

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE AÇO E CONCRETO ATRAVÉS DO EN1994-1-1:2004

Jéssica Salomão Lourenção

Élcio Cassimiro Alves

jessica_lourencao@hotmail.com

elcio.calves1@gmail.com

Affiliation

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, Av Fernando Ferrari, 575, Cep 29075-410 – Vitória – ES - Brasil.

Abstract. The objective of this work is to present the formulation of the optimization problem and applications of filled composite columns of steel and concrete with and without reinforcement according to EN 1994-1-1:2004. The solution of the optimization problem was obtained through the Genetic Algorithm Method. A software was developed on the Matlab platform using the tool guide. Numerical examples are presented, and the results found by the elaborated software demonstrated that the Genetic Algorithm Method obtained relatively lower costs due to the use of hollow section catalogs.

Keywords: Filled Composite Columns, Optimization, Hollow Sections

1 Introdução

Os perfis tubulares de aço quando preenchidos com concreto são chamados de pilares mistos preenchidos. Devido a associação do perfil de aço em conjunto com o concreto, eles passam a ser muito utilizados na construção civil por apresentarem grande resistência aos esforços solicitantes de maneira gera, proteção contra o fogo e corrosão, dispensa do uso de formas e entre outras vantagens.

Os pilares mistos preenchidos apresentam três tipos de geometrias de seções transversais, retangular, quadrada e circular, as quais podem possuir ou não armaduras longitudinais, além de um perfil de aço incorporado no seu interior, que satisfazem cada situação de esforço solicitante. Dessa forma, com a vasta gama de geometrias de seções transversais disponíveis, a dificuldade passa a ser definir qual é a melhor geometria, a mais econômica, em virtude do carregamento existente, ou seja, a geometria ótima. As variáveis que interferem diretamente no custo final dos pilares mistos preenchidos são o preço do concreto, em função da resistência característica à compressão adotada, o custo do perfil de aço e o custo do aço das armaduras longitudinais.

Para tal, a obtenção da seção ótima pode ser feita por meio de técnicas de otimização inseridas em programas computacionais que realizam cálculos iterativos, que atualizam os valores das variáveis de projeto até encontrar o custo mínimo para o pilar misto preenchido. Neste cálculo, não podem ser excluídos os critérios e exigências definidos pelas normas de dimensionamento a fim de que seja definida uma estrutura segura. O objetivo deste trabalho é apresentar a formulação do problema de otimização envolvendo pilares mistos de aço preenchidos com concreto segundo a prescrição do EN 1994-1-1 [4] - Projeto de estruturas mistas aço-betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, usando a técnica do Algoritmo Genético. Para isto um programa com interface gráfica iterativa foi desenvolvido no Matlab utilizando a ferramenta guide. O Algoritmo Genético usado para a solução do problema foi o que se encontra no toolbox de otimização do Matlab.

2 Estado da arte

Ao longo das últimas décadas, estudos teóricos e experimentais vêm sendo apresentados para pilares mistos preenchidos de aço e concreto. Dentre eles pode-se destacar:

De Nardin [2] realizou experimentos sobre o comportamento de pilares mistos axialmente comprimidos que visavam avaliar parâmetros como influência da forma da seção transversal e da espessura do perfil tubular. Foram analisadas seções quadradas, circulares e retangulares, preenchidas com concreto. A capacidade resistente resultou em valores muito próximos dos experimentais, mesmo não sendo considerado o efeito de confinamento. Por fim, observou-se que o efeito do confinamento contribuiu de forma decisiva na melhoria do comportamento dos materiais, entretanto seus efeitos não foram significativos no aumento da capacidade resistente da seção mista.

O trabalho apresentado por De Nardin [3] abordou o estudo de pilares preenchidos flexo-comprimidos, no qual foram realizados experimentos com 13 pilares preenchidos, modelos físicos e numéricos, cujos resultados foram comparados com aqueles provenientes de uma simulação numérica via programa CFT. No programa, foram analisados a influência de parâmetros como a resistência dos materiais, excentricidade da força axial, eixo da flexão e relação lado/espessura na capacidade resistente do pilar preenchido. O programa apresentou excelentes correlações com os resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores e com aqueles obtidos em seu trabalho.

Oliveira [7] estudou o comportamento de pilares mistos preenchidos de seção circular por meio de uma análise teórica-experimental, com o propósito de avaliar a influência da resistência à compressão do concreto, a esbeltez do pilar, espessura do tubo de aço e a forma de introdução do carregamento. Para tal, realizaram-se ensaios experimentais em 64 pilares mistos preenchidos, submetidos somente à força de compressão centrada, para posterior comparação com os resultados normativos. Os resultados encontrados mostraram que o modelo numérico criado representou adequadamente o comportamento dos pilares preenchidos, porém os valores de força última foram inferiores aos experimentais.

Chaves [1] desenvolveu um procedimento computacional para a determinação da carga última em pilares de concreto, aço e pilares mistos totalmente revestidos para posterior comparação com exemplos

existentes na literatura. O procedimento computacional apresentou bons resultados para a determinação da força normal resistente de pilares de concreto e aço e pilares mistos com seção transversal genérica e qualquer proporção entre aço e concreto.

Papavasileiou, Nicolaou e Charmpis [8] investigaram o custo benefício de pilares mistos revestidos e pilares mistos preenchidos como alternativa para o uso de pilares de aço de seção transversal I. Desse modo, uma comparação entre os três tipos de pilares foi feita por meio de uma otimização estrutural, tendo como objetivo a minimização do custo dos pilares em função das restrições de segurança impostas pelo Eurocódigo 3 e 4. A otimização apresentou que substituir pilares de aço por pilares mistos é mais vantajoso quando a demanda de pilares estruturais na edificação é alta. Além disso, os autores destacaram que a resistência contra o fogo é amplificada com o uso de pilares mistos de concreto e aço. Gomes [6] realizou uma análise numérica, no programa comercial Ansys 14.0, de pilares mistos preenchidos com concreto de resistência normal e concreto de alta resistência, com o objetivo de avaliar a influência de parâmetros geométricos e mecânicos. Foram analisados pilares sujeitos à compressão pura e a flexo-compressão, e os seus resultados de resistências foram confrontados com os prescritos pela norma NBR 8800. Após a análise dos resultados, concluiu-se que os valores das resistências normativas são bem próximos dos resultados numéricos encontrados.

Embora tenha tido vários estudos ao longo dos últimos anos para pilares mistos, poucos trabalhos foram encontrados envolvendo o problema de otimização. Como apresentado anteriormente, existem alguns estudos a respeito de dimensionamento de pilares mistos, porém não foram encontrados estudos que retratassem o dimensionamento otimizado de pilares mistos preenchidos segundo as prescrições do EN 1994-1-1 [4].

3 Formulação do Problema

O dimensionamento de um pilar misto preenchido de aço e concreto se baseia na determinação dos esforços resistentes afim de compará-los com os esforços solicitantes aos quais a seção está submetida. Assim, o problema de otimização se baseia em encontrar a solução ótima que, neste caso, minimize a função objetivo ou função aptidão que é o custo total do pilar. Ela engloba o custo do concreto, do perfil de aço e das barras de aço da armadura, a qual deseja-se minimizar:

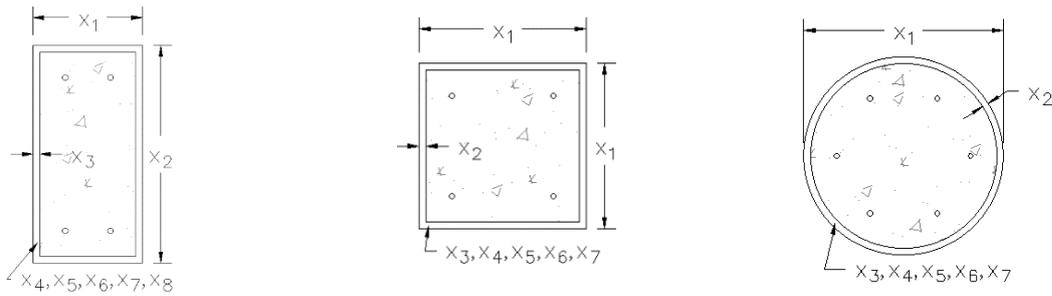
$$f_{(min)} = C_c A_c L + C_a A_a L \rho_a + C_s A_s L \rho_s \quad (1)$$

onde: C_c – custo do concreto (R\$/m³); A_c – área da seção transversal do concreto (m²); C_a – custo do perfil (R\$/kg); A_a – área do perfil de aço (m²); ρ_a – massa específica do perfil de aço (kg/m³); C_s – custo das armaduras de aço (R\$/kg); A_s – área das armaduras de aço (m²); ρ_s – massa específica das armaduras de aço (kg/m³); L – comprimento do pilar estudado (m).

3.1 Método do algoritmo genético

Para determinar o mínimo de uma função aptidão, Equação (1), empregando o Método do Algoritmo Genético, utilizou-se o Optimization Toolbox™ do Matlab 2016a por meio da função *ga*. As variáveis de projeto são as demonstradas no tópico 3.1.1. Para que se atinja o mínimo, as funções de restrições devem ser atendidas, as quais são recomendações e exigências do EN 1994-1-1 [4] e que serão demonstradas no tópico 3.1.2. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** No entanto, a solução ótima deve ser encontrada dentro do espaço de busca ou região viável estabelecido no tópico 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Variáveis de projeto

No programa computacional desenvolvido, existe somente uma variável de projeto, a qual está associada a um conjunto de parâmetros que caracterizam as dimensões e propriedades do perfil tubular e que são variáveis dependentes. Assim, os conjuntos de parâmetros que correspondem a variável de projeto são as abaixo e estão realçados na Figura 1.



Base ($x_1 = b$);
 Altura ($x_2 = h$);
 Espessura ($x_3 = t$);
 Área de aço ($x_4 = A_a$);
 Momento de inércia ($x_5 = I_{ax}$ e $x_6 = I_{ay}$);
 Momento plástico ($x_7 = Z_{ax}$ e $x_8 = Z_{ay}$).

Base e altura ($x_1 = b = h$);
 Espessura ($x_2 = t$);
 Área de aço ($x_3 = A_a$);
 Momento de inércia ($x_4 = I_{ax}$ e $x_5 = I_{ay}$);
 Momento plástico ($x_6 = Z_{ax}$ e $x_7 = Z_{ay}$).

Diâmetro ($x_1 = b = h$);
 Espessura ($x_2 = t$);
 Área de aço ($x_3 = A_a$);
 Momento de inércia ($x_4 = I_{ax}$ e $x_5 = I_{ay}$);
 Momento plástico ($x_6 = Z_{ax}$ e $x_7 = Z_{ay}$).

Figura 1 - Conjunto de parâmetros do perfil de aço que compõem a variável de projeto

3.1.2 Funções de restrição

- Resistências devem ser superiores as solicitações

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

$$M_{x,Rd} \geq M_{x,Sd} \quad (3)$$

$$M_{y,Rd} \geq M_{y,Sd} \quad (4)$$

- Resistência aos esforços combinados deve ser superior às solicitações combinadas

$$\frac{M_{x,Ed}}{\mu_x M_{pl,x,Rd}} \leq \alpha_M \quad (5)$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_y M_{pl,y,Rd}} \leq \alpha_M \quad (6)$$

$$\frac{M_{x,Ed}}{\mu_x M_{pl,x,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\mu_y M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0 \quad (7)$$

- Limite de aplicabilidade para seção tubular:

(a) Retangular

(b) Quadrada

(c) Circular

$$\frac{x_1}{x_3} \leq 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \text{ e } \frac{x_2}{x_3} \leq 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \frac{x_1}{x_2} \leq 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \frac{x_1}{x_2} \leq 90 \frac{235}{f_y} \quad (8)$$

- Número de barras (n_B) na:

- Seção tubular retangular e quadrada

$$n_B \geq 4 \quad (9)$$

- Seção tubular circular

$$n_B \geq 4 \quad (10)$$

- Taxas de armadura mínima e máxima

$$\text{máx} \left(0,003A_c; 0,10 \frac{N_{sd}}{f_{sd}} \right) \leq A_s \leq 0,06A_c \quad (11)$$

- Espaçamento mínimo e máximo em cada direção para:

- Seção tubular retangular

$$s_x = \frac{x_1 - 2x_3 - 2d' - n_{Bx}\phi_b}{n_{Bx} - 1} \quad (12)$$

$$\text{máx}(2 \text{ cm}; \phi_b) \leq s_x \leq 40 \text{ cm} \quad (13)$$

$$s_y = \frac{x_2 - 2x_3 - 2d' - n_{By}\phi_b}{n_{By} - 1} \quad (14)$$

$$\text{máx}(2 \text{ cm}; \phi_b) \leq s_y \leq 40 \text{ cm} \quad (15)$$

- Seção tubular quadrada

$$s_x = \frac{x_1 - 2x_2 - 2d' - n_{Bx}\phi_b}{n_{Bx} - 1} \quad (16)$$

$$\text{máx}(2 \text{ cm}; \phi_b) \leq s_x \leq 40 \text{ cm} \quad (17)$$

$$s_y = \frac{x_1 - 2x_2 - 2d' - n_{By}\phi_b}{n_{By} - 1} \quad (18)$$

$$\text{máx}(2 \text{ cm}; \phi_b) \leq s_y \leq 40 \text{ cm} \quad (19)$$

- Seção tubular circular

$$s = \frac{2\pi \left(\frac{x_1}{2} - x_2 - d' - \frac{\phi_b}{2} \right) - n_B\phi_b}{n_B} \quad (20)$$

$$\text{máx}(2 \text{ cm}; \phi_b) \leq s \leq 40 \text{ cm} \quad (21)$$

3.1.3 Espaço de busca

O espaço de busca para o Método do Algoritmo Genético é determinado por meio de catálogos de perfis tubulares estruturais. Além disso, para este problema de variável discreta, foi necessário realizar a codificação das variáveis, como também da população total. Neste caso, cada posição de um perfil de seção tubular é transformada em um binário com n células, ou seja, transforma-se o vetor X' no X para que possa ser determinado o custo total do pilar misto preenchido de aço e concreto em estudo. Ressalta-se que dentre os vários perfis tubulares padronizados, somente um será a solução otimizada para cada problema. A solução do problema foi obtida através do programa desenvolvido no Matlab com o uso da ferramenta guide que a tela pode observada na Figura 2.

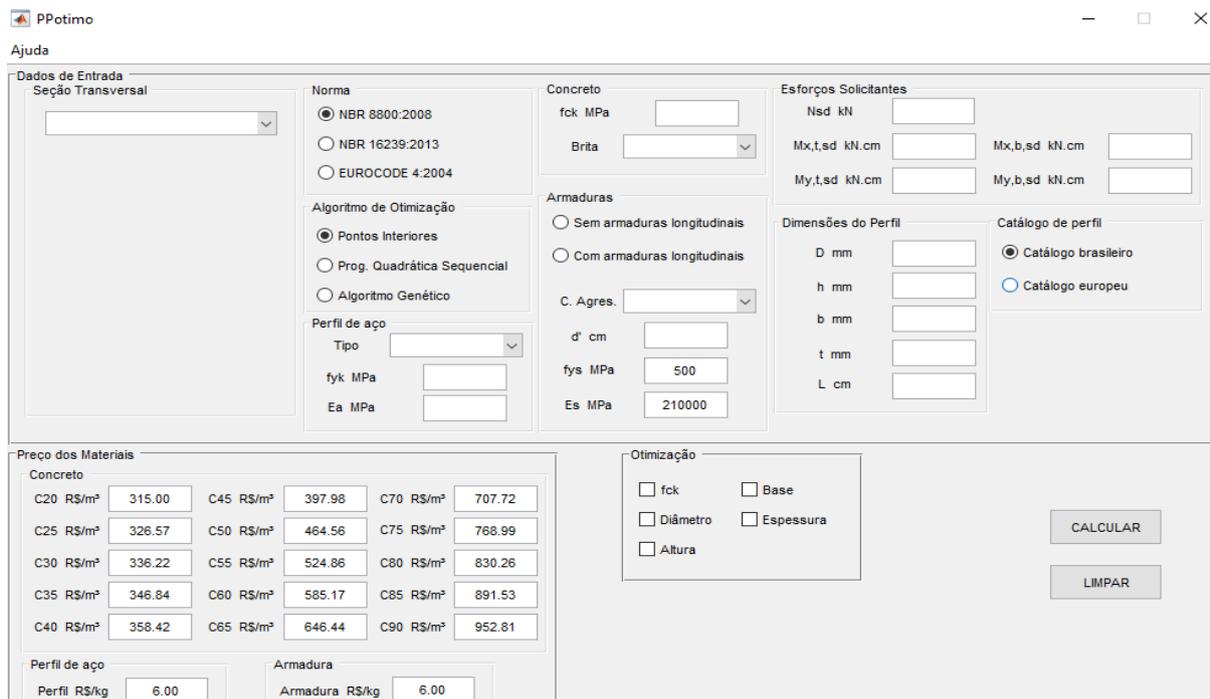


Figura 2 – Interface do Programa

4 Resultados e discussões

4.1 Exemplo 1 – Pilar misto preenchido circular

O primeiro exemplo é um pilar misto preenchido composto por perfil tubular circular submetido a uma compressão axial de valor $N_{sd} = 2000$ kN e a flexão no eixo x de valor $M_{x,sd} = 13200$ kN.cm. Trata-se inicialmente de um perfil circular com diâmetro de 323,80 mm e espessura de 12,5mm, com resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, resistência ao escoamento do aço (f_{yk}) de 250 MPa e comprimento de 400 cm. A figura 3 apresenta a tela com os dados de entrada.

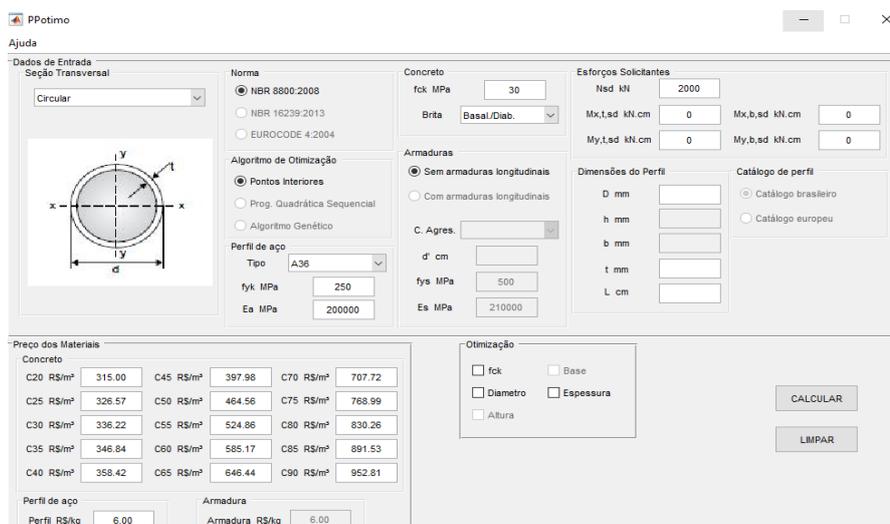


Figura 3 – Dados de entrada do exemplo1.

O software elaborado possibilita realizar a otimização com a inclusão de armaduras longitudinais, podendo também optar por buscar a solução ótima, neste caso o perfil tubular, dentro de um catálogo brasileiro ou de um catálogo europeu. Assim, para efeito de comparação foi realizado uma otimização, a qual inclui o uso de armaduras longitudinais com os dois tipos de catálogos. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados encontrados com e sem a utilização de armaduras longitudinais.

Tabela 1 – Resultados da otimização do pilar misto preenchido circular

| MÉT. | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------------|---------|-----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------|------|-------------------|--------------------------|---------|----------|-----------|------|----|
| | D mm | t mm | f_{ck} MPa | N_{Rd} kN | $M_{x,Rd}$ kN·cm | $M_{y,Rd}$ kN·cm | IA | n | \emptyset mm | A_s cm ² | s cm | δ | CT R\$ | R | |
| S. ARM | B | 323,8 | 6,4 | 40 | 3226 | 19319 | 19319 | 0,85 | | | | 0,44 | 1311 | IA | |
| | E | 323,9 | 5,0 | 55 | 3436 | 16041 | 16041 | 0,86 | | | | 0,31 | 1106 | IA | |
| C. ARM | B | 273,0 | 6,4 | 85 | 3346 | 17349 | 17349 | 0,89 | 7 | 12,5 | 8,59 | 6,16 | 0,32 | 1361 | IA |
| | E | 323,9 | 5,0 | 45 | 3285 | 18129 | 18129 | 0,85 | 6 | 10,0 | 4,71 | 10,6 | 0,33 | 1156 | IA |

Os resultados apresentados apresentaram diferentes soluções devido a utilização de catálogos de países diferentes, sendo que os menores custos foram com o uso do catálogo estrutural europeu tanto com a colocação de armaduras longitudinais como sem o uso das mesmas. A restrição ativa que governou a otimização do pilar misto preenchido circular foi o índice de aproveitamento curva de iteração do modelo de cálculo, Figura 2. Ressalta-se ainda que, 50,00% dos resultados apresentaram valores da resistência à compressão do concreto, f_{ck} , acima de 50 MPa, mesmo esses valores da resistência à compressão do concreto possuindo um alto custo, eles indicaram ser a melhor solução.

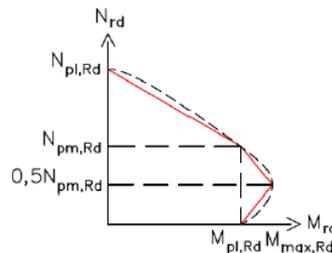


Figura 2 - Diagrama de interação do momento fletor – força normal – Modelo de Cálculo – EN 1994-1-1 [4]

4.2 Exemplo 2 – Pilar misto preenchido retangular

Neste exemplo analisou-se um pilar misto preenchido composto por perfil tubular retangular submetido a uma compressão axial de valor $N_{Sd} = 1500$ kN e a flexão no eixo x de valor $M_{x,Sd} = 13200$ kN.cm e no eixo y de valor $M_{y,Sd} = 7600$ kN.cm. Tratou-se de um perfil retangular com base igual a 180,0 mm, altura de 380,0 mm e espessura de 12,5 mm, possuindo resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) de 40 MPa e resistência ao escoamento do aço (f_{yk}) de 250 MPa. O comprimento do pilar misto preenchido era de 300 cm.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos da otimização usando o Método do Algoritmo Genético para o exemplo com e sem armaduras longitudinais e com os diferentes tipos de catálogos de perfis estruturais. Nela, pode-se perceber que a restrição ativa que governou a otimização do pilar misto preenchido retangular foi o índice de aproveitamento da curva de iteração do modelo de cálculo, Figura 2. Destaca-se que 75,00% dos resultados apresentaram valores da resistência à compressão do concreto, f_{ck} , maiores do que 50 MPa. Além disso, os menores custos foram com o uso do catálogo estrutural brasileiro tanto com a colocação de armaduras longitudinais como sem o uso das mesmas.

Tabela 2 – Resultados da otimização do pilar misto preenchido retangular

| | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|------------|-----|-----|----------|----------|------------|------------|-------|------|-------------|-----------------|-------|-------|----------|------|------|----|
| MÉT. | | b | h | t | f_{ck} | N_{Rd} | $M_{x,Rd}$ | $M_{y,Rd}$ | IA | n | \emptyset | A_s | s_x | s_y | δ | CT | R | |
| | | mm | mm | mm | MPa | kN | kN·cm | kN·cm | | | mm | cm ² | cm | cm | | R\$ | | |
| S. ARM | AG | B | 240 | 280 | 6,4 | 75 | 3820 | 19196 | 16841 | 0,99 | | | | | | 0,38 | 1042 | IA |
| | | E | 250 | 300 | 6,3 | 50 | 3636 | 21518 | 18500 | 0,96 | | | | | | 0,43 | 1046 | IA |
| C. ARM | AG | B | 240 | 280 | 6,4 | 80 | 3096 | 23723 | 21077 | 0,99 | 6 | 10,0 | 4,71 | 12,5 | 7,7 | 0,48 | 1119 | IA |
| | | E | 250 | 300 | 6,3 | 55 | 3134 | 25526 | 22212 | 0,95 | 6 | 10,0 | 4,71 | 13,8 | 8,7 | 0,50 | 1125 | IA |

4.3 Exemplo 3 – Pilar misto preenchido quadrado

O terceiro exemplo é de um pilar misto preenchido composto por perfil tubular quadrado submetido a uma compressão axial de valor $N_{Sd} = 1000$ kN. Tratou-se de um perfil quadrado com lados iguais a 150,0 mm e espessura de 12,5 mm, com resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) foi de 30 MPa e resistência ao escoamento do aço (f_{yk}) de 250 MPa e comprimento de 300 cm.

Os resultados apresentados pelo Método AG apresentaram diferentes soluções devido a utilização de catálogos de países diferentes, Tabela 3. Em relação aos custos, os menores foram com o uso do catálogo estrutural europeu tanto com a colocação de armaduras longitudinais como sem o uso das mesmas. Além disso, a restrição ativa que governou a otimização do pilar misto preenchido quadrado foi a força axial resistente de cálculo para todas as situações rodadas.

Tabela 3 – Resultados da otimização do pilar misto preenchido de perfil tubular quadrado

| | | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|------------|-------|----------|----------|------------|------------|------|-------------|-----------------|------|----------|------|-----|----------|
| MÉT. | | b/h | t | f_{ck} | N_{Rd} | $M_{x,Rd}$ | $M_{y,Rd}$ | n | \emptyset | A_s | s | δ | CT | R | |
| | | mm | mm | MPa | kN | kN·cm | kN·cm | | mm | cm ² | cm | | R\$ | | |
| S. ARM | AG | B | 140,0 | 5,0 | 75 | 1000 | 3861 | 3861 | | | | | 0,47 | 402 | N_{Rd} |
| | | E | 150,0 | 4,0 | 65 | 1017 | 3716 | 3716 | | | | | 0,41 | 363 | N_{Rd} |
| C. ARM | AG | B | 140,0 | 5,0 | 55 | 1004 | 3980 | 3980 | 4 | 10,0 | 3,14 | 2,74 | 0,47 | 434 | N_{Rd} |
| | | E | 150,0 | 4,0 | 50 | 1020 | 3886 | 3886 | 4 | 10,0 | 3,14 | 3,94 | 0,42 | 396 | N_{Rd} |

No mais, 75,00% dos resultados da resistência à compressão do concreto, f_{ck} , encontrados em todos os exemplos gerados apresentaram valores maiores do que 50 MPa, ou seja, mesmo com um alto custo, este valor de resistência à compressão do concreto indicou ser a melhor solução.

5 Conclusões

Este trabalho se dedicou a aprofundar o estudo em torno do dimensionamento ótimo de pilares mistos preenchidos de aço e concreto. Com isso, foi possível a elaboração de um programa computacional com interface gráfica utilizando métodos de otimização como o método do algoritmo genético para otimização discreta.

A utilização de valores de resistência à compressão do concreto, f_{ck} , acima de 50 MPa mostrou-se interessante. Mais de 66% das soluções, dos três exemplos, apresentaram resultados com f_{ck} acima de 50 MPa mesmo possuindo um alto custo. No mais, o espaço de busca definido no programa, utilizando o Método do Algoritmo Genético, permitiu a utilização de catálogos estruturais de países diferentes, um brasileiro e outro europeu, para que fosse possível a obtenção de valores próximos aos utilizados no mercado. Essa alternativa de mudança de catálogos possibilitou que uma mesma solicitação num pilar misto preenchido possuísse diferentes soluções, ou seja, custos diferentes, sendo esperados devido a utilização de perfis tubulares adotados no mercado.

References

- [1] Chaves, Leonardo Eustáquio Antunes. Estudo de pilares de concreto armado e pilares mistos de aço e concreto totalmente revestidos. 2013. 98 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- [2] De Nardin, Silvana. Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência. 1999. 148 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- [3] De Nardin, Silvana. Pilares mistos preenchidos: estudo da flexo-compressão e de ligações viga-pilar. 2003. 323 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- [4] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – EN 1994-1-1: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels. 2004.
- [5] Fernandes, Juliana Ferreira. Pilares mistos: tubos de aço com seções quadradas e retangulares e núcleo de concreto de alta resistência. 1997. 149 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- [6] Gomes, Harlley Davidson. Análise numérica de pilares mistos de aço e concreto tubulares circulares com concreto de alto desempenho. 2015. 158 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- [7] Oliveira, Walter Luiz Andrade de. Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular. 2008. 251 f. Tese (Doutor em Engenharia de Estruturas) – Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [8] Papavasileiou, G. S.; Nicolaou, N.; Charmpis, D. C. In: ECCOMAS THEMATIC CONFERENCE ON COMPUTATIONAL METHODS IN STRUCTURAL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING. 4. 2013. Greece. Comparative assessment of buildings with pure steel or steel-concrete composite columns using structural design optimization. Greece: 4th Ecomas Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2013.