normal de compressão

Em uma barra comprimida de seção tubular, os estados-limites últimos aplicáveis são instabilidade global por flexão ou por torção e flambagem local. A instabilidade por torção pura não é levada em consideração nesta pesquisa, uma vez que o comprimento de flambagem por torção pura é tomado sempre igual ou inferior ao comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo de menor inércia.

Dessa forma, para a verificação da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) considera-se as formulações da norma (equações (1) e (2)).

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (1)$$

$$N_{c,Rd} \geq N_{c,Sd} \quad (2)$$

No qual, $N_{c,sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo e a flambagem local deve ser analisada de acordo com a forma da seção (circular ou retangular), conforme Tabelas (2) e (3).

Tabelas 2 e 3 – Flambagem local em seção circular e retangular

SEÇÃO CIRCULAR		
λ	CONDIÇÃO	Q
$\frac{d}{t}$	$\leq 0,11 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	1
$\frac{d}{t}$	$> 0,11 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$Q = \frac{0,0379 E_a}{d/t f_y} + \frac{2}{3}$
	$\leq 0,45 \frac{E_a}{F_y}$	
$\frac{d}{t}$	$> 0,45 \frac{E_a}{f_y}$	Não previsto

SEÇÃO RETANGULAR		
λ	CONDIÇÃO	Q
$\frac{b_p}{t}$	$\leq 1,4 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	1
$\frac{b_p}{t}$	$> 1,4 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$\frac{A_{ef}}{A_g}$

Fonte: Próprios autores

Onde A_{ef} é a área efetiva da seção do perfil tubular (Equação 3) e b_p é a maior dimensão do elemento que corresponde à largura total menos duas vezes o raio de canto externo e t sua espessura, representada na Figura (1) como a maior dimensão entre $b_{p,1}$ e $b_{p,2}$.

$$A_{ef} = A_g - \sum[(b_p - b_{p,ef})t] \quad (3)$$

No qual $b_{p,ef}$ é a largura efetiva dada pela equação (4).

$$b_{p,ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E_a}{\sigma}} \left[1 - \frac{0,38}{\frac{b_p}{t}} \sqrt{\frac{E_a}{\sigma}} \right] \leq b_p \quad (4)$$

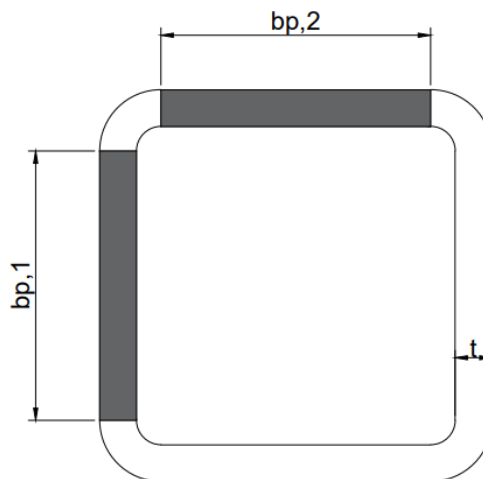


Figura 1 – Pilar tubular retangular de aço

Fonte: Próprios autores

Na equação (4), σ é a máxima tensão que atua no elemento analisado, considerada então igual à resistência ao escoamento do aço F_y , a favor da segurança.

2.1.2. Momento fletor

Com a presença de momento fletor, nas seções tubulares retangulares, os estados-limites aplicáveis são: flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local das almas (FLA). Os parâmetros de esbelteza para cada estado limite são apresentados na Tabela (4).

Tabela 4 – Parâmetros de esbelteza para verificação de momento fletor em seção retangular

SEÇÃO RETANGULAR					
FLT		FLA		FLM	
λ	$\frac{L_b}{r_y}$	λ	$\frac{b_{p,1}}{t}$	λ	$\frac{b_{p,2}}{t}$
λ_p	$\frac{0,13E_a}{Z_x f_y} \sqrt{J A_g}$	λ_p	$1,12 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	λ_p	$2,42 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$
λ_r	$\frac{2E_a}{M_r} \sqrt{J A_g}$	λ_r	$1,40 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	λ_r	$5,70 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$

Fonte: Próprios autores

Desta forma, tem-se que:

- Se, $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{x,Rk} = M_{x,pl} = Z_x f_y \quad (5)$$

No qual $M_{x,Rk}$ é o momento fletor resistente característico e $M_{x,pl}$ é o momento fletor de plastificação, ambos em relação ao eixo x.

- Se, $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{x,Rk} = C_b [M_{x,pl} - (M_{x,pl} - M_r \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p})] \quad (6)$$

Onde C_b é o fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, tomado conservadoramente nesta pesquisa, como igual a 1,0.

- Se, $\lambda > \lambda_r$

$$M_{x,Rk} = M_{x,cr} = \frac{2C_b E_a \sqrt{J A_g}}{\lambda} \quad (7)$$

Se $\lambda > \lambda_r$, para FLA, a alma é esbelta e não está inclusa no escopo deste trabalho.

Por fim, verifica-se a condição abaixo para a validação do dimensionamento.

$$M_{x,Rd} \geq M_{x,Sd} \quad (8)$$

Já para as seções tubulares circulares o único estado-limite aplicável é a flambagem local da parede (FLP), cujos parâmetros de esbeltez são dados na Tabela (5) e as expressões de cálculo dadas nas equações (9) a (12).

Tabela 5 – Parâmetros de esbeltez para verificação de momento fletor em seção circular

SEÇÃO CIRCULAR	
FLP	
λ	$\frac{d}{t}$
λ_p	$0,07 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$
λ_r	$0,31 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$

Fonte: Próprios autores.

Após a obtenção do índice de esbeltez, analisa-se:

- Se, $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{Rk} = M_{pl} = Z f_y \quad (9)$$

- Se, $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{Rk} = \left(\frac{0,021E_a}{\lambda} + f_y \right) W \quad (10)$$

- Se, $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rk} = M_{cr} = \frac{0,33E_a W}{\lambda} \quad (11)$$

Desta forma, a verificação a momento fletor é feita por:

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad (12)$$

2.1.3. Torção

O momento de torção provoca nos perfis tubulares circulares tensões de cisalhamento e nos perfis tubulares retangulares tensões de cisalhamento e tensões normais, mas estas últimas foram desprezadas na elaboração do programa, pois possuem baixa intensidade. As tensões de cisalhamento causam flambagem local da parede da seção tubular. Para o cálculo do momento torsor resistente em seções retangulares, obtém-se inicialmente os parâmetros de esbeltez por meio das equações da Tabela (6).

Tabela 6 – Parâmetros de esbelteza para verificação a momento torsor em seção retangular

SEÇÃO RETANGULAR	
λ	$\frac{b_p}{t}$
λ_p	$2,45 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$
λ_r	$3,07 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$

Fonte: Próprios autores

Dessa forma, analisa-se:

- Se, $\lambda \leq \lambda_p$

$$T_{Rk} = 0,60 W_T f_y \quad (13)$$

- Se, $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$T_{Rk} = \frac{0,60 W_T f_y (2,45 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}})}{\frac{b_p}{t}} \quad (14)$$

- Se, $\lambda > \lambda_r$

$$T_{Rk} = \frac{0,46\pi^2 E_a W_T}{\frac{b_p^2}{t}} \quad (15)$$

No qual, W_T é o módulo de resistência à Torção elástico e T_{Rk} o momento de torção resistente nominal.

Para as seções circulares calcula-se T_{Rk} por meio do maior valor entre as equações (16) e (17).

$$T_{Rk} = \left(\frac{1,23 E_a W_T}{\frac{d^{5/4}}{t} \sqrt{L}} \right) \leq 0,60 W_T f_y \quad (16)$$

$$T_{Rk} = \left(\frac{0,60 E_a W_T}{\frac{d^{3/2}}{t}} \right) \leq 0,60 W_T f_y \quad (17)$$

A verificação a momento torsor é feita por:

$$T_{Rd} \geq T_{Sd} \quad (18)$$

Para considerar efeitos combinados, deve-se usar a equação de interação (19).

$$\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} + \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{T_{Sd}}{T_{Rd}} \leq 1 \quad (19)$$

2.2. Pilar misto

Para o desenvolvimento dos cálculos referentes ao dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto, os estados últimos limites possíveis para estes elementos foram verificados conforme as normas NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2022).

2.2.1. Força normal de compressão

A fim de verificar os estados limites relativos à compressão, calcula-se a força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total ($N_{pl,Rd}$), que é dada pela soma das forças axiais resistentes de cálculo dos materiais que compõem o pilar, ou seja, o perfil de aço ($N_{pl,a,Rd}$), o concreto ($N_{pl,c,Rd}$) e a armadura longitudinal ($N_{pl,s,Rd}$), como exposto na equação (20).

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} + N_{pl,s,Rd} \quad (20)$$

Quando a seção é compacta, a força axial resistente de cálculo ($N_{p,Rd}$) é dada por:

$$N_{p,Rd} = N_{pl,Rd} \quad (21)$$

A força axial de compressão resistente de cálculo (N_{Rd}) é, por fim, calculada conforme a equação (22).

$$N_{Rd} = \chi N_{p,Rd} \quad (22)$$

No qual, χ é o fator de redução associado à flambagem global, calculado segundo a NBR 16239 (ABNT, 2013).

2.2.2. Momento fletor

Para a análise de uma seção submetida a apenas momentos fletores solicitantes de cálculo, a NBR 8800 (ABNT, 2022) determina a equação (23) para cálculo do $M_{pl,Rd}$, momento resistente de plastificação.

$$M_{pl,Rd} = F_{yd}(Z_a - Z_{an}) + 0,5F_{cd}(Z_c - Z_{cn}) + F_{sd}(Z_s - Z_{sn}) \quad (23)$$

Onde, Z_a , Z_c e Z_s são os módulos de resistência plásticos do aço, concreto e aço da armadura, respectivamente. Já Z_{an} , Z_{cn} e Z_{sn} são os módulos de resistência plásticos referentes à linha neutra, do aço, concreto e aço da armadura, respectivamente.

Considerando seção compacta, o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}), em relação aos eixos relevantes é dado por:

$$M_{Rd} = M_{pl,Rd} \quad (24)$$

2.2.3. Flexo-compressão

Para a verificação dos efeitos combinados da força axial e dos momentos fletores solicitantes de cálculo, pode-se utilizar 3 modelos de cálculo citados pela NBR 8800 (ABNT, 2022).

O modelo de cálculo I da NBR 8800 (ABNT, 2022) utiliza as equações de interação (25) e (26) e os valores obtidos nas equações (22) e (24) para (N_{Rd}) e (M_{Rd}) .

- Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (25)$$

- Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (26)$$

No qual, N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão, $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo em relação aos eixos x e y da seção transversal e $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ os momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y da seção transversal.

O modelo de cálculo II da NBR 8800 (ABNT, 2022) realiza a verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores por meio das equações (27) a (30).

- Se, $N_{Sd} \geq N_{pl,c,Rd}$

$$\mu_x = \frac{1 - N_{Sd} - N_{pl,c,Rd}}{N_{pl,Rd} - N_{pl,c,Rd}} \quad (27)$$

- Se, $\frac{1}{2}N_{pl,c,Rd} \leq N_{Sd} \leq N_{pl,c,Rd}$

$$\mu_x = \left(1 - \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} \right) \left(\frac{2N_{Sd}}{N_{pl,c,Rd}} - 1 \right) + \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} \quad (28)$$

- Se $0 \leq N_{Sd} < \frac{1}{2}N_{pl,c,Rd}$

$$\mu_x = 1 + \left(\frac{2N_{Sd}}{N_{pl,c,Rd}} \right) \left(\frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} - 1 \right) \quad (29)$$

No qual, $M_{c,x}$ e $M_{c,y}$ são dados, respectivamente, por $0,9M_{pl,x,Rd}$ e $0,9M_{pl,y,Rd}$, para f_y menor ou igual a 350 Mpa, e por $0,8M_{pl,x,Rd}$ e $0,8M_{pl,y,Rd}$ para f_y maior que 350 Mpa e menor ou igual a 450 Mpa.

$M_{d,x}$ e $M_{d,y}$ são calculados por $0,8M_{max,pl,x,Rd}$ e $0,8M_{max,pl,y,Rd}$, sendo que $M_{max,pl,x,Rd}$ e $M_{max,pl,y,Rd}$ são os momentos fletores máximos resistentes de plastificação de cálculo em relação aos eixos x e y . Caso $M_{d,x}$ seja menor que $M_{c,x}$, então $M_{d,x}$ deve ser tomado igual a $M_{c,x}$. O mesmo deve ser feito em relação ao eixo y .

Desta forma, é possível verificar com a equação (30) a flexo-compressão da seção, segundo o método de cálculo II.

$$\frac{M_{x,tot,Sd}}{\mu_x M_{c,x}} + \frac{M_{y,tot,Sd}}{\mu_y M_{c,y}} \leq 1 \quad (30)$$

Para o modelo de cálculo III, da NBR 8800 (ABNT, 2022), a verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores pode ser feita por meio das equações (31) e (32).

- Se, $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq c_p$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \left(\frac{1-c_p}{c_m}\right) \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}}\right) \leq 1 \quad (31)$$

- Se, $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < c_p$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \left(\frac{1-c_m}{c_p}\right) \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}}\right) \leq 1 \quad (32)$$

No qual c_m e c_p são coeficientes calculados conforme a NBR 8800 (ABNT, 2022).

2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A fim de garantir uma maior automatização e rapidez no dimensionamento de pilares com perfis tubulares, foi implementado um programa computacional por meio do MS Excel. O escopo do programa computacional engloba pilares com perfis tubulares de seção circular e retangular, além de pilares mistos preenchidos de concreto. Algumas considerações foram feitas, como pilares bi rotulados, ou seja, com coeficientes de flambagem por flexão iguais a 1 e perfis de seção compacta. Essa segunda consideração é tomada porque o catálogo de perfis utilizado na planilha, catálogo da Tuper (2019), só apresenta perfis de seção compacta, conforme classificação do projeto de norma NBR 8800 (ABNT, 2022).

Para os pilares puramente de aço, considerou-se a análise dos estados-últimos relacionados aos esforços de compressão, flexão, torção, flexo-compressão e flexo – torção.

Já para os pilares mistos, considerou-se os estados limites últimos referentes à compressão e flexo-compressão. O programa calcula as propriedades dos três componentes do elemento estrutural: perfil de aço, concreto do preenchimento do pilar e armadura (se houver), na qual a disposição das barras longitudinais foi considerada conforme Figura 2.

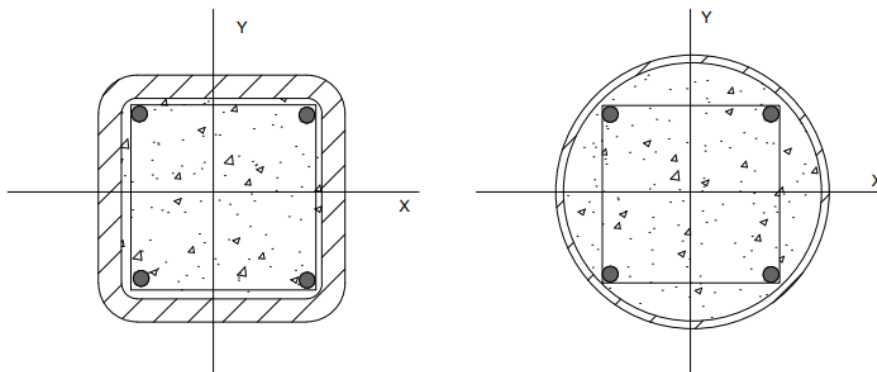


Figura 2 – Disposição da armadura longitudinal na seção transversal

Fonte: Próprios autores

Para a implementação do programa computacional, foram desenvolvidos 5 fluxogramas de cálculo a fim de sequenciar as etapas de dimensionamento e orientar a execução da ferramenta no Excel, que terá sua rotina descrita nos itens subsequentes e fundamentada na NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2022).

O programa impõe como restrições às dimensões dos perfis os dados do catálogo da Tuper (2019). Desta forma, o diâmetro do perfil tubular circular de aço não pode ser inferior a 15,87mm e superior a 339,70mm. Já as dimensões do perfil tubular retangular não devem ser inferiores a 250mm (menor dimensão) e a 350mm (maior dimensão).

Ao considerar que o perfil de aço e concreto trabalham em conjunto, sem escorregamento relativo na superfície de contato, a interação entre os materiais deve ser completa. Além disso, restrições geométricas e de propriedades dos materiais devem ser respeitadas para atender os critérios normativos relativos a pilares mistos. São elas:

- Esbeltez máxima: conforme limite superior apresentados na Tabela (7).

Tabela 7 – Valores limites de esbelteza para seções tubulares preenchidas com concreto.

Descrição	Elemento	Esforço	λ	λ_p	λ_r	Limite superior
Seções tubulares retangulares preenchidas com concreto.	Mesa e Alma	Força axial	b_i/t_i^a	$2,26 \sqrt{E/f_y}$	$3,00 \sqrt{E/f_y}$	$5,00 \sqrt{E/f_y}$
	Mesa	Momento fletor	b_i/t_i^b	$2,26 \sqrt{E/f_y}$	$3,00 \sqrt{E/f_y}$	$5,00 \sqrt{E/f_y}$
	Alma	Momento fletor	b_i/t_i^c	$3,00 \sqrt{E/f_y}$	$5,70 \sqrt{E/f_y}$	$5,70 \sqrt{E/f_y}$
Seções tubulares circulares preenchidas com concreto.	Parede	Força axial	D/t	$0,15 E/f_y$	$0,19 E/f_y$	$0,31 E/f_y$
	Parede	Momento fletor	D/t	$0,09 E/f_y$	$0,31 E/f_y$	$0,31 E/f_y$

^a b_i é a maior das dimensões entre b_1 e b_2 , e t_i , a espessura correspondente.
^b b_i é a dimensão paralela ao eixo de flexão da seção tubular retangular e t_i , a espessura correspondente.
^c b_i é a dimensão perpendicular ao eixo de flexão da seção tubular retangular e t_i , a espessura correspondente.

Fonte: NBR 8800 (2022 – Projeto de norma)

- Os pilares mistos devem ter dupla simetria e seção transversal constante;
- A área do perfil de aço deve corresponder a, no mínimo, 1% da área total da seção mista;
- O concreto utilizado deve possuir densidade normal;
- O fator de contribuição do aço, igual a

$$\delta = \frac{A_a F_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (33)$$

deve ser menor que 0,9 e maior que 0,1. Se δ for menor que 0,1, o pilar deve ser dimensionado como pilar de concreto de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) e, se δ for superior a 0,9, o pilar deve ser dimensionado como pilar de aço segundo NBR 8800 (ABNT, 2008).

- A esbelteza reduzida do pilar $\lambda_{0,m}$ não pode ser maior que 2,0;
- A relação entre a altura e a largura das seções transversais mistas retangulares deve estar entre 0,2 e 5,0.

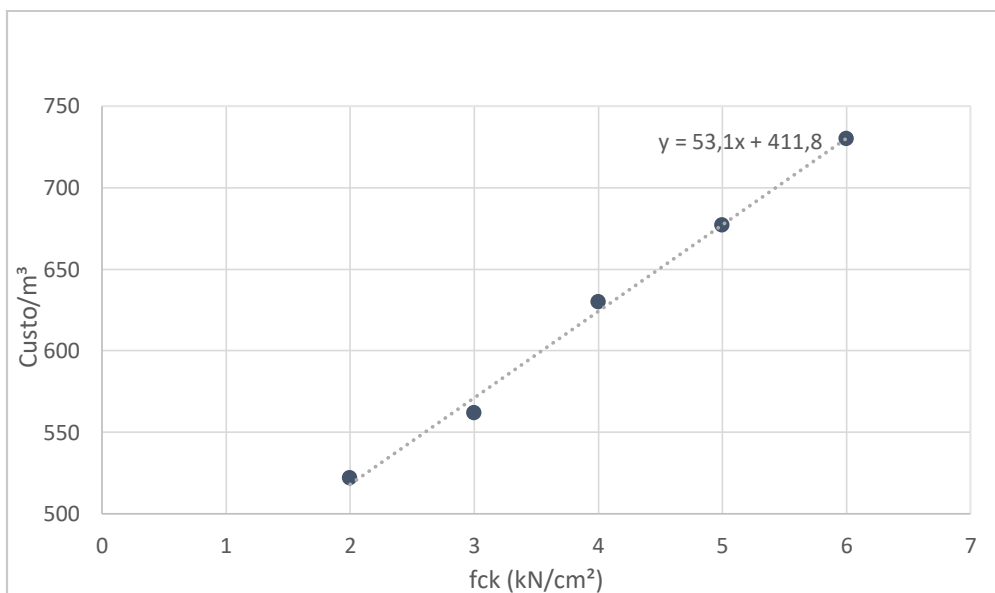
A fim de otimizar as propriedades do pilar em perfil tubular misto ou não, utilizou-se a ferramenta computacional SOLVER. O procedimento visa minimizar o custo linear do pilar.

Como, para pilares não preenchidos, o custo do pilar está diretamente atrelado ao peso da seção, a função SOLVER procura soluções econômicas variando as dimensões da seção,

considerando as limitações impostas pelas normas pela NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2022) e obtendo assim a menor área de aço possível.

Para os pilares mistos, o valor a ser minimizado também é o custo. Para a minimização do preço atribuído ao concreto, foram considerados preços médios para os concretos da grande Vitória, obtidos por meio de consulta às concreteiras locais, de acordo com a resistência à compressão (f_{ck}) utilizada. Desta forma, foi possível estabelecer uma relação direta entre o f_{ck} e o preço médio por meio da reta da equação do Gráfico 1.

Gráfico 1 – Custo do concreto (R\$/m³) x Fck (kN/cm²)



Fonte: Próprios autores

Assim, otimizando o f_{ck} , tem-se um custo mínimo para o concreto. Já o aço será minimizado por meio da variação das dimensões da seção, de modo a sempre considerar as limitações de aplicabilidade normativas. O preço unitário considerado para o perfil tubular de aço com costura foi de R\$7,90, calculado com base nos valores médios de mercado em junho de 2023.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Exemplos de validação

Para validação do programa computacional implementado, foram resolvidos manualmente exemplos numéricos, cujos resultados foram confrontados com os resultados obtidos pela ferramenta computacional, ver Tabelas 8, 9, 11 e 12.

O primeiro exemplo usado para validação considera um pilar de perfil de aço tubular circular, figura 3, sujeito à flexo-torção, de comprimento igual a 4m e esforços solicitantes T_{sd} e M_{sd} iguais a 240kN.m e 100kN.m, respectivamente. Já o segundo exemplo refere-se a um pilar de aço de seção tubular retangular, de comprimento igual a 4m, sujeito à flexo-compressão e submetidos a esforços solicitantes N_{sd} e M_{sd} iguais a 296,5kN e 70,9kN.m, respectivamente.

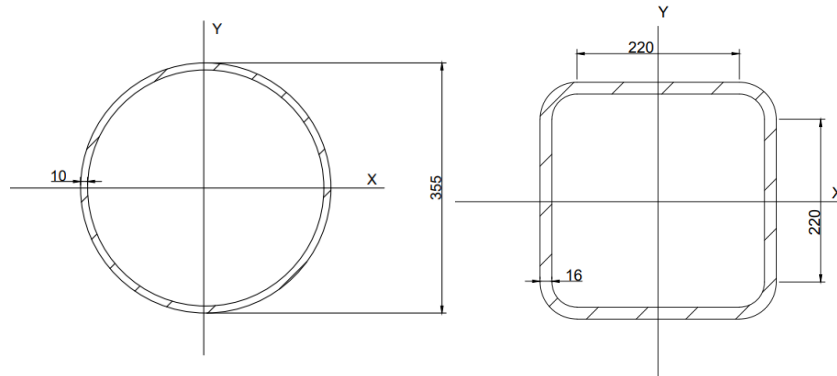


Figura 3 – Exemplos de validação - pilar de aço tubular circular e retangular (medidas em milímetros)

Fonte: produção dos próprios autores.

Tabela 8 – Análise comparativa pilar tubular circular

Pilar tubular circular				
VARIÁVEL	VALOR		Unidade	Diferença
	Programa	Exercício		
RESISTÊNCIA À FLEXÃO (NBR 8800:2008) - FLP				
M_{Rk}	358,42	358,5	kN.m	0,02%
M_{Rd}	325,83	325,91	kN.m	0,02%
RESISTÊNCIA À TORÇÃO				
T_{Rk}	32848,48	32850	kN.cm	0,00%
T_{Rd}	298,62	298,64	kN.m	0,01%
INTERAÇÃO ENTRE ESFORÇOS				
N_{sd}/N_{Rd}	0,0	0	--	0,00%
M_{sd}/M_{Rd}	0,3	0,3	--	-0,02%
T_{sd}/T_{Rd}	0,8	0,8	--	-0,01%

Fonte: produção dos próprios autores.

Tabela 9 - Análise comparativa pilar tubular retangular

Pilar tubular retangular				
VARIÁVEL	VALOR		Unidade	Diferença
	Programa	Exercício		
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR 16239:2013)				
N_e	9634,36	9638	kN	0,04%
λ	0,66	0,68	--	3,07%
χ	0,94	0,93	--	-0,85%
$N_{c,Rd}$	3568,40	3817	kN	6,51%
RESISTÊNCIA À FLEXÃO (NBR 8800:2008) - FLM				
M_{Rk}	30820,26	30835	kN.cm	0,05%
M_{Rd}	280,18	280,32	kN.m	0,05%
INTERAÇÃO ENTRE ESFORÇOS				
N_{Sd}/N_{Rd}	0,08	0,08	--	-6,97%
M_{Sd}/M_{Rd}	0,25	0,25	--	-0,05%

Fonte: produção dos próprios autores.

O exemplo subsequente verifica os esforços de flexo-compressão de um pilar misto com seção tubular circular, de comprimento igual a 4m e esforços solicitantes N_{Sd} e M_{Sd} iguais a 5869kN e 220,7kN.m, respectivamente e outro pilar com seção tubular retangular como apresentado na figura 4, de comprimento igual a 4m e esforços solicitantes N_{Sd} e M_{Sd} iguais a 1300kN e 54kN.m, respectivamente

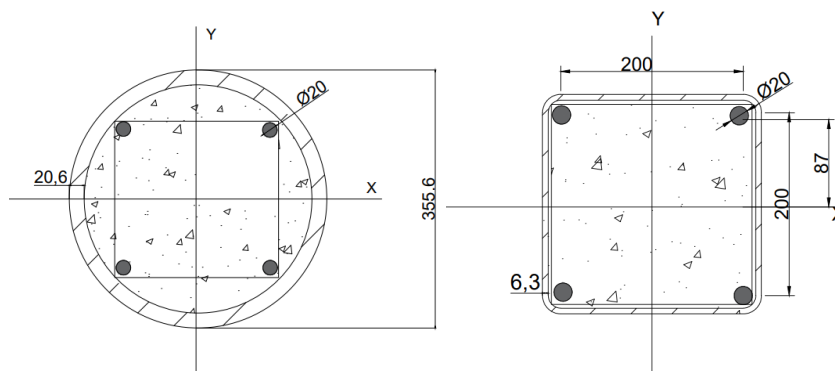


Figura 4 - Exemplo de validação pilar tubular circular e retangular preenchidos

Fonte: produção dos próprios autores.

Tabela 10 - Análise comparativa pilar misto tubular circular

Pilar tubular circular misto				
VARIÁVEL	VALOR		Unidade	Diferença
	Programa	Exercício		
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR 8800:2022)				
N_{Rd}	9092,05	9091,86	kN	-0,002%
RESISTÊNCIA A MOMENTO FLETOR (NBR 8800:2022)				
M_{Rd}	83739,67	83738,56	kN.cm	-0,001%
RESISTÊNCIA À FLEXO - COMPRESSÃO (NBR 8800:2022) - MODELO DE CÁLCULO I				
<i>Esforços combinados</i>	0,65	0,65	--	0,233%
RESISTÊNCIA À FLEXO - COMPRESSÃO (NBR 8800:2022) - MODELO DE CÁLCULO II				
<i>Esforços combinados</i>	1,30	1,30	--	-0,577%
RESISTÊNCIA À FLEXO - COMPRESSÃO (NBR 8800:2022) - MODELO DE CÁLCULO III				
<i>Esforços combinados</i>	0,65	0,65	--	0,000%

Fonte: produção dos próprios autores.

Para a análise dos pilares mistos formados por perfis tubulares retangulares analisou-se a resistência à compressão e à flexão para os três modelos de cálculo, como é possível inferir na tabela (11).

Tabela 11 – Análise comparativa pilar misto tubular retangular

Pilar tubular retangular misto				
VARIÁVEL	VALOR		Unidade	Diferença
	Programa	Exercício		
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR 8800:2022)				
N_{Rd}	2375,89	2377,00	kN	0,05%
RESISTÊNCIA A MOMENTO FLETOR (NBR 8800:2022)				
M_{Rd}	138,14	138,13	kN.m	-0,01%
RESISTÊNCIA À FLEXO - COMPRESSÃO (NBR 8800:2022) - MODELO DE CÁLCULO I				
<i>Esforços combinados</i>	0,99	1	--	0,59%
RESISTÊNCIA À FLEXO - COMPRESSÃO (NBR 8800:2022) - MODELO DE CÁLCULO II				
<i>Esforços combinados</i>	1,02	1,00	--	-2,43%

RESISTÊNCIA À FLEXO - COMPRESSÃO (NBR 8800:2022) - MODELO DE CÁLCULO III				
<i>Esforços combinados</i>	1,01	1,01	--	0,33%

Fonte: produção dos próprios autores.

A partir dos dados das tabelas foi possível encontrar uma diferença média entre o programa e os exemplos de validação em módulo de 0,88%. Este valor é importante para validação do dimensionamento executado pela planilha, averiguação da facilidade e eficácia da ferramenta computacional para o dia a dia de um projetista.

4.2. Otimização

Para a otimização dos pilares de perfil tubular circular e retangular, a função SOLVER encontrou as soluções exposta nas tabelas 12 e 13, respectivamente, considerando a necessidade de uma área mínima e as restrições normativas.

Tabela 12 – Otimização do pilar de seção tubular circular

ELEMENTO	ORIGINAL	OTIMIZADO	UNIDADE
Diâmetro	355,00	339,70	mm
Espessura	10,00	8,74	mm
Área da seção	108,38	90,91	cm ²
Custo	672,12	563,78	R\$/m

Fonte: produção dos próprios autores.

Tabela 13 - Otimização do pilar de seção tubular retangular

ELEMENTO	ORIGINAL	OTIMIZADO	UNIDADE
Altura	220,00	145,73	mm
Largura	220,00	120,21	mm
Espessura	16,00	16,00	mm
Área da seção	119,58	63,88	cm ²
Custo	741,58	396,15	R\$/m

Fonte: produção dos próprios autores.

Mediante os resultados das tabelas 12 e 13 é possível perceber que a otimização da seção de aço resulta em uma diferença significativa, que diminui consideravelmente o custo do pilar, sendo que para o pilar circular a redução foi de 16% e para pilar retangular foi de 47%. Contudo, é pertinente salientar que os pilares analisados nos exemplos de validação estão subdimensionados e, portanto, possuem uma “folga” inicial entre os esforços resistentes e os solicitantes. Ademais, é pertinente ressaltar que o resultado otimizado é obtido mediante as limitações impostas pela NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2008), como exposto nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 e 15 – Restrições impostas à ferramenta SOLVER para otimização dos pilares com perfil tubular circular e retangular

RESTRITÕES – SEÇÃO CIRCULAR			
VARIÁVEL	CONDIÇÃO	LIMITE	UNIDADE
D	\geq	15,9	mm
D	\leq	339,7	mm
t	\geq	3,0	mm
t	\leq	10,0	mm
t/D	\leq	10%	--
KL/r	\leq	200,0	--
D/t	\leq	300,0	--
N_{Sd}/N_{Rd}	\leq	1,0	--
M_{Sd}/M_{Rd}	\leq	1,0	--
T_{Sd}/T_{Rd}	\leq	1,0	--

RESTRITÕES – SEÇÃO RETANGULAR			
VARIÁVEL	CONDIÇÃO	LIMITE	UNIDADE
b	\leq	250,0	mm
h	\leq	350,0	mm
t	\leq	37,5	mm
$\lambda_{máx}$	\leq	200,0	--
λ	\leq	33,5	--
N_{Sd}/N_{Rd}	\leq	1,0	--
M_{Sd}/M_{Rd}	\leq	1,0	--
T_{Sd}/T_{Rd}	\leq	1,0	--

Fonte: produção dos próprios autores.

Para a otimização dos pilares mistos de perfil tubular circular e retangular, a função SOLVER encontrou as soluções exposta nas tabelas 16 e 17, respectivamente, considerando a necessidade de um custo mínimo, que é obtido variando a área de aço, concreto e fck , de modo a considerar as limitações impostas.

Tabela 16 – Otimização do pilar misto de seção tubular circular

ELEMENTO	ORIGINAL	OTIMIZADO	UNIDADE
Diâmetro	355,60	339,70	mm
Espessura	20,60	9,48	mm
Área de aço	216,80	98,35	cm ²
fck	4,00	5,00	kN/cm ²
Custo	2430,32	661,68	R\$/m

Fonte: produção dos próprios autores.

Tabela 17 - Otimização do pilar misto de seção tubular retangular

ELEMENTO	ORIGINAL	OTIMIZADO	UNIDADE
Altura	200,00	225,79	mm
Largura	200,00	236,96	mm
Espessura	6,30	1,52	mm
Área de aço	47,79	13,93	cm ²
fck	4,00	5,00	kN/cm ²
Custo	317,51	120,81	R\$/m

Fonte: produção dos próprios autores.

As tabelas 16 e 17 possibilitam uma análise comparativa entre um elemento otimizado e um elemento não otimizado por meio da discrepância observada entre os elementos. Para um pilar misto de seção tubular circular o custo reduziu em aproximadamente 63%, enquanto para o pilar de seção retangular a redução foi de aproximadamente 62%. A função do custo possui como variáveis a área de aço, concreto, fck, o custo do concreto e do aço e salienta-se que, assim como os exemplos de validação para os pilares de aço, estes exemplos analisados estão subdimensionados.

As restrições impostas para a ferramenta SOLVER provêm da NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2008) e o catálogo da Tuper (2019) como exposto nas tabelas 18 e 19.

Tabela 18 e 19 – Restrições impostas à ferramenta SOLVER para otimização dos pilares mistos com perfil tubular circular e retangular

RESTRITÕES – SEÇÃO CIRCULAR				
VARIÁVEL	VALOR	CONDIÇÃO	LIMITE	UNIDADE
δ	0,52	\leq	0,90	--
δ	0,52	\geq	0,20	--
Aa	98,35	\geq	8,75	cm ²
f_y	35,00	\geq	35,00	kN/cm ²
f_y	35,00	\leq	45,00	kN/cm ²
f_{ck}	5,00	\geq	2,00	kN/cm ²
f_{ck}	5,00	\leq	5,00	kN/cm ²
N_{Sd}/N_{Rd}	1,00	\leq	1,00	--
<i>Esforços combinados</i>	1,00	\leq	1,00	--
D_{ext}	339,70	\geq	15,9	mm
D_{ext}	339,70	\leq	339,7	mm
t	9,48	\geq	0,8	mm
t	9,48	\leq	16,0	mm

RESTRITÕES			
VARIÁVEL	CONDIÇÃO	LIMITE	UNIDADE
δ	\leq	0,9	--
δ	\geq	0,2	--
Aa	\geq	3,3	cm ²
$b1/b2$	\leq	5,0	--
$b1/b2$	\geq	0,2	--
f_{ck}	\geq	2,0	kN/cm ²
f_{ck}	\leq	5,0	kN/cm ²
f_y	\geq	35,0	kN/cm ²
f_y	\leq	45,0	kN/cm ²
N_{Sd}/N_{Rd}	\leq	1	--
<i>Esforços combinados</i>	\leq	1	--
$b1$	\leq	300,0	mm
$b2$	\leq	500,0	mm
t	\leq	37,5	mm

Fonte: produção dos próprios autores.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível implementar uma ferramenta computacional que dimensiona pilares formados por perfis de aço tubular com costura, de modo a avaliar sua eficiência, que apresentou um desvio de 0,89% nos exemplos de validação. Mediante as vantagens que os perfis tubulares dispõem e a aplicabilidade da ferramenta, o dimensionamento se torna mais eficiente e acessível para os projetistas que optam por usá-los, uma vez que apenas são inseridos os dados de entrada e o perfil é analisado quanto aos estados limites últimos.

Ademais, para pilares mistos o dimensionamento é possível verificar para três modelos de cálculos, dispostos pela NBR 8800 (ABNT, 2022), que consideram diversos aspectos e possuem diferentes graus de refinamento.

O programa computacional também possui em seu escopo a otimização dos custos do elemento estrutural. Para as situações apresentadas reduziram em média 33% dos custos para pilares de aço e 62,5% para pilares mistos preenchidos de concreto.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Espírito Santo e a empresa ArcelorMittal pelo apoio financeiro fornecido durante o desenvolvimento desse trabalho. A primeira autora agradece ao CNPq pela sua bolsa nº 139312/ 2022-6, assim como a quarta autora agradece ao CNPq pela sua bolsa de produtividade nº 309741/2020-3.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 8261: **Tubos de aço-carbono, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais — Requisitos**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2019.
- ABNT, NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2008.
- ABNT, NBR 8800 (Projeto de revisão): **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2022.
- ABNT NBR 16239: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas técnicas, 2013.
- ARAÚJO, C. J. R. V. **Estudo Experimental do Efeito do Fogo em Pilares Mistos Curtos de Aço e Concreto**. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 2008.
- ARAÚJO, A. H. M., REQUENA, J. A. V., MINCHILLO, D. G. V., THOMAZ, S. A. M. **Projeto, Fabricação e Montagem de Estruturas com Perfis Tubulares**. I Congresso Internacional da Construção Metálica - I CICOM. São Paulo, 2016.
- BRANCO, R. H. F. **Automação de Projetos de Estruturas Planas Trelaçadas Tubulares de Aço com Estudo Comparativo entre Trelças Constituídas por Barras com Ligações Rotuladas e Rígidas**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2006.
- CANALES, Ana Flávia. **Estudo do dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos de perfis tubulares preenchidos com concreto de acordo com a ABNT NBR 16239: 2013**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- COSTA, R. M. X. **O Uso de Perfis Tubulares Metálicos em Estruturas de Edifícios e Sua Interface com o Sistema de Fechamento Vertical Externo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.
- MEYER, Karl Fritz. **Estruturas metálicas: construções com tubos**. KM Engenharia. Belo Horizonte, 2002.
- SAMARRA, F. A. **Estudo Numérico-Experimental de Trelças Tubulares Planas para Coberturas Padronizadas para Grandes Vãos**. Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 2007.
- TUPER. **Tabela técnica de produtos**. São Bento do Sul - SC, 2019.