

OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE AÇO COM UM METAHEURÍSTICO ADAPTATIVO

Cristian Berastegui Barranco

Letícia Fleck Fadel Miguel

Berastegui.barranco@ufrgs.br

letffm@ufrgs.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rua Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre, Brasil.

Jesús Daniel Villalba Morales

Jesus.villalba@javeriana.edu.co

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Pontifícia Javeriana

Bogotá, Colômbia.

Abstract. Três aspectos que influenciam o desempenho de uma metaheurística para resolver um problema de otimização correspondem à calibração dos parâmetros do algoritmo, a representação escolhida para as soluções possíveis e as heurísticas baseadas no conhecimento do problema. Neste artigo, propõe-se uma metodologia para a otimização do projeto de estruturas de aço 2D que utiliza uma evolução diferencial adaptativa melhorada. A versão do DEA utilizada não requer a calibração prévia dos parâmetros do algoritmo, evitando que estes sejam definidos pelo usuário. Uma representação especial para a solução é proposta para reduzir o espaço de busca. Além disso, heurísticas são geradas com base no banco de dados de perfis disponíveis para a formação da população inicial e para acelerar o processo de convergência. A metodologia proposta é testada com 3 casos de estudos relatados na literatura em termos da qualidade da solução encontrada, do tempo computacional e da robustez.

Keywords: Otimização, Metaheurística, Pórtico de aço, Evolução diferencial adaptativo

1. Introdução

Processos de otimização tem sido formulados para a solução de problemas em todas as áreas da engenharia civil (estruturas, geotecnia, construção, vias e transporte, geotecnia, recursos hídricos e ambiental) como pode ser evidenciado na literatura [1-5], sendo que a maioria dos problemas envolve que a função objetivo esteja baseada no custo dos processos. A solução ao problema requer que se defina a natureza do algoritmo de otimização que será usado no processo, sendo que é possível seguir uma abordagem clássica ou uma heurística. No caso específico do problema de otimizar o dimensionamento de pórticos de aço observa-se uma grande acolhida para as metaheurísticas como permitem uma gestão do problema que é obtida mais naturalmente. Camp [6] utilizou a estratégia do problema do vendedor viajante para resolver o problema de otimização de pórticos de aço considerando restrições de serviço e resistência. Gong [7] realizou a otimização de pórticos de aço resistentes a momentos usando análise de sensibilidade e duas funções objetivos baseadas no controle do peso da estrutura e dos deslocamentos máximos. Carbas [8] propôs modificações no algoritmo Firefly com o intuito de ajudar ao algoritmo para não ficar preso em ótimos locais que estão presentes na função objetivo do custo de pórticos de aço. Farschin et al. [9] aplicou o algoritmo heurística baseado em aprendizagem na escola para obter a configuração ótima de pórticos de aço, encontrando melhores dimensionamentos e menores tempos computacionais.

Metaheurísticas são algoritmos aproximados de busca que fornecem soluções “adequadas” em um tempo “aceitável” para problemas difíceis e complexos em engenharia e ciências, sendo que não é possível garantir a otimalidade da solução encontrada [10]. A estrutura que possui cada algoritmo lhe permite que possa ser aplicada (de forma geral) para problemas cujo espaço de busca tenha características diferentes. Porém, a aplicação de metaheurísticas na solução específica de um problema requer da sua adaptação as condições do problema estudado, portanto devem-se gerar estratégias (na forma de heurísticas) que permitam incluir as condições próprias do problema no processo de busca da solução de tal forma a garantir um melhor processo de convergência.

Outro aspecto que limita a qualidade da solução encontrada por uma metaheurística é a necessidade que o usuário defina alguns dos parâmetros que a configuram. O anterior está baseado no fato que o processo de otimização passa por diferentes etapas que requerem de parâmetros que possam se adaptar as condições atuais em uma iteração dada. Por exemplo, Zhang et al [11] propõe que os parâmetros do algoritmo Particle Swarm Optimization (c_1 , c_2 y W) sejam modificados em função de um fator evolucionário que mede o estado do processo de busca. Além disso, é possível que em metaheurísticas baseadas em população o uso de um único conjunto de parâmetros não seja eficiente. Villalba and Laier [12] utilizaram uma aproximação onde cada vetor da população em uma corrida do algoritmo de evolução diferencial tivesse seus próprios parâmetros, sendo seu cálculo em função dos valores dos parâmetros do melhor vetor na população. Sob um ponto de vista prático, a responsabilidade da definição dos valores dos parâmetros da metaheurística na solução de um problema de características específicas cai sobre o usuário, que deve usar uma estratégia de calibração deles (tal como teste e erro). Porém, uma estratégia para evitar o anterior consiste em introduzir na metaheurística alguma técnica de controle que de forma automática determine os valores dos parâmetros. Eiben et al [13] mostram que há 3 formas de exercer o controle de parâmetros: determinístico, adaptativo e auto-adaptativo. Cabe salientar que todos os trabalhos sobre otimização de pórticos de aço acima mencionados usam valores dos parâmetros constantes e alguns deles não especificam como foram obtidos tais valores.

Neste trabalho se propõe a utilização de um algoritmo de evolução diferencial adaptativo para a solução do problema de otimização de pórticos de aço sob condição de sismo. Nesse caso a resposta estrutural é obtida mediante a solução de uma análise dinâmica cronológica no software OpenSees. Heurísticas são utilizadas para diminuir o tamanho da base dados de perfis disponíveis para estrutura e para acelerar o processo de convergência para uma solução que cumpra com as restrições dadas. Para demonstrar o desempenho da metodologia proposta se otimizam 3 pórticos considerando 2 ações sísmicas.

2. Algoritmo de evolução diferencial

O algoritmo de evolução diferencial é principalmente usado na solução de problemas de otimização envolvendo variáveis contínuas, como proposto por Storn and Reinhon [14] em 1995. A ideia básica do algoritmo é a modificação iterativa de um conjunto de soluções (população) a partir de operações de mutação, reprodução e seleção, aplicadas de forma individual. O processo de mutação de um indivíduo vem dado por:

$$\mathbf{v}_i^t = \mathbf{x}_{best}^t + AF \cdot V_{amp} \quad (1)$$

onde i es a posição do vector de mutação, \mathbf{x}_{best}^t é o melhor vector na iteração atual t . V_{amp} é a amplificação da variação diferencial e está dada pela equação (2). AF é um parâmetro de controle real que controla o valor da amplificação da variação diferencial (V_{amp}) e geralmente está na faixa $[0.1,1]$.

$$V_{amp} = \sum_{k=1}^4 ((-1)^{k+1} \cdot \mathbf{x}_k^t) \quad (2)$$

onde \mathbf{x}_k^t são vetores na população atual selecionados aleatoriamente. Estes vetores devem ser diferentes entre si e diferentes ao melhor vector.

O vector de cruzamento é obtido a partir do resultado anterior, assim:

$$\mathbf{u}_{i,j}^t = \begin{cases} \mathbf{v}_{i,j}^t & \text{if } nr_j < CR \\ \mathbf{t}g_{i,j}^t & \text{if } nr_j \geq CR \end{cases} \quad (3)$$

onde $\mathbf{t}g$ é o vector de mutação, é um número aleatório entre 0 e 1 com distribuição uniforme, que se gera para cada posição do vector. CR é um parâmetro que controla quanto de cada vector (original e mutação) aporta a geração do novo indivíduo u , chamado vector de prova.

O seguinte passo consiste em selecionar entre o vector de prova o vector corresponde na população atual.

As 3 operações anteriores são aplicadas para cada indivíduo na população para completar uma iteração. O processo se repete até atingir um critério de paro.

Wang et al [15] introduz uma forma de controle de parâmetros para cada indivíduo da população em função da diversidade da população na iteração atual, como dado por:

$$\lambda_{i,G+1} = \begin{cases} \lambda_{max} - \frac{f_{i,G+1} - f_{avg,G+1}}{f_{max,G+1} - f_{avg,G+1}} (\lambda_{max} - \lambda_{min}) & \text{si } \alpha_{G+1} < \tau \text{ y } \beta_{i,G+1} \geq 0 \\ \lambda_{i,G} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{i,G+1} = \begin{cases} F_{max} - \frac{f_{i,G+1} - f_{avg,G+1}}{f_{max,G+1} - f_{avg,G+1}} (F_{max} - F_{min}) & \text{si } \alpha_{G+1} < \tau \text{ y } \beta_{i,G+1} \geq 0 \\ F_{i,G} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

$$CR_{i,G+1} = \begin{cases} CR_{max} - \frac{f_{i,G+1} - f_{avg,G+1}}{f_{max,G+1} - f_{avg,G+1}} (CR_{max} - CR_{min}) & \text{si } \alpha_{G+1} < \tau \text{ y } \beta_{i,G+1} \geq 0 \\ CR_{i,G} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

onde $\lambda_{min} = 0.7$, $\lambda_{max} = 1.0$, $F_{min} = 0.1$, $F_{max} = 0.8$, $CR_{min} = 0.3$, $CR_{max} = 1.0$ y $\tau = 0.7$.

A diversidade da população vem dada por:

$$\alpha_G = \frac{f_{max,G} - f_{avg,G}}{f_{max,G}} \quad (7)$$

onde $f_{max,G}$ é o máximo custo de um indivíduo para iteração G e $f_{avg,G}$ é o custo médio dos indivíduos da geração G .

A diferença individual para o vetor i está definida como:

$$\beta_{i,G} = f_{i,G} - f_{avg,G} \quad (8)$$

onde $f_{i,G}$ é o custo do indivíduo i .

A estratégia de mutação é agora:

$$V_{i,G} = \lambda_{i,G} X_{r_1,G} + F_{i,G} (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (8)$$

3. Metodologia

Este artigo propõe uma metodologia para a otimização do projeto de pórticos de aço 2d submetidos a excitação sísmica usando um algoritmo de evolução diferencial adaptativo.

3.1 Formulação do problema de otimização

Os elementos básicos para a formulação de um problema de otimização são as variáveis e parâmetros de projeto, a função objetivo e as restrições.

Cada elemento para o processo de otimização de pórticos de aço é definido.

Subtópico 1. Variáveis e parâmetros de projeto

As variáveis de projeto ou os parâmetros que permitem modificações no processo de otimização dos pórticos de aço são o tipo de perfil das vigas e das colunas em cada andar.

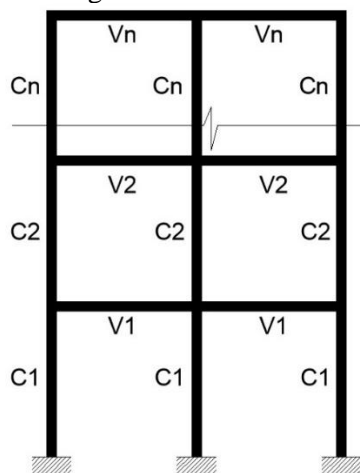


Figura 1. Variáveis de projeto para pórticos de aço

Duas variáveis de projeto são consideradas por cada andar do pórtico, como mostrado na Figura 1. Também pode-se observar que se considera que as colunas de um mesmo andar são do mesmo tipo, o mesmo vale para as vigas. Consequentemente o vetor de variáveis de projeto é:

$$X = [C_1 \ V_1 \ C_2 \ V_2 \ \dots \ C_n \ V_n \ \dots]$$

Os parâmetros de projeto, o seja aqueles parâmetros que não mudam durante o processo de otimização são:

Altura do pórtico
Número de vãos
Propriedades do aço estrutural
Sinais de excitação sísmica
Número de andares

Subtópico 2. Função objetivo

A fim de classificar os projetos obtidos do processo de otimização ou medir a qualidade das soluções do problema a função objetivo foi estabelecida com a ideia de minimizar o peso dos pórticos analisados, como mostrado na equação (9).

$$Peso\ portico = \sum_{i=1}^{N^{vig}} W_{v_i} l_{v_i} + \sum_{j=1}^{N^{col}} W_{c_j} l_{c_j} \quad (9)$$

Onde

W_{v_i} : peso por unidade de comprimento da viga i

l_{v_i} : comprimento da viga i

W_{c_j} : peso por unidade de comprimento da coluna

l_{c_j} : comprimento da coluna j em

Subtópico 3. Restrições

O projeto estrutural foi feito de acordo com as especificações AISC 360-16 e o manual de construção em aço LRFD. Portanto, as seguintes restrições foram estabelecidas para o processo de otimização.

- Restrições de deslocamento:
Deflexão em vigas:

$$g_1(x): \delta_{viga} \leq \frac{l}{360} \quad (10)$$

Onde l é o comprimento da viga

Deslocamento relativo de cada andar:

$$g_2(x): \frac{\Delta_{and}}{h_{and}} \times 100 \leq 1 \quad (11)$$

Onde Δ_{and} é o deslocamento horizontal do andar e h_{and} é a altura.

- Restrição de esbeltez em colunas

$$g_3(x): \frac{l_c}{r} = \frac{Kl}{r_y} < 200 \quad (12)$$

Onde l_c é o comprimento efetivo do membro, K o fator de comprimento efetivo, l o comprimento do membro e r_y é o raio de giração.

Neste trabalho foi considerado um valor de 0.65 para o fator de comprimento efetivo, para uma coluna tipo (a) segundo a tabela C-A-7.1 das especificações AISC 360-16.

- Restrições construtivas

Coluna-coluna:

A altura d e o peso unitário W das seções W para colunas devem ser iguais uns aos outros ou aqueles do andar superior devem ser menores que os do andar inferior.

$$g_4(x): \frac{d_{i+1}}{d_i} \leq 1; \quad i = 1, 2, 3 \dots n - 1 \quad (13)$$

$$g_5(x): \frac{W_{i+1}}{W_i} \leq 1; \quad i = 1, 2, 3 \dots n - 1 \quad (14)$$

Onde n é o número de andares.

Viga-coluna:

Quando a largura de aleta de uma viga (b_{fvi}) é conectada à de uma coluna (b_{fci}), a largura de aleta da viga deve ser menor ou igual que o da coluna.

$$g_6(x): \frac{b_{fvi}}{b_{fci}} \leq 1; \quad i = 1, 2, 3 \dots n_j \quad (15)$$

Onde n_j é o número de juntas viga-coluna

- Restrições de carga

Quando os efeitos das deformações não são levados em conta para o cálculo da carga deve ser cumprido que:

Para $\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2$:

$$g_7(x): \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \quad (16)$$

Para $\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$:

$$g_7(x): \frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1$$

Onde

P_u : resistência axial exigida

P_n : resistência axial disponível

M_{ux} : resistência à flexão exigida no eixo x

M_{uy} : resistência à flexão exigida no eixo y

M_{nx} : resistência à flexão disponível no eixo x

M_{ny} : resistência à flexão disponível no eixo y

$\phi = \phi_b = 0.90$ (para LRFD)

- Restrição coluna forte viga fraca

A soma dos momentos das colunas ($\sum M_{ci}$) acima e abaixo da mesma junta deve ser maior que a soma dos momentos das vigas ($\sum M_{vi}$) que chegam naquela junta.

$$g_8(x): \frac{\sum M_{ci}}{\sum M_{vi}} > 1; \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (17)$$

Onde n é número de juntas do pórtico.

3.2 Algoritmo Evolução Diferencial (DE)

Para a execução do algoritmo de otimização é necessário definir os parâmetros de entrada do processo, que são os dados do pórtico e os parâmetros do algoritmo DE. Então a população inicial é gerada aleatoriamente, onde cada indivíduo representa a configuração de um pórtico e está composto por as variáveis de projeto, quer dizer, o tipo de viga e coluna de cada andar do pórtico. Imediatamente uma análise estrutural é realizada para cada pórtico (indivíduo) usando o software OpenSees a fim de obter resultados como são os momentos, cargas axiais e deslocamentos. Estes resultados passam para o software Matlab onde foi feito o programa de projeto, aqui são avaliadas as restrições e determinado o peso do pórtico. Se o pórtico analisado não cumpre com as restrições, o resultado da função objetivo (peso) é penalizado e consequentemente são geradas novas possíveis soluções, o seja, indivíduos a partir da mutação, cruzamento e seleção.

Os parâmetros de entrada para o algoritmo são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do algoritmo DE

Parâmetro	Pórtico		
	5 andares	4 andares	3 andares
População	30	20	20
Gerações	200	130	130
execuções	3	1	1

Subtópico 1. Heurística

O processo de otimização descrito acima posteriormente é aplicado adicionando uma heurística ao processo para acelerar o processo de procura e obter uma solução viável.

Para a aplicação da heurística, a otimização é feita só para as restrições de deslocamento, esbelteza, carga e coluna forte viga fraca e no pórtico obtido se definem as colunas como iguais ao tipo de coluna que possui o maior valor de módulo de seção plástica (Z_x), a fim de garantir a complacência das restrições coluna-coluna e ao mesmo tempo respeitar a restrição de coluna forte viga fraca. Subsequentemente é verificada a restrição viga-coluna em cada andar e é corrigido se necessário analisando os três perfis acima e abaixo do tipo de perfil atual da viga no banco de dados e substituindo-o pelo de maior valor de momento de inercia.

É importante mencionar que, a pesar de ter um grande banco de dados disponível, não era necessário usá-lo devido às exigências do problema, reduzindo assim o espaço de busca e em consequência foi usado um banco de dados de 83 perfis W ordenados com respeito ao momento de inercia.

4. Exemplos numéricos

Para os exemplos numéricos foram adotados 3 pórticos de 3, 4 e 5 andares com um vão para cada um como é mostrado na Figura 2, projetados de acordo com as especificações LRFD e AISC 360-16. Cada pórtico tem uma altura de andar de 3 m e um comprimento de vão de 6 m como mostrado na Figura 2. Os pórticos foram submetidos a uma carga permanente de 15000 N em cada viga e o material usado nas vigas e colunas foi um aço A36 com módulo de elasticidade de 200 Gpa e uma tensão de escoamento de 248.2 Mpa. A análise estrutural foi realizada no software OpenSees usando o método de integração direta de Newmark para determinar a resposta dinâmica da estrutura.

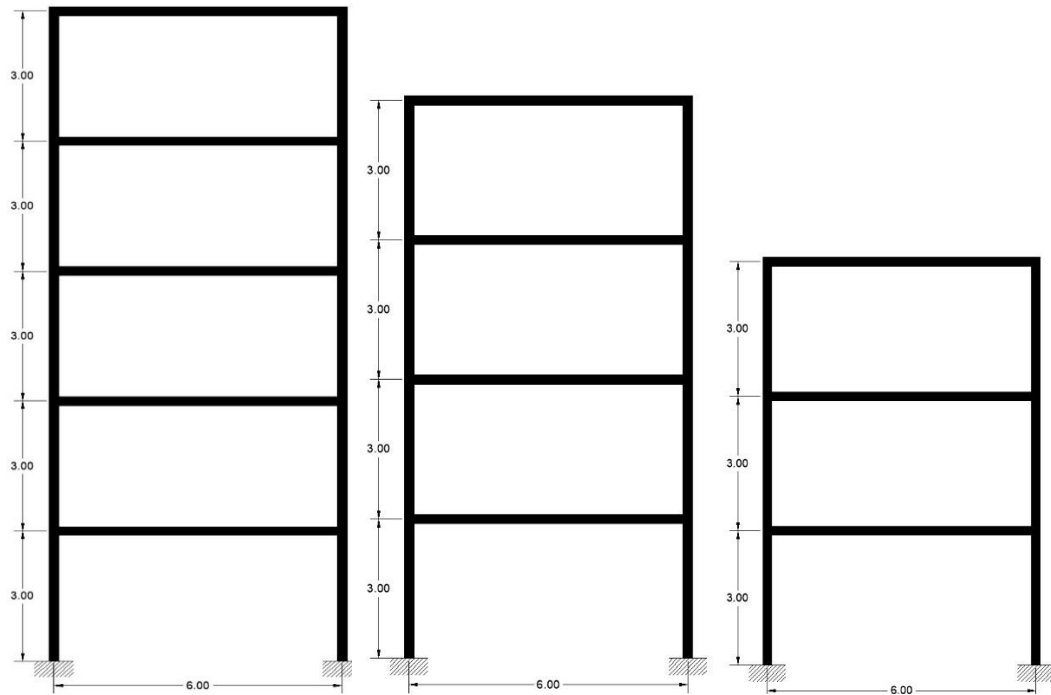


Figura 2. Pórticos de aço para exemplos numéricos

As variáveis de projeto dos pórticos são os tipos de viga e coluna de cada andar, portanto o pórtico de 3 andares tem 6 variáveis de projeto, o pórtico de 4 andares tem 8 e finalmente o pórtico de 5 andares tem 10 variáveis de projeto.

Os três pórticos foram submetidos a 2 sismos (Duzce, Coalinga) os quais inicialmente tinham 2600 dados de aceleração e foram reduzidos até 1300. Os acelerogramas dos sismos são mostrados nas figuras 2 e 3 e a Tabela 2 mostra os valores de acelerações máximas dos sismos.

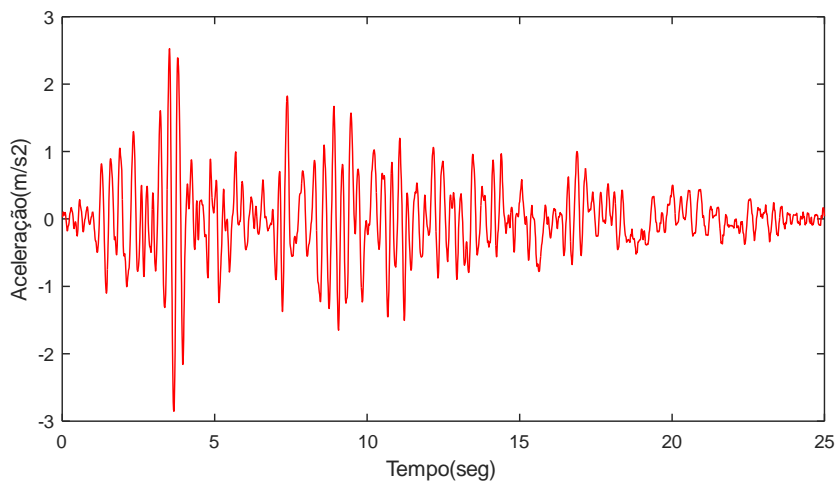


Figura 3. O sismo Duzce

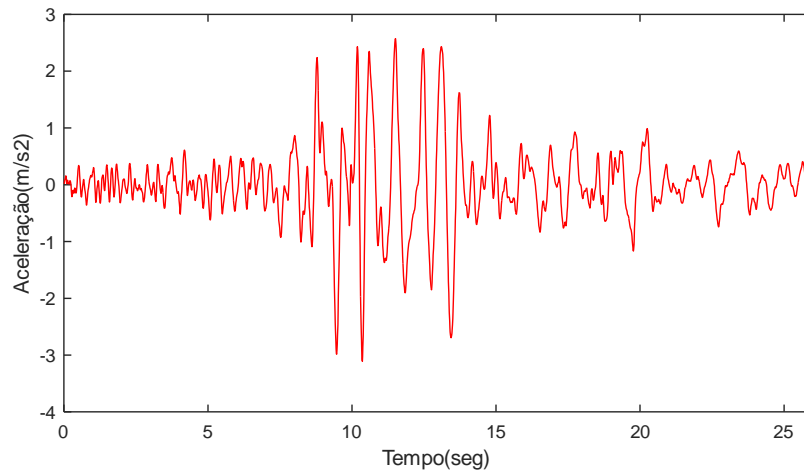


Figura 4. O sismo Coalinga

Tabela 2. Acelerações máximas dos sismos

Sismo	Duzce	Coalinga
PGA	2.8520	3.1095

4.1. Pórtico de 5 andares

Na Tabela 3. são apresentados os resultados da otimização (peso do pórtico e configuração de perfis para vigas e colunas) para o pórtico de 5 andares submetido a dois diferentes sismos (Duzce e Coalinga). Também nas Figuras 5 e 7 pode ser observada a curva de convergência para a otimização do pórtico submetido ao sismo Duzce sem heurística e com heurística respectivamente e da mesma maneira as Figuras 6 e 8 mostram a convergência do pórtico com a ação do sismo Coalinga.

Tabela 3. Resultados pórtico cinco andares um vão

Variável	Sem heurística		Com heurística	
	Duzce	Coalinga	Duzce	Coalinga
C1	W24X84	W24X76	W30X108	W30X99
C2	W24X76	W24X84	W30X108	W30X99
C3	W24X84	W24X76	W30X108	W30X99
C4	W24X76	W24X94	W30X108	W30X99
C5	W30X99	W24X76	W30X108	W30X99
V1	W30X90	W24X76	W24X76	W30X90
V2	W24X84	W30X90	W24X84	W24X84
V3	W24X76	W24X76	W24X76	W24X76
V4	W24X76	W24X76	W24X76	W24X76
V5	W24X76	W24X76	W24X76	W30X90
Peso (Kg)	36654	35717	8286.3	8134.5
Custo comp. (seg)	43107	43972	41657	41417

Fazendo a otimização sem heurística para as 8 restrições consideradas neste trabalho, verifica-se que o algoritmo de otimização não converge até 200 iterações, resultando na obtenção de pesos penalizados de 36654 Kg para Duzce e 35717 Kg para Coalinga como se observa nas Figuras 5 e 6.

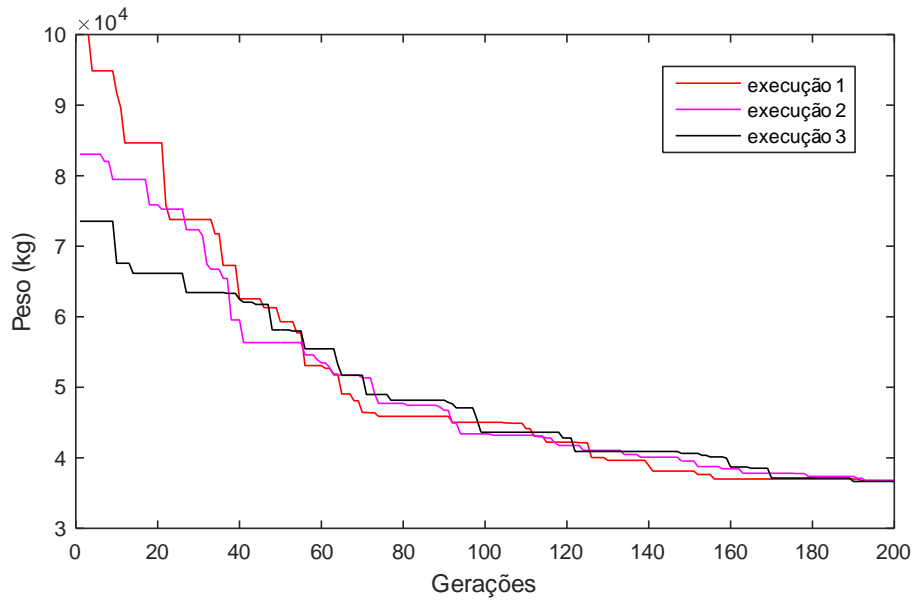


Figura 5. Curva de convergência para o pórtico de 5 andares submetido a o sismo Duzce sem heurística

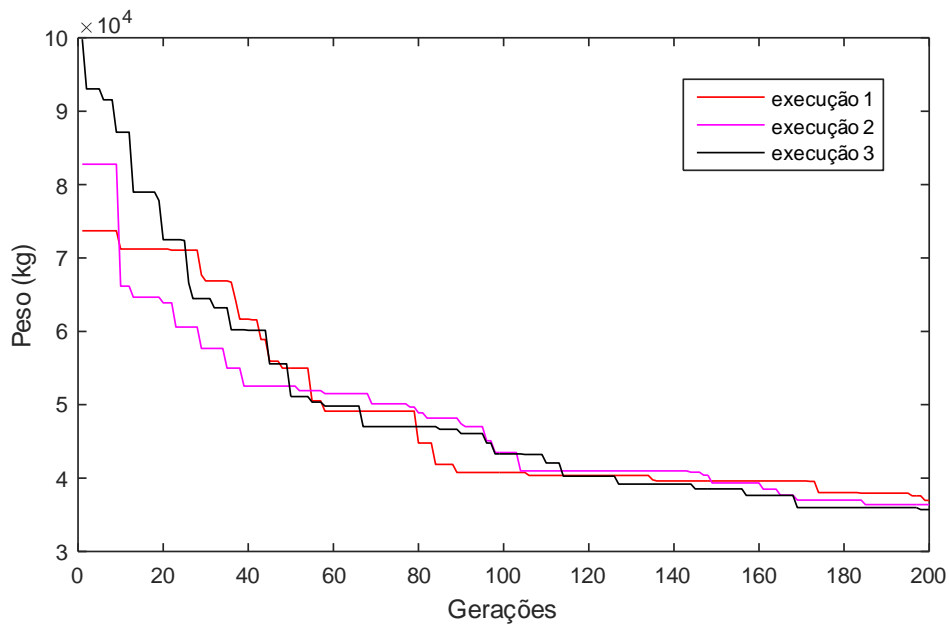


Figura 6. Curva de convergência para o pórtico de 5 andares submetido a o sismo Coalinga sem heurística

Com a aplicação da heurística é possível ver nas Figuras 7 e 8 que o algoritmo converge até pesos de 8286.3 Kg para Duzce e 8134.5 Kg para Coalinga.

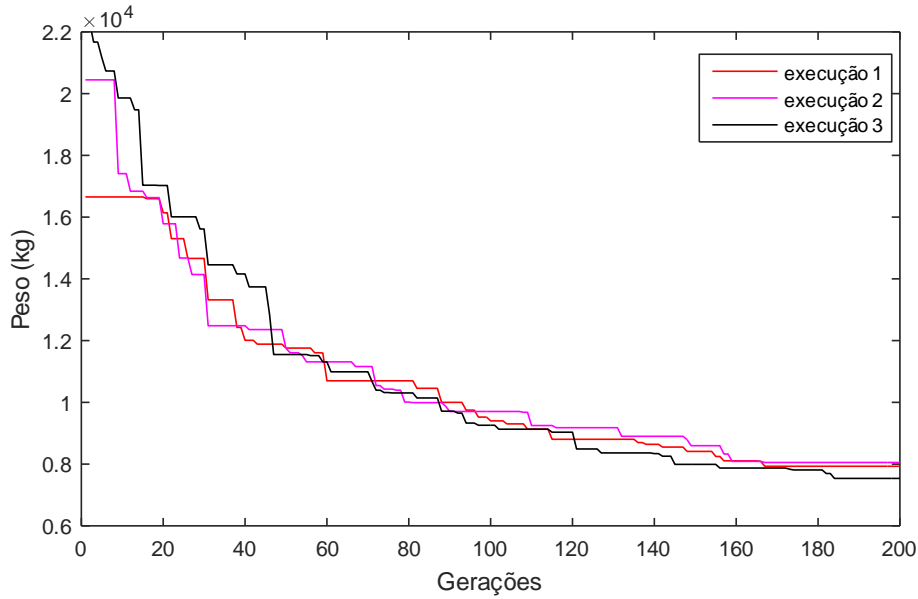


Figura 7. Curva de convergência para o pórtico de 5 andares submetido a o sismo Duzce com heurística

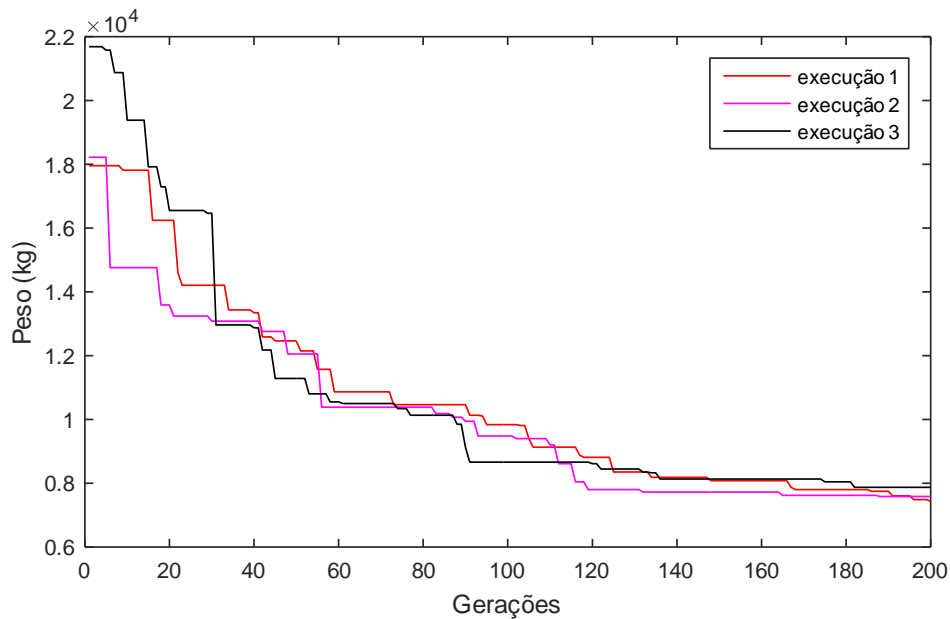


Figura 8. Curva de convergência para o pórtico de 5 andares submetido a o sismo Coalinga com heurística

É importante mencionar que o custo computacional for reduzido até um 3.4% para o análise como o sismo Duzce e 5.8% para Coalinga.

4.2. Pórtico de 4 andares

Na Tabela 4. são apresentados os resultados da otimização (peso do pórtico e configuração de perfis para vigas e colunas) para o pórtico de 4 andares submetido a dois diferentes sismos (Duzce e Coalinga). Também nas Figuras 9 e 10 pode ser observada a curva de convergência para a otimização do pórtico com e sem heurística para os sismos Duzce e Coalinga respectivamente.

Tabela 4. Resultados pórtico quatro andares um vão

Variável	Sem heurística		Com heurística	
	Duzce	Coalinga	Duzce	Coalinga
C1	W30X99	W24X76	W30X99	W24X117
C2	W30X99	W30X90	W30X99	W24X117
C3	W24X84	W24X76	W30X99	W24X117
C4	W24X76	W30X90	W30X99	W24X117
V1	W24X76	W24X76	W24X76	W24X76
V2	W24X76	W24X76	W24X84	W30X90
V3	W24X84	W24X76	W24X94	W30X90
V4	W30X99	W24X104	W24X94	W24X103
Peso (Kg)	30940	29645	6643.3	7384.4
Custo comp. (seg)	5324	5401	5169.1	5218

Como se observa nas Figuras 9 e 10, o algoritmo sem heurística para ambos sismos não consegue a convergência do problema para o pórtico de 4 andares, resultando em valores de peso penalizados de 30940 e 29645 Kg, Para Duzce e Coalinga, respectivamente.

O resultado aplicando a heurística foi favorável, a curva atinge a convergência com uma velocidade maior com o cumprimento das restrições ao longo de quase todo o processo.

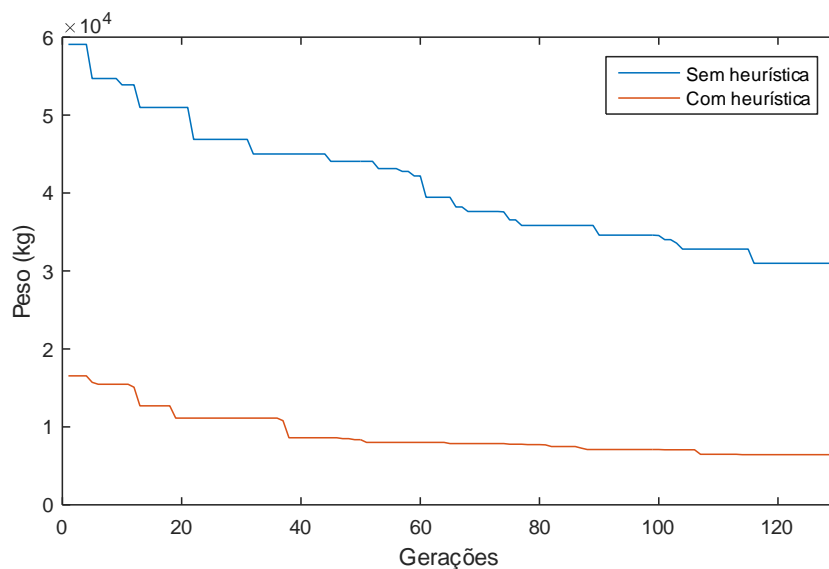


Figura 9. Curva de convergência para o pórtico de 4 andares submetido a o sismo Duzce com e sem heurística

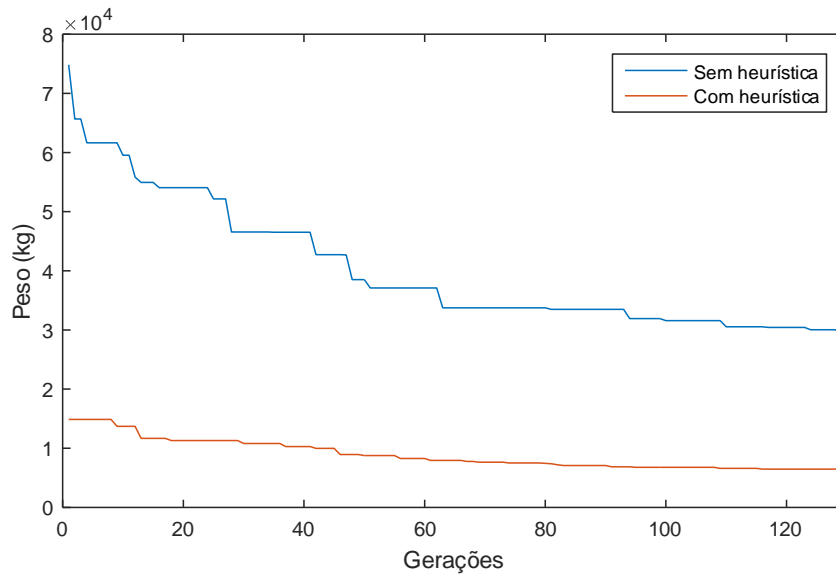


Figura 10. Curva de convergência para o pórtico de 4 andares submetido a o sismo Coalinga com e sem heurística

O custo computacional for reduzido até um 2.9% para o análise como o sismo Duzce e 3.4% para Coalinga.

4.3. Pórtico de 3 andares

A Tabela 5 mostra os resultados para o processo de otimização do pórtico de 3 andares submetido aos sismos Duzce e Coalinga com e sem heurística. Nas Figuras 11 e 12 é possível observar o comportamento da otimização nas curvas de convergência do pórtico sob os a ação dos dois sismos.

Tabela 5. Resultados pórtico três andares um vão

Variável	Sem heurística		Com heurística	
	Duzce	Coalinga	Duzce	Coalinga
C1	W30X132	W24X76	W30X99	W30X108
C2	W24X117	W30X90	W30X99	W30X108
C3	W24X84	W24X84	W30X99	W30X108
V1	W24X76	W24X76	W24X84	W24X76
V2	W24X76	W24X76	W24X76	W24X84
V3	W24X76	W24X76	W24X84	W24X76
Peso (Kg)	5009.3	21341	4830.7	5000.4
Custo comp. (seg)	3419.3	3735	3364.2	3444

Como se observa na Figura 11 para a análise com sismo Duzce, pode-se ver que embora ambos algoritmos (com e sem heurística) conseguem respeitar todas a restrições, para a otimização com a heurística um melhor resultado poderia ser obtido em termos de peso e custo computacional (tabela 5). Adicionalmente observa-se que para a otimização como a heurística as restrições são respeitadas durante tudo o processo.

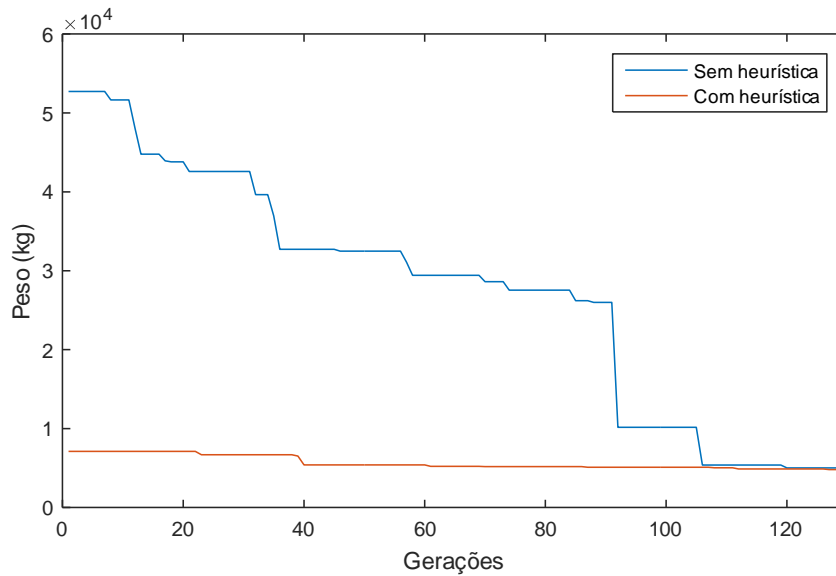


Figura 11. Curva de convergência para o pórtico de 3 andares submetido a o sismo Duzce com e sem heurística

Na Figura 12 para o análise com o sismo Coalinga pode-se observar que o algoritmo sem heurística não consegue cumprir com as restrições resultando um peso penalizado de 21341 Kg, enquanto para o algoritmo com heurística, respeitando as restrições converge até um peso de 5000.4 Kg.

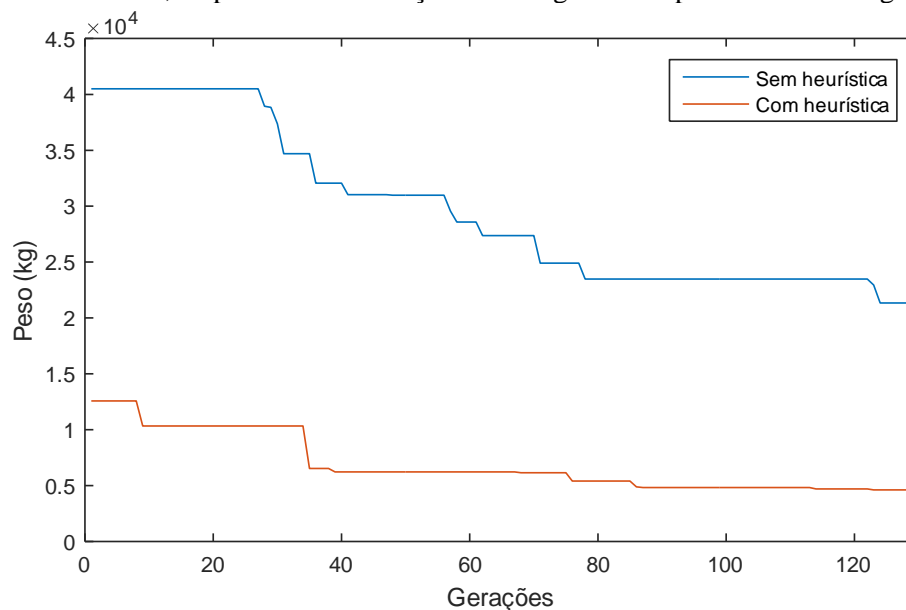


Figura 12. Curva de convergência para o pórtico de 3 andares submetido a o sismo Coalinga com e sem heurística

O custo computacional for reduzido até um 1.6% para o analise como o sismo Duzce e 7.8% para Coalinga.

5. Conclusões

Em relação aos resultados obtidos, é possível concluir que a técnica de otimização e a heurística aplicada ao processo são eficientes, conseguindo respeitar as restrições definidas para o problema,

diminuindo o custo computacional em até um 7.8%. O algoritmo também demonstrou sua robustez diminuindo para cada rodada o custo computacional e cumprindo com o objetivo de minimização do problema, respeitando as restrições.

Agradecimentos especiais:

Os autores deste trabalho reconhecem o apoio financeiro do CNPq e CAPES

Referências

- [1] Cunha, M. C., Sousa, J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 125, no. 4, pp 215-221, 1999.
- [2] Jong, J.-C., Jha, M. K., Schonfeld, P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, vol. 15, pp. 261-271, 2000.
- [3] Zhang, H., Tam, C. M., Li H. Multimode project scheduling based on Particle Swarm Optimization. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, vol. 21, pp. 93-103, 2006.
- [4] Cruz, A. Velez, W. and Thomson P. Optimal sensor placement for modal identification of structures using genetic algorithm- a case study: the Olympic stadium in Cali, Colombia, *Annals of operation research*, vol. 181, pp. 769-781, 2010.
- [5] Khajehzadeh, M., Taha, M. R., El-Shafie, A. and Eslmi, M. Economic Design of Foundation Using Harmony Search Algorithm. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 6, pp. 936-943, 2011.
- [6] Camp, C. V., Bichon, B. J. and Stovall, S. P. Design of steel frames using Ant Colony optimization. *Journal of structural engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 369-379, 2005.
- [7] Gong, Y. Design optimization of steel moment frames under extreme earthquake loading. *Advanced steel construction*, Vol. 3, No. 1, pp. 485-511, 2007.
- [8] Carbas, S. Design optimization of steel frames using an enhanced firefly algorithm. *Engineering optimization*, Vol. 48, No. 12, pp. 2007-2025, 2016.
- [9] Farshchin, M., Maniat, M., Camp, C. V. and Pezeshk, S. School based optimization algorithm for design of steel frames. *Engineering structures*, Vol. 171, pp. 326-335, 2018.
- [10] Talbi, E. G. Metaheuristics: From design to implementation. *Ed. Wiley*, 2009.
- [11] Zhan, Z. and Zhang J. Adaptive Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, vol. 39, no. 6, pp. 1362-1381, 2009.
- [12] Villalba, J. D. and Laier, J. E. Assessing the performance of a differential evolution algorithm in structural damage detection by varying the objective function. *Dyna*, vol.81, n.188, pp.106-115, 2014.
- [13] Eiben E. A., Hinterding, R. , Michalewicz, Z. Parameter control in evolutionary algorithms. *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 3, no. 2, pp. 124-141, 1999.
- [14] Storn, R. and Price, K.V., Differential evolution- A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Technical Report TR-95-012*. Berkeley, USA: Intern. Computer Science Institute, 1995.
- [15] Wang, S., Li Y. and Yang, H. Self-adaptive differential evolution algorithm with improved mutation mode. *H. Applied Intelligence*, Vol. 47, no. 3, pp. 1-15, 2017.