

A: XXXIX-0000

ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS PROTENDIDAS DE AÇO VIA ALGORITMO GENÉTICA E ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRESTRESSED STEEL BEAMS DESIGN VIA GENETIC ALGORITHM AND PARTICLE SWARM ALGORITHM

Sayonara Maria de Moraes Pinheiro (1) Élcio C. Alves (1)(A)

(1) Dr. Prof., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
Endereço para correspondência: elcio.alves@ufes.br; (A) Apresentador

Área temática: Análise Estrutural – Métodos Computacionais

Resumo

Embora o uso de estruturas protendidas sejam amplamente difundidas na construção civil para elementos em concreto, a utilização de protensão em elementos de aço ainda é pouco difundido. O presente trabalho tem por objetivo apresentar a formulação do problema de otimização de vigas protendidas de aço com cabos retos, bem como uma análise comparativa com problemas obtidos na literatura. Como restrições serão adotadas as condições de dimensionamento estabelecidas pela NBR 8800:2008 para perfis duplamente simétricos e monossimétricos. A solução do problema de otimização será dada via Algoritmo Genético e Algoritmo de Enxame de Partículas. Uma análise da eficiência dos dois algoritmos será realizada bem como uma análise dos modos de ruptura preponderantes. Exemplos numéricos obtidos da literatura apontam uma melhoria na solução de até 30% no custo final da viga quando utilizados perfis monossimétricos.

Palavras-chave: Vigas Protendidas de Aço, Otimização, Algoritmo Genético, Algoritmo de Enxame de Partículas.

Abstract

Although the use of prestressed structures is widespread in civil construction for concrete elements, the use of prestressing in steel elements is still not widespread. The present work aims to present the formulation of the optimization problem for prestressed steel beams with straight cables, as well as a comparative analysis with problems obtained in the literature. As restrictions, the design conditions established by NBR 8800:2008 will be adopted for doubly symmetrical and monosymmetrical profiles. The solution of the optimization problem will be given via Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm. An analysis of the efficiency of the two algorithms will be carried out as well as an analysis of the prevailing failure modes. Numerical examples obtained from the literature indicate an improvement in the solution of up to 30% in the final cost of the beam when using monosymmetrical profiles.

Keywords: Prestressed Steel Beam; Optimization; Genetic Algorithm; Particle Swarm Optimization.



1. INTRODUÇÃO

Embora a aplicação de estruturas metálicas seja amplamente difundida no Brasil no mundo, a utilização de vigas protendidas de aço ainda não é. A utilização de técnicas de otimização, em conjunto com a protensão permite fazer a busca por soluções mais efetivas para este tipo de estrutura. Dentre os algoritmos metaheurísticos existentes pode-se dar destaque ao Algoritmo Genético (AG) e o Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO).

Desde que John Holland propagou os conhecimentos da técnica, diversos artigos fizeram uso de tal método para testar a eficiência do uso na construção civil. Kripakaran, Hall e Gupta (2011) implantaram o Algoritmo Genético para prover a otimização necessária para encontrar as soluções ótimas que obtiveram em estruturas metálicas com ligações rígidas, ao passo que era dado inicialmente uma quantidade necessária de ligações rígidas e o programa iria gradualmente decaindo o número necessário para então encontrar o número ideal.

Agrawal, Chandwani e Porwal (2013) utilizaram o Algoritmo Genético para obter soluções em relação a engenharia estrutural, onde objetivaram encontrar a solução ótima seguindo os preceitos da norma, com reduções entre 8,5% - 10,5% do peso efetivo, oferecendo tanto uma economia em material e custos, quanto um aumento na segurança do produto dimensionado.

Alves e Pietralonga (2020) concluíram na análise dos modos de colapso no dimensionamento ótimo de vigas alveolares que o algoritmo genético apresentou resultados satisfatórios, uma vez que os resultados gerados pelo programa utilizado foram valores próximos às restrições impostas, indicando que poderia gerar soluções reais que com custo financeiro consideravelmente menor ao que é empregado no mercado.

Skoglund, Leander e Karoumi (2020) fizeram uso do método AG com o objetivo de otimizar custos, quantidade de material gasto em obra e emissão de CO₂ seguindo os parâmetros impostos por norma em vigas, onde foram utilizados diferentes tipos de aço para a mesma seção da viga, de modo a verificar a viabilidade de utilização de aços de alta resistência. O estudo obteve uma solução ótima que resultou numa substancial redução de custos, material e impacto ambiental ao empregar o aço de alta resistência.

Alves e Ramos (2020) comprovaram a eficiência do uso de Algoritmo Genético em seu estudo sobre vigas mistas alveolares de concreto e aço, uma vez que obtiveram melhorias em relação ao peso estrutural em todos os cenários quando comparados com referências anteriores da literatura.

Mageveske *et al.* (2021) aplicaram o AG para obter a solução de problemas de vigas protendidas de aço para perfis duplamente simétricos. Em comparação com a literatura os autores apontam ganhos de até 20% na redução do custo final.

A teoria de Otimização por Enxame de Partícula (do inglês PSO – Particle Swarm Optimization) apresentada na década de 90 por Kennedy e Eberhart, foi inspirada na análise comportamental dos pássaros que estão à procura de alimento ou local para abrigar um ninho. Quando ocorre a procura, cada pássaro (indivíduo) pode ter um ganho com as experiências dos membros de um grupo (enxame). Em suma, o PSO é uma técnica computacional evolutiva que se baseia num comportamento social que através de uma gama de possíveis soluções é possível encontrar uma solução ótima.

Barbosa e Lemonge (2008) propuseram o Método de Penalização Adaptativa (MPA) para avaliar problemas com restrições.

Kaveh e Shohoki (2015) em seu estudo com algoritmo de otimização híbrida, utilizando uma mescla de CBO (Colliding Bodies Optimization) com PSO para encontrar o dimensionamento



ótimo de vigas casteladas apoiadas lateralmente, obteve resultados favoráveis quando incluiu o PSO junto do CBO, obtendo valores equivalentes ou menores quando utilizou o PSO em 5 dos 6 casos de seções estudadas pelos autores.

David e Stephen (2018) através de seu estudo para obter custos mínimos em problemas envolvendo o dimensionamento de vigas soldadas comparando diversos métodos computacionais, puderam concluir que o PSO cumpre o seu papel de ser uma metodologia simples e eficiente técnica de otimização, como valores de solução ótima precisamente no ideal ou bem próximo do valor ideal.

Nguyen et al. (2020) fizeram uso da técnica computacional PSO para confirmar a possibilidade de uso dela para determinar a capacidade de flambagem de vigas de aço com abertura circular. Os autores constataram que a técnica possui uma boa solução ótima a depender da busca dos intervalos propostos de maneira adequada ao programa. Foi sugerido também que o resultado fosse confirmado por outras técnicas de otimização, como propõe o presente trabalho em comparar duas técnicas diferentes.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise comparativa entre o AG e o PSO aplicados a problemas de otimização de vigas protendidas de aço composta por perfis monossimétricos com cabos retos.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de otimização visa a redução do custo total para vigas de aço soldadas em forma de I duplamente simétricas e monossimétricas a partir da otimização das propriedades geométricas da seção transversal e da quantidade de cabos de protensão a serem utilizados. As variáveis de projeto estão apresentadas na Figura (1)

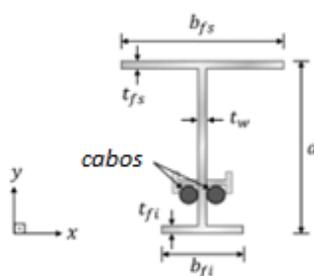


Figura 1. Corte transversal com variáveis usadas no Algoritmo Genético

Em relação as variáveis utilizadas, o número de cabos (n_{cabos}), a altura da seção transversal (d), largura superior (b_{fs}) e inferior (b_{fi}) dos banzos são representadas como variáveis inteiras, ao passo que as espessuras superior (t_{fs}) e inferior (t_{fi}) e a espessura da alma (t_w) são consideradas variáveis contínuas.

2.1 Função Objetivo



A função objetivo deve gerar redução de custos do perfil de aço, dos cabos de protensão e da sua instalação para formas duplamente simétricas ou monossimétricas. A equação 1 representa o modelo utilizado para obter o custo total, considerando as despesas com o volume de aço, número de cabos utilizados para protensão e sua instalação.

$$f(x) = \left(Ct_s A_s + \frac{1000 Ct_t n_{cabos} \mu_t}{9,8} \right) L_{vão} + (n_{cabos} Ct_{ti}) \quad (1)$$

Onde:

Ct_s = custo unitário do tipo de viga de aço (R\$)

A_s = área da seção transversal (m²)

Ct_t = custo unitário do cabo de protensão (R\$)

n_{cabos} = número de cabos de protensão (unid)

μ_t = peso específico do tipo de aço dos cabos de protensão (kN/m)

$L_{seção}$ = comprimento do vão (m)

Ct_{ti} = custo de instalação da protensão por unidade de cabo (R\$)

Os custos e valores considerados para obter os resultados neste trabalho foram baseados na tabela do Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO 2020, para referência, constam:

- (Ct_s) Aço da viga: R\$ 12,88
- (Ct_t) Cabo de protensão: R\$ 12,69
- (Ct_{ti}) Instalação (9,5 mm): R\$ 125,66
- (Ct_{ti}) Instalação (15,2 mm): R\$ 158,65
- (μ_t) Peso específico (Φ 9,5 mm) = 0,004158 kN/m
- (μ_t) Peso específico (Φ 15,2 mm) = 0,012152 kN/m

2.2 Funções de Restrição

Seguindo a NBR 8800:2008 de Estado Limite Último (ELU) e de Serviço (ELS) para perfis duplamente simétrico e monossimétrico, as funções de restrição são expostas entre as equações 2 - 18. O coeficiente de combinação γ_g das ações equivale a 1,25 e 1,35 e o de combinações γ_q corresponde a 1,4 e 1,5.

$$M_{sd} / M_{rd} \leq 1 \quad (2)$$

$$M_{sd_{vazio}} / M_{rd} \leq 1 \quad (3)$$

$$V_{sd} / V_{rd} \leq 1 \quad (4)$$

$$N_{sd} / N_{rd} \leq 1 \quad (5)$$

$$\delta_{total} / \delta_{limite} \leq 1 \quad (6)$$

$$\delta_{vazio} / \delta_{limite} \leq 1 \quad (7)$$

$$\left(\left(\frac{N_{sd}}{N_{rd}} \right) + \left(\frac{8}{9} \right) \right) \cdot \left(\frac{M_{sd_{vazio}}}{M_{rd}} \right) \leq 1 \quad (8)$$



$$\left(\frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}}\right) + \left(\frac{M_{sdvazio}}{M_{rd}}\right) \leq 1 \quad (9)$$

$$\left(\left(\frac{N_{sd}}{N_{rd}}\right) + \left(\frac{8}{9}\right)\right) \cdot \left(\frac{M_{sd}}{M_{rd}}\right) \leq 1 \quad (10)$$

$$\left(\frac{N_{sd}}{2 \cdot N_{rd}}\right) + \left(\frac{M_{sd}}{M_{rd}}\right) \leq 1 \quad (11)$$

$$\left(\frac{d}{b_{f\text{maior}}}\right) / 4 \leq 1 \quad (12)$$

$$1 \geq \left(\frac{d}{b_{f\text{maior}}}\right) \quad (13)$$

$$1 \geq \left(\frac{d}{b_{f\text{maior}}}\right) + 1,5 \quad (14)$$

$$\left(\frac{4}{\sqrt{(h/t_w)}}\right) / 0.76 \leq 1 \quad (15)$$

$$1 \geq \left(\frac{4}{\sqrt{(h/t_w)}}\right) / 0.35 \quad (16)$$

$$\sigma_t / f_y \leq 1 \quad (17)$$

$$\sigma_c / f_y \leq 1 \quad (18)$$

M_{sd} = Momento devido ao carregamento (kNm)

M_{rd} = Momento fletor resistente da viga (kNm)

$M_{sdvazio}$ = Momento sem carregamento (kNm)

V_{sd} = Força cortante resistente devido à carga (kN)

V_{rd} = Força cortante resistente ao cisalhamento (kN)

N_{sd} = Força normal devido à carga (kN)

N_{rd} = Força axial de compressão resistente (kN)

δ_{total} = Deslocamento devido a carga no eixo x (mm)

δ_{limite} = Deslocamento máximo no eixo y devido ao módulo de elasticidade do aço (mm)

δ_{vazio} = Deslocamento sem carregamento no eixo y (mm)

d = Altura da seção transversal (mm)

$b_{f\text{maior}}$ = Largura da mesa (mm)

h = Altura da alma (mm)

t_w = Espessura da alma (mm)

σ_t = Tensão de tração máxima (kN/m²)

f_y = Tensão de escoamento máxima do aço (kN/m²)

σ_c = Tensão de compressão máxima do aço (kN/m²)

As equações de restrição 2 - 5 limitam os esforços máximos permitidos considerando a resistência do aço sendo utilizado. 6 e 7 avaliam a flecha em relação ao ELS, enquanto 8 - 11 corrigem as cargas na determinação da flexão para estes estados. Equações 12 - 16 dizem respeito às propriedades geométricas da seção transversal, evitando a ocorrência de flambagem além dos



limites estabelecidos pela norma brasileira. Equações 17 e 18 condicionam a propriedade de tensão limite do aço utilizado na viga aos limites de compressão e tração.

O presente trabalho se propõe a resolver o problema de otimização via Algoritmo Genético nativo do MATLAB e PSO implementado na mesma plataforma, respeitando as condições supracitadas.

3. RESULTADOS E ANÁLISES– ABBAS *et al.* (2018)

Abbas *et al.* (2018) em seu trabalho, utilizaram um modelo de otimização para viga apoiada utilizando o método de Elementos Finitos no software ANSYS, onde aplicaram duas funções objetivos, propondo otimizar a energia de deformação e as dimensões da forma. Portanto, para o presente trabalho será considerado a comparação com a segunda função objetivo.

Os autores não consideram perdas na protensão, portanto serão utilizados neste trabalho valores entre 0 e 20%, para que seja possível construir diferentes parâmetros de análise. A figura 2, mostra a viga com vista lateral com a carga e sua respectiva seção transversal, ilustrando a geometria da viga em formato de I e a disposição dos cabos.

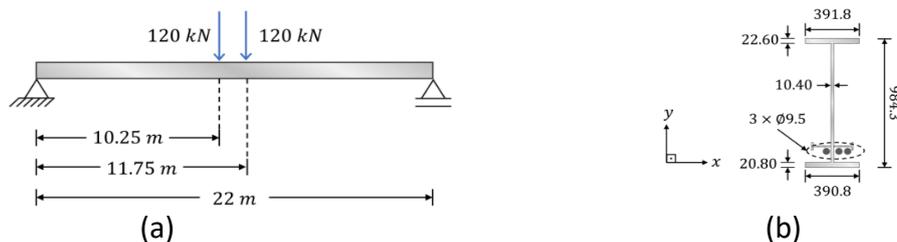


Figura 2. (a) Vista lateral da viga com carga; (b) seção transversal da viga (dimensões em mm)

- Limite de escoamento da viga de aço (f_y) de 200 Mpa
- Módulo de elasticidade (E) igual a 200000 Mpa

Após a aplicação da formulação proposta, obteve-se os resultados do problema de otimização para o AG e PSO conforme pode ser observado nas tabelas 1 e 2 respectivamente. Em ambas as tabelas MSLX refere-se ao perfil monossimétrico sendo L referente a perda e X o valor considerado. De forma similar são os resultados para os perfis DSLX que são para os perfis duplamente simétricos.



Tabela 1. Resultados monossimétrico e duplo simétrico baseado em Abbas et al. (2018) via AG

Referência	d(mm)	b _{rinf} (mm)	b _{fsup} (mm)	t _{rinf} (mm)	t _{fsup} (mm)	Ncabos	I _x (e+4mm ⁴)	δ (mm)	σ _c (MPa)	σ _t (MPa)	Custo Total (R\$)
Abbas et al. (2018)	984.3	390.8	391.8	20.80	22.60	3	465231.00	56.83	-193.40	147.20	60240.10
MSL0	1160	190	300	16	17.3	4	385754.38	54.45	-197.64	246.32	45367.84
MSL5	1040	250	290	16	20.7	5	343695.94	60.47	-199.98	245.40	46681.80
MSL10	1150	180	310	16	17.0	6	373515.84	51.08	-194.68	239.95	45435.21
MSL15	1180	160	300	16	18.1	6	386537.39	49.52	-185.36	246.44	45717.50
MSL20	1040	240	310	16	18.7	8	335035.67	56.16	-203.42	232.63	46616.52
DSL0	1080	270	270	20.8	20.8	3	412110.28	62.29	-203.75	183.07	49275.69
DSL5	1080	270	270	20.8	20.8	3	412110.28	62.70	-204.48	184.84	49275.69
DSL10	1020	280	280	20.8	20.8	6	371947.36	62.74	-202.84	165.26	49545.36
DSL15	1070	270	270	20.8	20.8	4	403413.29	62.60	-204.39	180.84	49288.47
DSL20	1070	270	270	20.8	20.8	5	403413.29	60.95	-201.50	173.80	49532.58

Tabela 2 - Resultados monossimétrico e duplo simétrico baseado em Abbas et al. (2018) via PSO

Referência	d(mm)	b _{rinf} (mm)	b _{fsup} (mm)	t _{rinf} (mm)	t _{fsup} (mm)	Ncabos	I _x (e+4mm ⁴)	δ (mm)	σ _c (MPa)	σ _t (MPa)	Custo Total (R\$)
Abbas et al. (2018)	984.3	390.8	391.8	20.80	22.60	3	465231.00	56.83	-193.40	147.20	60240.10
MSL0	610	100	230	20	30	4	378661.34	55.61	-199.81	248.93	45158.83
MSL5	690	50	220	50	30	5	404450.5	47.87	-188.22	243.90	45186.76
MSL10	660	70	220	40	30	5	394897.21	50.66	-194.01	244.26	45189.08
MSL15	650	80	220	30	20	5	392575.06	52.14	-197.29	244.57	45218.17
MSL20	650	80	220	30	30	5	393360.63	52.91	-196.84	247.63	45284.81
DSL0	1080	270	270	20.8	20.8	3	412110.28	62.29	-203.75	183.07	49275.69
DSL5	1080	270	270	20.8	20.8	3	412110.28	62.70	-204.48	184.84	49275.69
DSL10	1070	270	270	20.8	20.8	4	403413.29	62.04	-203.41	178.48	49288.47
DSL15	1070	270	270	20.8	20.8	4	403413.29	62.60	-204.39	180.84	49288.47
DSL20	1080	270	270	20.8	20.8	4	412110.28	61.76	-202.81	180.76	49519.81

Conforme pode ser observado, ambos os algoritmos encontraram soluções melhores para o problema proposto por Abbas et al. (2018). Em termos de desempenho, a Figura 3 apresenta uma análise comparativa das soluções obtidas pelos dois algoritmos.

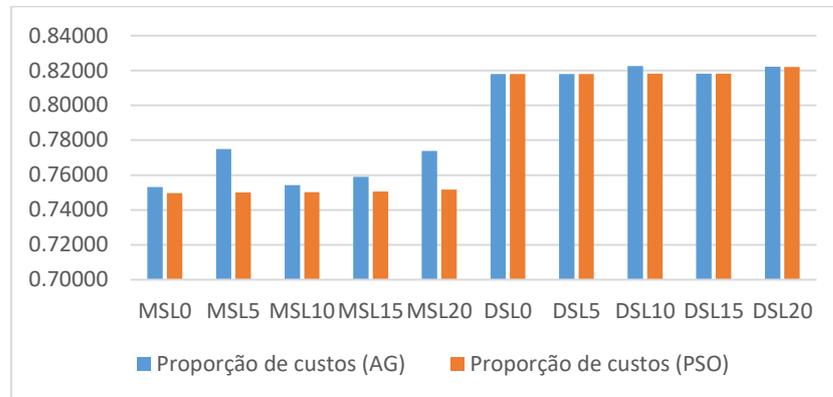
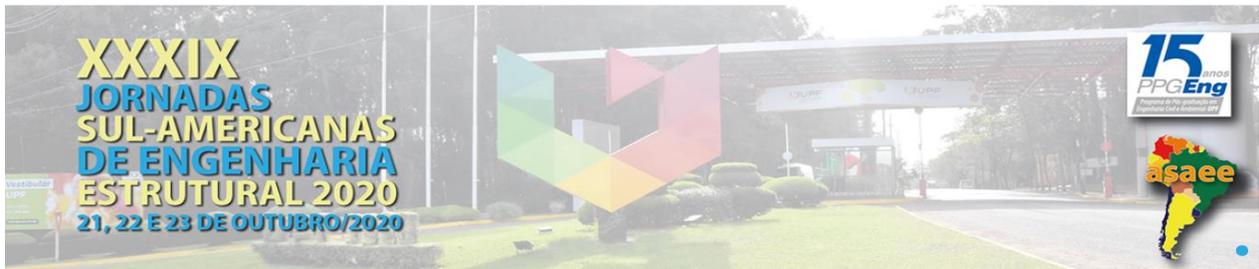


Figura 3. Gráfico comparativo entre resultados de AG e PSO

Conforme pode ser observado o PSO obteve resultados melhores que o AG praticamente em todos os problemas, sendo que as melhores soluções foram em torno de 25% melhores que as propostas por Abbas *et al.* (2018). A Figura 4, apresenta a análise das restrições que governam o problema.

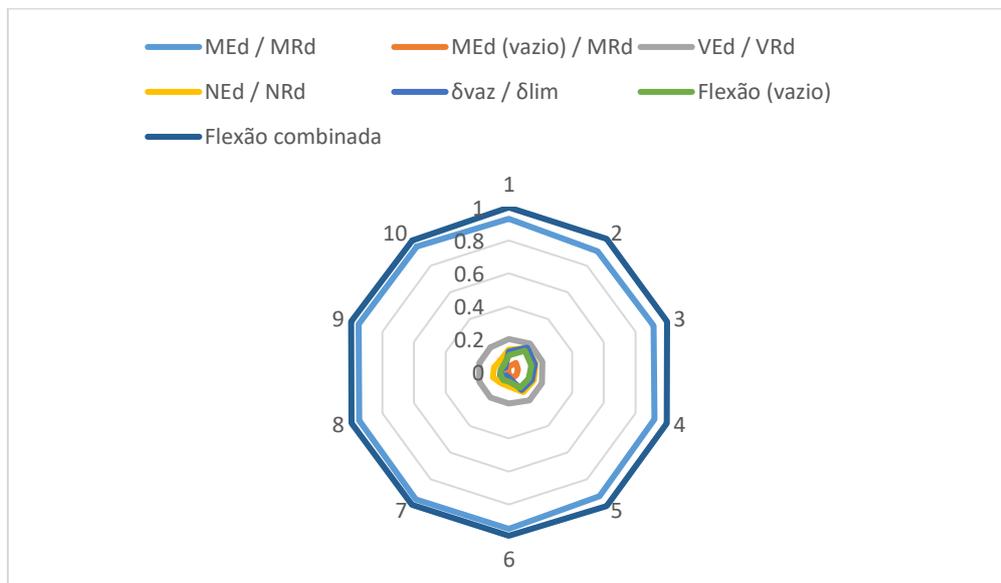


Figura 4. Análise gráfica de limites de restrição do Exemplo via PSO

Conforme pode ser observado, o momento no vazio, forças normais e cortantes, deflexão no vazio e carregamento no vazio foram consideravelmente baixos nos casos estudados. Já para os casos de carga combinada e momento fletor o algoritmo oscilou bem próximo do limite, onde em 80% dos casos de solução ótima para monossimétricos na relação entre flexão total e a flexão limite foram menores que o encontrado por Abbas *et al.* (2018).

4. CONCLUSÕES



Conforme pode observar na análise do problema proposto, tanto o AG quanto o PSO foram efetivos na obtenção das soluções do problema de otimização, obtendo soluções melhores das que apresentada por Abbas et al. (2018). Na análise entre os algoritmos o PSO encontrou em praticamente todas as simulações soluções melhores das que a apresentada pelo AG.

Em relação ao problema proposto, pode-se perceber que a flecha e o dimensionamento a flexão governaram o problema em todos os casos estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PPGEUFES e a CAPES que deram suporte para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Abbas, A. L. et al. (2018) Finite Element Analysis and Optimization of Steel Girders with External Prestressing. Civil Engineering Journal. Vol 4. No 7.

Agrawal, V., Chandwani, V., Porwal, A.(2013). Optimum Design of Welded Steel Plate Girder using Genetic Algorithms. International Journal of Current Engineering and Technology. Vol. 3, No. 4, 1209-1213.

Alves, E. C., Pietralonga, T. C. (2020). Análise dos modos de colapso no dimensionamento ótimo de vigas alveolares via algoritmos genéticos. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série III n° 12.

Alves, E. C., Ramos, J. R. (2020). Numerical analysis of collapse modes in optimized design of alveolar Steel-concrete composite beams via genetic algorithms. REM - International Engineering Journal. Ouro Preto.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023: Normalização de Referências. Rio de Janeiro, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7482: Fios de aço para concreto protendido. Rio de Janeiro, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7483: Cordoalhas de aço para concreto protendido - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e de Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

Gero, Prendes et al. (2018). Optimization of steel structures with one genetic algorithm according to three international building codes. Revista de la Construcción. 17. 10.7764/RDLC.17.1.47.

Kaveh, A., Shokohi, F. (2016). A hybrid optimization algorithm for the optimal design of laterally-supported castellated beams. Scientia Iranica A. 23(2), pp. 508-519.



Kripakaran, P., Hall, B., Gupta, A. A. (2011). Genetic Algorithm for Design of Moment-Resisting Steel Frames. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 44. 559-574.

MATLAB. Guia do usuário r2013a. The Math Works Inc, 2013.

Nguyen, Q. H. (2020). Parametric Investigation of Particle Swarm Optimization to Improve the Performance of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in Determining the Buckling Capacity of Circular Opening Steel Beams. Thuyloi University, Hanoi. Vietnam

Protaze, Mageveske, et al. (2021). Cost analysis on the optimum design of prestressed doubly-symmetric steel beams – III Pan-American Congress on Computational Mechanics, ABMEC-IACM.

Ravindra, V., Venkateswarlu, T., Raju, P.M. (2008). Computerized design of pre-stressed homogeneous steel beam – *Journal of Structural Engineering*. Vol. 35. No. 2.

Skoglund, O., Leander, J., Karoumi, R. (2020). Optimizing the steel girders in a high strength steel composite bridge. *Engineering Structures* 221, 110981.

Tran, N. H., Bui T.T. (2019). Damage detection in a steel beam structure using particle swarm optimization and experimentally measured results. *Science Journal of Transportation*, n. 9, p. 3-9.

Ye, J. et al. (2016). Optimum design of cold-formed steel beams using Particle Swarm Optimisation method. *Journal of Constructional Steel Research*, V. 122, p. 80-93.