

Otimização de pórticos de galpões industriais por algoritmos meta-heurísticos

Giovanni Silveira Brasil¹, Felipe Schaedler de Almeida^{2,*}, Herbert Martins Gomes³, João Antônio Brasil Severgnini⁴

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Rua Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre – RS, giovannisbrasil@gmail.com

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Rua Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre – RS, felipe.almeida@ufrgs.br

³ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Rua Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre – RS, herbert@mecanica.ufrgs.br

⁴ Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Rua Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre – RS, joao.a.severgnini@gmail.com

Optimization of steel portal frames using meta-heuristic algorithms

Resumo

Este trabalho propõe e avalia uma metodologia que integra ferramentas de análise e dimensionamento estrutural a algoritmos meta-heurísticos para o projeto ótimo de pórticos de aço comumente encontrados em edifícios industriais. As seções transversais de pórticos planos de vão único, simétricos e com cobertura inclinada, formados por perfis I soldados, são otimizadas para minimizar o consumo de aço. O dimensionamento é formulado como um problema de otimização não linear com variáveis mistas e incluindo restrições definidas por estados limites últimos e de serviço. O algoritmo de busca harmônica foi superior aos algoritmos genéticos e de enxame de partículas nos experimentos numéricos realizados. A metodologia também foi aplicada com sucesso em estudos paramétricos com diferentes condições de projeto.

Palavras-chave: Otimização estrutural, Estruturas de aço, Pórticos de galpões industriais.

Abstract

This work introduces and evaluates a methodology that integrates structural analysis and design tools with meta-heuristic algorithms for the optimal design of steel portal frames. The cross-sections of single-span pitched roof symmetric portal frames, formed by welded I-shaped members, are optimized for the minimization of steel consumption. The design is formulated as a nonlinear optimization problem with mixed variables and includes constraints defined by ultimate and serviceability limit states. The harmony search algorithm was superior to the genetic algorithm and the particle swarm optimization in the numerical experiments performed. The methodology was also successfully applied in parametric studies with different design conditions.

Keywords: Structural optimization, Steel structures, Portal frames.

* autor correspondente

1 Introdução

Galpões de uso industrial são edificações de um pavimento, normalmente de planta retangular com grandes vãos livres. Em muitos casos, sua estrutura principal é composta por pórticos de aço formados por perfis I, como o ilustrado na Figura 1 (b). Estes pórticos são dispostos paralelamente e com afastamento regular, tendo como função o suporte de forças gravitacionais e laterais atuando no seu plano. Elementos de contraventamento proporcionam estabilidade lateral aos pórticos, que também se conectam a estruturas secundárias como terças de cobertura ou travessas do revestimento lateral (Bellei, 2006).

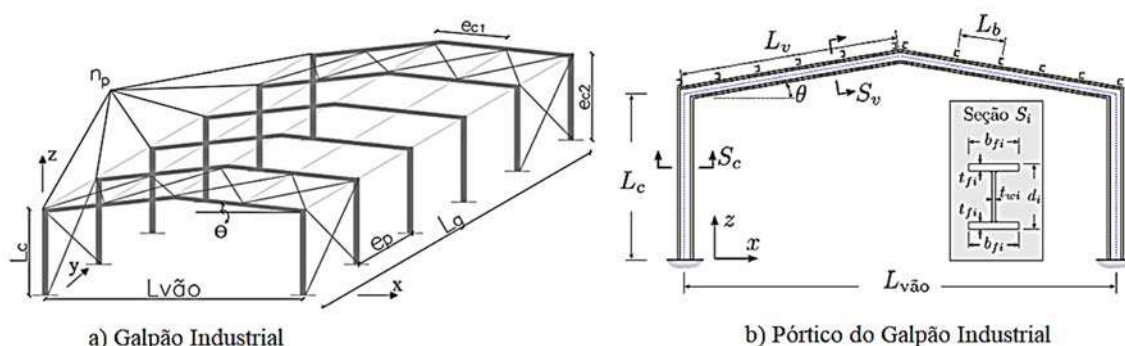


Figura 1 - Vista da estrutura do galpão industrial

No método tradicional de dimensionamento, as decisões se baseiam na experiência e sensibilidade estrutural do projetista. Desenvolve-se um processo iterativo de análise estrutural, seguido da avaliação dos requisitos de segurança e desempenho, que subsidiam a readequação do projeto. Além de trabalhoso, este procedimento pode levar a soluções pouco eficientes. Estas desvantagens podem ser reduzidas pela abordagem do dimensionamento estrutural como um problema de otimização de maneira automatizada, que pode ser resolvido por técnicas computacionais bem estabelecidas.

Há um contínuo esforço no desenvolvimento de estratégias para a incorporação de técnicas de otimização ao projeto de estruturas de aço. As abordagens mais bem-sucedidas empregam métodos meta-heurísticos, seja ao nível de vigas e pilares (Almeida, Vargas, e Braun 2019) ou para pórticos de edifícios de múltiplos andares (Dogan e Saka, 2012; Oliveira e Falcón, 2020). McKinstry et al. (2015) abordaram o projeto de pórticos de aço típicos de galpões industriais com grandes vãos e constataram que os perfis soldados são vantajosos em relação aos laminados. A

relevância dos estados limites de serviço sobre a otimização de pórticos de perfis laminados foi estudada por Phan et al. (2013). Problemas de otimização de pórticos com vigas e colunas não prismáticas são mais complexos pelo maior número de variáveis, além da maior dificuldade na formulação do problema e na elaboração dos modelos estruturais. Este tipo de problema foi abordado por Fu et al. (2019) e McKinstry et al. (2016) com ênfase na ação do vento e na comparação com outras soluções estruturais, respectivamente.

Este trabalho visa contribuir para a consolidação das técnicas de otimização para o projeto de pórticos de galpões industriais. A metodologia proposta tem como componentes principais: *i) a formulação do problema de otimização segundo os requisitos das normas brasileiras (apresentada na Seção 2) ii) a estruturação de um framework computacional que integra algoritmos meta-heurísticos (descritos na Seção 3) com um programa comercial de análise estrutural e um código desenvolvido para avaliação de segurança de perfis I soldados.* A Seção 4 apresenta estudos comparativos de eficiência dos algoritmos meta-heurísticos considerados para integrar o *framework*, além de um estudo sobre a aplicação da metodologia a um conjunto de casos de projeto com características diferentes.

2 Projeto otimizado de pórticos de galpões industriais

Esta seção apresenta uma descrição da estrutura e seus carregamentos em função de parâmetros fixados para uma determinada condição de projeto. Em seguida, o dimensionamento estrutural é formulado como um problema de otimização, que inclui restrições correspondentes aos requisitos de segurança e desempenho exigidas para tais estruturas.

A solução do problema de otimização é obtida por um *framework* computacional, montado pela conexão de *algoritmos meta-heurísticos de otimização (AMO)*, *algoritmos de modelagem e avaliação da estrutura (AMAE)* e um programa comercial de análise estrutural. Todos os códigos foram desenvolvidos pelos autores em Python 3, a menos do algoritmo genético (ver Seção 3), adaptado de Solgi (2020). O código AMAE se conecta ao programa comercial de análise estrutural SAP2000 por meio de uma API (*application program interface*) para Python (COMPUTERS & STRUCTURES, 2018). Essa

API permite que o código escrito em Python acesse diretamente as características e respostas do modelo estrutural, o que torna todo o processo eficiente.

A Figura 2 ilustra o fluxo de informações entre os diversos componentes do *framework* que podem ser aglutinados em dois processos. O primeiro processo (etapas 1a a 1c da Figura 2) é executado previamente à otimização e dedica-se à formação inicial do modelo a partir das características fixas do projeto. O segundo processo (etapas 2a a 2d da Figura 2) realiza a avaliação de uma solução gerada no ciclo do algoritmo otimização, pela modificação do modelo, análise estrutural e cálculo da função objetivo.

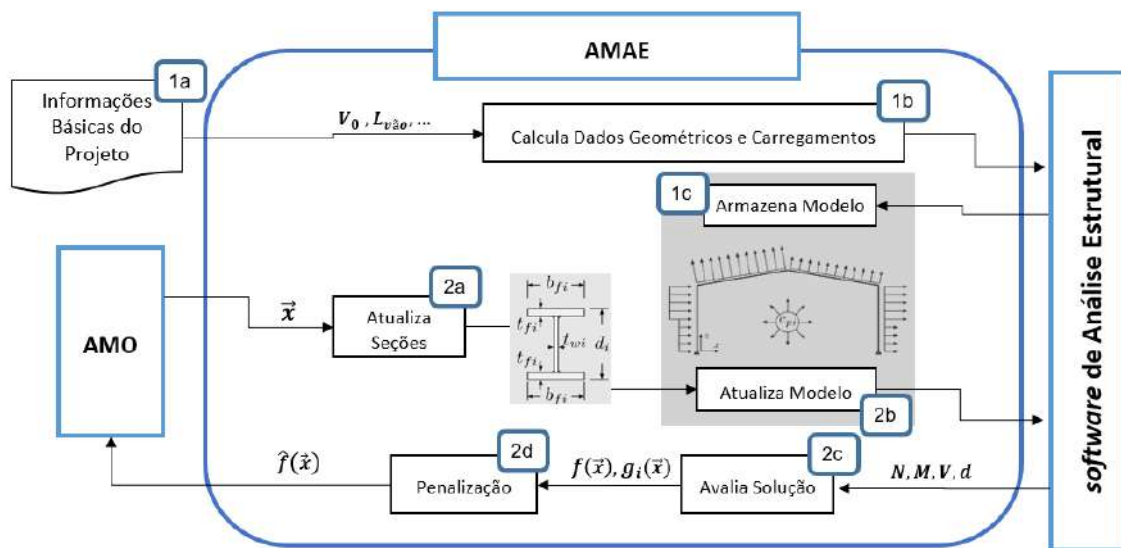


Figura 2 - Framework computacional para otimização dos pórticos

2.1 Parametrização do projeto

Os pórticos que são objeto de estudo neste trabalho compõem a estrutura de galpões como a apresentada na Figura 1 (a). Tipicamente, essas edificações apresentam um espaço interno livre de apoios, sendo caracterizadas pelo seu vão livre ($L_{vão}$) e comprimento longitudinal (L_g). Sua altura útil é limitada pelo comprimento das colunas (L_c) e o ângulo de inclinação da cobertura (θ).

Os pórticos formados por vigas de seção cheia com ligações rígidas são responsáveis por suportar forças gravitacionais e forças laterais atuando no seu plano, conforme mostra a Figura 3. Elementos de vedação em uma largura de influência $e_p = L_g/n_p$ transmitem estas forças para cada um dos n_p pórticos que formam a estrutura. As forças laterais que incidem na direção perpendicular aos pórticos (eixo y da Figura 1 (a)) são suportados pelo sistema de contraventamento em "X". Neste trabalho, admite-se que

as terças estão conectadas a este sistema, atuando como contenção lateral de ambas as mesas do perfil I com espaçamento L_b nas vigas dos pórticos.

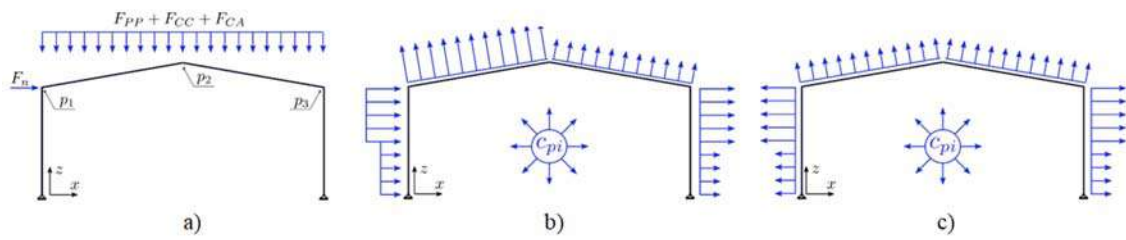


Figura 3 - Pórtico: (a) forças gravitacionais (b) ação CV90° (c) ação CV0°

O carregamento de peso próprio (PP) atua uniformemente nas vigas e colunas no sentido negativo do eixo z e com intensidade $F_{PP} = A_i \gamma_a$, onde A_i é a área da seção transversal da viga ou coluna e $\gamma_a = 77 \text{ kN/m}^3$ é o peso específico do aço. As forças gravitacionais devidas ao peso próprio da cobertura (CP) ou à sobrecarga na cobertura (CA) são aplicadas em projeção vertical sobre as vigas, com magnitude $F_{CP} = \gamma_{CP} e_p$ e $F_{CA} = \gamma_{CA} e_p$, onde γ_{CP} e γ_{CA} são a intensidade desses carregamentos por unidade de área em projeção horizontal. Nas combinações últimas que não contemplam forças laterais, introduz-se uma força nocional (F_n) para representar as imperfeições geométricas globais do pórtico. Esta força é aplicada no topo da coluna, com intensidade correspondente a 0,3% do somatório das forças de gravidade.

A ação do vento sobre a edificação é considerada para os casos de incidência perpendicular ou no plano do pórtico, sendo denominados CV_{0° e CV_{90° , respectivamente. As Figura 3 (b) e (c) ilustram a distribuição da força do vento sobre as superfícies externas e internas do galpão, com intensidade $F_{CV} = q(C_e - c_{pi})e_p$. Os coeficientes de pressão externa e interna C_e e c_{pi} , respectivamente, são tomados conforme as recomendações da NBR6123:1988 (ABNT 1988) em função do ângulo de incidência do vento, do ângulo de inclinação da cobertura (θ) e das proporções $L_g/L_{v\tilde{a}o}$ e $L_c/L_{v\tilde{a}o}$. A pressão dinâmica (q) é quantificada pela mesma norma, sendo dependente da velocidade básica do vento (V_0) e de coeficientes S_1 , S_2 e S_3 , definidos conforme as características da edificação, da região de sua construção ou da altura em relação ao solo.

Os carregamentos considerados para a avaliação da segurança e desempenho da estrutura em função dos estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS),

respectivamente, são definidos por combinações especificadas na NBR8800:2008 (ABNT 2008). A Seção 4 detalha as combinações consideradas neste trabalho.

2.2 Formulação do problema de otimização

A formulação de um problema de otimização com restrições pode ser descrita como

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \quad , \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \\ \text{tal que:} \quad & g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad , i = 1, 2, \dots, n_g \\ & h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad , i = 1, 2, \dots, n_h \\ & x_i \in D_i \end{aligned} \quad (1)$$

O objetivo da otimização é determinar o vetor de variáveis de projeto \mathbf{x} que minimiza o valor da função objetivo ($f(\mathbf{x})$) e que respeita as n_h restrições de igualdade e as n_g restrições de desigualdades, dadas pelas funções $h_i(\mathbf{x})$ e $g_i(\mathbf{x})$, respectivamente. Cada variável x_i pode assumir valores limitados por um intervalo $D_i = [x_i^l, x_i^u]$, para uma variável contínua, ou por um conjunto finito $D_i = \{\bar{x}_i^1, \bar{x}_i^2, \dots, \bar{x}_i^{m_i}\}$ para uma variável discreta, onde \bar{x}_i^j representa um dos m_i valores admissíveis.

Em muitas situações, pode ser interessante resolver o problema dado na Equação (1) com métodos desenvolvidos para tratar de otimização irrestrita. Para isto, efetua-se a solução de um problema irrestrito, que é descrito por uma função objetivo incrementada com penalidades pela violação das restrições presentes na formulação original. Neste trabalho, a função penalizada é definida (ignorando h_i) na Equação (2), onde a penalidade pela violação de cada restrição g_i é dada por um peso w_i , que deve ser ajustado em cada problema, e por G_i , que é função de g_i ($G_i = 0$ para $g_i \leq 0$).

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{n_g} w_i G_i \quad (2)$$

As dimensões das seções transversais dos perfis soldados que formam as vigas e colunas do pórtico (ver Figura 1) são tomadas como variáveis de projeto nos problemas estudados a seguir. Dadas as condições de simetria do pórtico e das seções, se estabelece o vetor composto por 8 variáveis de projeto $\mathbf{x} = \{d_c, d_v, t_{wc}, t_{wv}, b_{fc}, b_{fv}, t_{fc}, t_{fv}\}^T$, onde os subíndices c e v indicam quantidades referentes às colunas e vigas, respectivamente. Em função das limitações construtivas, as espessuras das mesas (t_f) e almas (t_w) são tomadas como variáveis discretas, com valores limitados pelas espessuras das chapas disponíveis comercialmente. As demais

dimensões da seção transversal são tratadas como variáveis contínuas, com limites estabelecidos em função das características de cada projeto.

O peso da estrutura é a medida mais difundida para estimar seu custo de construção, embora não seja necessariamente a mais significativa (Barg et al., 2018). Este trabalho segue esta prática, definindo a função objetivo como a massa total do pórtico simétrico, dada pela Equação (3), onde $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ é a massa específica do aço e as áreas das seções transversais da viga (A_v) e da coluna (A_c), são definidas em função das variáveis de projeto.

$$f(\mathbf{x}) = 2\rho(L_c A_c + L_v A_v) \quad (3)$$

As funções de restrição são definidas a partir dos ELU e ELS que a NBR8800 (ABNT, 2008) atrela a estas estruturas. As funções g_1 e g_2 , dadas nas Equações (4) e (5), são associadas à segurança quanto ao esforço cortante (V) e quanto ao efeito combinado de força normal (N) e momento fletor no plano do pórtico (M), respectivamente. Nessas equações, o subíndice Sd indica o valor solicitante de cálculo, obtido na análise estrutural considerando as combinações últimas e levando em conta efeitos locais de segunda ordem, quando aplicável. Os algoritmos implementados neste trabalho determinam a capacidade resistente dos perfis (designada pelos termos com subíndice Rd) com base nas prescrições da NBR8800 (ABNT, 2008). Todas essas quantidades são função direta ou indireta das variáveis de projeto, embora este artigo não detalhe tais relações.

$$g_1 = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} - 1 \quad (4)$$

$$g_2 = \begin{cases} \frac{N_{c,Sd}}{2N_{c,Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} - 1, & \text{para } \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 0,2 \\ \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{8M_{Sd}}{9M_{Rd}} - 1, & \text{para } \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} > 0,2 \end{cases} \quad (5)$$

Os requisitos de desempenho da estrutura em condição de serviço são dados nas funções de restrição g_3 e g_4 em termos do deslocamento lateral do topo das colunas (d_x , avaliado nos pontos P1 e P3 da Figura 3 (a)) e do deslocamento vertical da cumeeira (d_z , avaliado no ponto P2 da Figura 3 (a)), respectivamente. Estes deslocamentos são determinados pela análise da estrutura submetida a carregamentos dados por

combinações frequentes de serviço. Os limites (d_{xl} e d_{zl}) destes deslocamentos são definidos em cada problema de otimização de acordo com as exigências do projeto.

$$g_3 = \frac{d_x}{d_{xl}} - 1 \quad (6)$$

$$g_4 = \frac{d_z}{d_{zl}} - 1 \quad (7)$$

Por último, são incorporadas as funções g_5 e g_6 que se relacionam a limitações geométricas exigidas no dimensionamento. A restrição dada na Equação (8) visa facilitar a elaboração da ligação viga-coluna, limitando a largura da mesa da viga à da coluna ($b_{fv} \leq b_{fc}$).

$$g_5 = \frac{b_{fv}}{b_{fc}} - 1 \quad (8)$$

A restrição apresentada na Equação (9) assegura que o dimensionamento pelo processo de otimização não resulte em perfis de alma esbelta, pois a formulação para a determinação da capacidade resistente desses elementos não foi implementada nos algoritmos desenvolvidos para esse trabalho.

$$g_6 = \frac{(d-2t_f)/t_w}{5,7\sqrt{E/f_y}} - 1 \quad (9)$$

A penalização da função objetivo pela violação das restrições é dada pela Equação (2) com w_i igual à maior massa possível para a estrutura, obtida tomando o limite superior de cada variável. O efeito da violação de cada restrição é dado por:

$$G_i = \sum_{j=1}^{n_{cu}} \left(\max(0, g_i^{v,j}) + \max(0, g_i^{c,j}) \right), \quad i = 1,2 \quad (10)$$

$$G_i = \max(0, g_i), \quad i = 3,4,5 \quad (11)$$

$$G_6 = \max(0, g_6^v) + \max(0, g_6^c) \quad (12)$$

onde n_{cu} é o número de combinações últimas consideradas no dimensionamento e os superíndices v e c indicam quantidades relativas às vigas ou colunas, respectivamente.

3 Algoritmos meta-heurísticos de otimização

Os algoritmos meta-heurísticos são uma classe especial de algoritmos estocásticos, reconhecidos por sua eficiência na resolução de problemas de otimização complexos onde requisitos de suavidade, continuidade e convexidade não podem ser garantidos

(Yang, 2014). Muitos deles são baseados em uma população de soluções que evoluem e contém em sua formulação operadores estocásticos. Quando comparados a métodos tradicionais baseados em gradientes, estes algoritmos costumam ser mais robustos, conseguindo escapar de ótimos locais. O valor da função objetivo é a única informação necessária para o processo de evolução da população de soluções, mas estes métodos requerem uma pesquisa de muitos pontos no espaço de resposta, o que pode significar elevada demanda computacional. Por esta razão, é importante avaliar a eficiência dos algoritmos em cada problema, bem como o melhor ajuste dos parâmetros, identificando qual é a metodologia de suporte ao dimensionamento estrutural mais adequada.

As próximas seções apresentam sucintamente os algoritmos meta-heurísticos considerados neste trabalho. O principal objetivo destas seções é identificar os operadores adotados em cada método e os parâmetros que serão definidos nos exemplos. Uma descrição mais detalhada de cada algoritmo pode ser obtida nos trabalhos de referência citados ao longo do texto. Os operadores estocásticos serão descritos nas próximas seções com auxílio da função $u(\mathcal{S})$, que seleciona um dos elementos do conjunto \mathcal{S} de forma aleatória e com mesma probabilidade. As notações $\mathcal{S} = [a, b]$ e $\mathcal{S} = [a .. b]$ indica o conjunto dos números reais e dos números inteiros, respectivamente, entre a e b ($a < b$). Um conjunto com n itens discretos é definido por $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$. A notação $u(\)$ será empregada para representar $u([0, 1])$ de forma mais concisa. A função $Melhor(\mathcal{S})$ retorna o melhor elemento de \mathcal{S} . Nesse trabalho, x^i é melhor que x^j se $\hat{f}(x^i) < \hat{f}(x^j)$. Um ponto aleatório é obtido pela escolha aleatória do valor de cada uma das suas variáveis por $x_i = u(D_i)$.

Não existe um critério de convergência definido para os algoritmos meta-heurísticos considerados neste trabalho. Nas seções que seguem, o critério de parada pode se referir a qualquer condição estabelecida para a interrupção da busca. Os critérios mais comuns indicam encerramento quando o algoritmo atinge: I) *número máximo de iterações admitidas* II) *número máximo de iterações admitidas sem modificação da melhor solução* ou III) *número máximo admitido de avaliações da função objetivo*. O último critério foi adotado nos exemplos apresentados na Seção 4.

3.1 Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos (GA de *Genetic Algorithms*) são um dos mais populares algoritmos meta-heurísticos em termos de diversidade de aplicações (Yang, 2014). Ele foi desenvolvido por Holland e colaboradores nas décadas de 60-70 como um modelo de abstração da evolução biológica baseada da teoria da Seleção Natural de Charles Darwin (Goldberg, 2006). Neste modelo, os indivíduos de uma população representam cada solução do problema, cujo vetor de variáveis se equivale à informação genética. Soluções potencialmente melhores são criadas por operadores que têm equivalência em processos biológicos como seleção, recombinação e mutação. Os passos do GA são descritos simplificadaamente por:

1. Criar uma população inicial (S_p) aleatória com n_p indivíduos
2. Formar população de pais (S_g) com n_g indivíduos de S_p : usar os n_e melhores indivíduos (elite) e completar por seleção aleatória
3. Seleção: escolher dois indivíduos (x^1 e x^2) em S_g por sorteio, com chance de seleção definida com base em f
4. Recombinação uniforme: se $u(\cdot) \leq p_c$; $x_i^{\text{nov}} \leftarrow r_i x_i^1 + (1 - r_i) x_i^2$, com $r_i = u(\cdot)$; senão $x^{\text{nov}} \leftarrow x^1$
5. Mutação: para cada variável i , se $u(\cdot) \leq p_m$; $x_i^{\text{nov}} \leftarrow u(D_i)$
6. Incrementar a população de filhos ($S_c \leftarrow S_c \cup x^{\text{nov}}$) e retornar a 3. se S_c tem menos de $n_p - n_g$ indivíduos
7. População da nova geração: $S_p \leftarrow S_g + S_c$
8. Parada: encerrar se o critério de parada é satisfeito ou retornar ao passo 2. para nova iteração

O número de indivíduos que formam a população em cada geração (n_p), bem como o número de indivíduos na população de pais (n_g) e de elite (n_e), são parâmetros do algoritmo e devem respeitar a relação $n_e \leq n_g \leq n_p$. Além destes, também devem ser definidos $p_c, p_m \in [0, 1]$ que ditam a probabilidade de recombinação (passo 4) e mutação (passo 5) na criação de novos indivíduos.

3.2 Otimização por Enxame de Partículas

A otimização por enxame de partículas (PSO, de *Particle Swarm Optimization*) é um algoritmo estocástico baseado na inteligência de enxame, que se observa em agrupamentos naturais de insetos, pássaros ou peixes (Yang, 2014). Neste algoritmo, a

cada instante uma partícula ocupa uma posição \mathbf{x} que representa um ponto avaliado no espaço de resposta. A busca pela solução ótima do problema se dá pelo movimento do conjunto de partículas, que se deslocam no espaço de resposta guiadas por experiências individuais e coletivas do enxame. O algoritmo PSO é descrito de forma sucinta pelos seguintes passos:

1. Criar um enxame inicial (\mathcal{S}_p) com n_p partículas com posição aleatória
2. Melhor posição de cada partícula j : $\bar{\mathbf{x}}^j \leftarrow \text{Melhor}(\bar{\mathbf{x}}^j, \mathbf{x}^j)$
3. Melhor posição do enxame: $\hat{\mathbf{x}} \leftarrow \text{Melhor}(\bar{\mathbf{x}}^1, \bar{\mathbf{x}}^2, \dots, \bar{\mathbf{x}}^{n_p})$
4. Velocidade de cada partícula j :

$$\mathbf{v}^j \leftarrow \chi \left[w\mathbf{v}^j + c_1 r_1 (\bar{\mathbf{x}}^j - \mathbf{x}^j) + c_2 r_2 (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^j) \right], \text{ com}$$

$$\phi = \max(c_1 + c_2, 4), \chi = \frac{2K}{|2 - \phi - \sqrt{\phi(\phi - 4)}} \text{ e } r_1, r_2 \leftarrow u(), u()$$

5. Posição de cada partícula j : $\mathbf{x}^j \leftarrow \mathbf{x}^j + \mathbf{v}^j$
6. Parada: encerrar se o critério de parada é satisfeito ou retornar ao passo 2 para nova iteração

Os parâmetros c_1 e c_2 definem a influência de $\bar{\mathbf{x}}^j$ (componente cognitivo) e $\hat{\mathbf{x}}$ (componente social), respectivamente, na direção do movimento da partícula. O momento da partícula (w) é o parâmetro que regula a tendência de manutenção da velocidade atual, como o efeito inercial em uma partícula real. Os números aleatórios r_1 e r_2 , gerados independentemente, inserem o componente estocástico na busca pela melhor posição. O parâmetro $K \in [0, 1]$ afeta a amplitude do vetor velocidade da partícula.

3.3 Busca Harmônica

A busca harmônica (HS, do inglês *Harmony Search*) foi criado por Geem e Kim (2001) com o objetivo de desenvolver um algoritmo melhor para a resolução de problemas com variáveis discretas em comparação com os algoritmos meta-heurísticos tradicionais, baseado no fenômeno artificial de harmonia musical (Yang, 2014). Neste algoritmo, um conjunto de harmonias com número de elementos definido pelo parâmetro (HMS, de *Harmony Memory Size*) é armazenada em uma memória (HM, de *Harmony Memory*) que serve de base para a criação de novas soluções. Neste processo, são aplicadas

operações que definem se uma nova harmonia é gerada baseada em valores presentes na HM ou se uma variável de projeto recebe um valor aleatório dentro do seu conjunto de intervalo (D_i). A cada iteração, apenas uma harmonia é formada. As etapas do HS são descritas resumidamente por:

1. Criar uma memória inicial (S_p) com HMS harmonias aleatórias
2. Nova harmonia: para cada nota i , se $u(\) \leq \text{HMCR}$: $x_i^{\text{nov}} \leftarrow x_i^j$, com $x^j = u(S_p)$; senão $x_i^{\text{nov}} \leftarrow u(D_i)$
3. Ajuste: para cada nota i , se $u(\) \leq \text{PAR}$: $x_i^{\text{nov}} \leftarrow x_i^{\text{nov}} + u([-b_w, b_w])$
4. Atualização da memória: x_i^{nov} substitui o pior ponto na memória quando isso implica na melhora das soluções armazenadas.
5. Parada: encerrar se o critério de parada é satisfeito ou retornar a 2 para nova iteração

Além do tamanho da memória (HMS), devem ser definidos os parâmetros taxa de uso das harmonias da memória (HMCR, de *Harmony Memory Consideration Rate*) e taxa de ajuste das notas (PAR de *Pitch Adjustment Rate*), com HMCR e PAR $\in [0, 1]$. O ajuste aplicado às notas na improvisação tem sua amplitude máxima definido pelo parâmetro b_w (de *bandwidth*). Obviamente, a operação descrita na etapa 3 deve resultar em um valor válido para a variável ($x_i^{\text{nov}} \in D_i$).

4 Exemplos

Os exemplos apresentados nas seções seguintes compartilham algumas características. Em todos os casos, admite-se que o pórtico tem base rotulada, é constituído de aço AR350 (ABNT 2008), com altura do pilar $L_c = 6\text{m}$, ângulo de inclinação da cobertura $\theta = 10^\circ$ e espaçamento entre pórticos $e_p = 6\text{m}$. Os exemplos também consideram os fatores $S_1 = 1,0$ e $S_3 = 0,95$ na determinação dos efeitos do vento sobre a estrutura e as mesmas proporções para os deslocamentos limites com $d_{xl} = L_c/250$ e $d_{zl} = L_{v\tilde{a}o}/300$. Os carregamentos devidos ao peso da cobertura e à sobrecarga são $\gamma_{CA} = \gamma_{CP} = 0,25\text{kN/m}^2$. A Tabela 1 mostra os coeficientes adotados nas combinações últimas normais (CN) e nas combinações frequentes de serviço (CF), elaboradas segundo as recomendações da NBR8800 (ABNT, 2008) para as verificações de segurança e desempenho que foram definidas pelas restrições do problema na Seção 2.2. Um total

de 13 combinações CN e CF foram elaboradas, onde os coeficientes de ponderação são indicados para cada tipo de carregamento. O símbolo ✓ indica que a ação do vento está incluída na combinação, com coeficiente de ponderação 1,4 para CN e fator de redução 0,3 para CF.

Tabela 1 – Coeficientes de ponderação das ações

Comb.	PP + CP		CA		CV _{90°} (<i>c_{pi}</i>)			CV _{0°} (<i>c_{pi}</i>)		
	CN	CF	CN	CF	(0)	(0,2)	(-0,3)	(0)	(0,2)	(-0,3)
1*	1,25	1	1,5	0,7						
2	1,25	1	1,50x0,80	0,6				✓		
3	1	1						✓		
4	1,25	1	1,50x0,80	0,6	✓					
5	1	1			✓					
6	1,25	1	1,50x0,80	0,6					✓	
7	1	1							✓	
8	1,25	1	1,50x0,80	0,6			✓			
9	1	1					✓			
10	1,25	1	1,50x0,80	0,6		✓				
11	1	1				✓				
12	1,25	1	1,50x0,80	0,6						✓
13	1	1								✓

* CN-1 inclui a força nocional com majoração $1,4 \times F_n$

Os valores admissíveis para as variáveis de projeto são $d = [150, 1000]$, $b_f = [100, 700]$ e $t_f = t_w = \{4,75; 6,3; 8; 9,5; 12,5; 16; 19; 22,4; 25\}$ (valores em mm). Os subíndices v e c , que designam variáveis associadas às seções transversais das vigas e colunas, respectivamente, foram omitidos porque os limites se aplicam a ambas.

4.1 Comparação entre algoritmos de otimização

Esta seção apresenta um experimento numérico para uma análise comparativa do desempenho dos algoritmos meta-heurísticos descritos na Seção 3 em relação ao problema de engenharia abordado neste trabalho. Além das características comuns a todos os exemplos discutidos neste artigo, o pórtico adotado para comparação dos algoritmos tem vão com comprimento $L_{v\grave{a}o} = 15$ m e as contenções ao deslocamento lateral nas vigas têm afastamento $L_b = 2,55$ m (ver Figura 1 (b)). O dimensionamento considera a velocidade básica do vento $V_0 = 40$ m/s.

As comparações são feitas com base no resultado de 10 otimizações independentes para cada teste realizado. Para uniformizar o esforço computacional despendido, cada processo de otimização foi interrompido ao atingir 1296 avaliações da função objetivo.

O número de avaliações foi definido de forma que cada execução do algoritmo de otimização durasse por volta de 40 min em um computador convencional¹. Para cada algoritmo, foram elaborados dois testes com número total de iterações diferentes, visando identificar a influência desse parâmetro sobre o desempenho. Os valores adotados para os parâmetros dos algoritmos em cada teste estão definidos na Tabela 2. O momento da partícula (w) do algoritmo PSO é o único parâmetro que variou linearmente de forma decrescente com o número de iterações.

Tabela 2 - Parâmetros dos algoritmos

Teste	n_p , HMS	N_{iter}	Parâmetros comuns dos algoritmos meta-heurísticos
GA1	16	160	$p_c = 0,85; p_m = 0,1; \frac{n_g}{n_p} = 0,50; n_e/n_p = 0,1$
GA2	32	79	
PSO1	8	162	$c_1 = c_2 = 2; w = 0,875 \rightarrow 0,30$
PSO2	16	81	
HS1	8	1288	$HMCR = 0,90; PAR = 0,10$ $b_{wi}/(x_i^U - x_i^L) = 0,1$ p/ x_i contínua ou $b_{wi} = 1$ p/ x_i inteira
HS2	16	1280	

A melhor solução encontrada em cada um dos testes é apresentada na Tabela 3 em termos do valor das variáveis de projeto, da função objetivo e das restrições críticas associadas aos ELU e ELS. A espessura das mesas e almas dos perfis que formam as vigas e colunas resultaram sistematicamente nos menores valores possíveis. Por outro lado, a largura das mesas e a altura total dos perfis variaram bastante, mesmo para soluções que resultam em massa total semelhante. Isso indica que o problema pode ter múltiplos ótimos globais. As soluções têm ao menos uma das restrições muito próximo da ativação ($1 + g_i > 0,99$), indicando que a redução da massa foi efetuada até atingir as limitações impostas ao projeto. Em termos dos ELU, a restrição crítica foi a relacionada à segurança à flexocompressão (g_2) cujo valor máximo foi observado para as solicitações obtidas na combinação CN-11. Os limites de desempenho também foram determinantes, sendo o deslocamento lateral excessivo (g_3) crítico na combinação de serviço CF-8.

¹ Laptop com processador Intel i7-8759H@2.2GHz e 16 GB de memória RAM.

Tabela 3 - Características da melhor solução de cada teste

Teste	viga (mm)				coluna (mm)				f (kg)	$1 + g_2$	$1 + g_3$
	d_v	t_{wv}	t_{fv}	b_{fv}	d_c	t_{wc}	t_{fc}	b_{fc}			
GA1	328,6	4,75	6,3	149,0	323,5	4,75	6,3	211,2	793,8	0,86	0,99
GA2	346,9	4,75	4,75	132,9	372,3	4,75	6,3	204,9	746,8	0,996	0,935
PSO1	388,9	4,75	4,75	119,6	315,8	4,75	6,3	208,8	734,8	0,909	0,999
PSO2	350,2	4,75	4,75	137,6	471,7	4,75	4,75	200,9	736,3	1	0,806
HS1	391,4	4,75	4,75	122,6	320,0	4,75	6,3	203,6	735,3	0,962	0,981
HS2	328,4	4,75	6,3	109,8	375,6	4,75	6,3	194,7	738,3	0,991	0,987

O teste PSO1 obteve a solução com menor massa, sendo assumida como solução ótima global para fins de comparação entre os algoritmos. A Tabela 4 mostra o valor mínimo (w_{\min}), médio ($w_{\text{méd}}$) e máximo (w_{\max}) da massa das soluções encontradas nas 10 otimizações em cada teste, normalizado pelo mínimo global ($w_{ot} = 734,8$ kg), além do coeficiente de variação (CV) dessa quantidade na amostra. Se observa que, apesar do PSO apresentar w_{\min} excelentes nos dois testes, o $w_{\text{méd}}$ e CV são elevados, indicando que existe grande chance de uma solução ruim ser obtida em uma única otimização. O GA não foi capaz de obter soluções quase-ótimas (com $w \leq 1,005w_{ot}$), embora apresente $w_{\text{méd}}$ e CV melhores do que o PSO. Por outro lado, o HS obteve soluções muito próximas à ótima, apresentando simultaneamente boa confiabilidade, com $w_{\text{méd}}$ e CV inferiores aos dois demais algoritmos. Este algoritmo também mostrou pouca sensibilidade aos parâmetros atribuídos nos testes, embora as configurações usadas no HS1 tenham levado a um comportamento mais robusto, com valores menores de w_{\min} , w_{\max} e CV.

Tabela 4 - Desempenho dos algoritmos

Teste	w_{\min}/w_{ot}	$w_{\text{méd}}/w_{ot}$	w_{\max}/w_{ot}	CV(%)
GA1	1,080	1,139	1,262	4,77
GA2	1,016	1,123	1,208	5,21
PSO1	1,00	1,207	1,645	18,1
PSO2	1,002	1,267	2,180	27,5
HS1	1,001	1,048	1,095	2,87
HS2	1,005	1,045	1,106	3,20

4.2 Estudo paramétrico

Esta seção apresenta a aplicação da técnica de otimização ao dimensionamento de um conjunto de pórticos. O objetivo deste estudo paramétrico é investigar como a metodologia proposta se adapta a problemas envolvendo pórticos com diferentes características e, de forma secundária, avaliar como a massa mínima do pórtico varia em função de algumas características do projeto. O algoritmo HS foi selecionado para este

estudo em função do bom resultado observado nos testes apresentados na seção anterior.

São considerados problemas de otimização de pórticos que se distinguem do exemplo anterior pelo vão livre ($L_{v\grave{a}o}$) e pela velocidade básica do vento no projeto (V_0). Ao todo, são estudados 12 casos combinando vãos $L_{v\grave{a}o} = 15, 25, 35$ e 45 m e velocidades $V_0 = 35, 40,$ e 45 m/s. Cada caso é identificado por Pxx-yy, onde xx indica $L_{v\grave{a}o}$ em metros e yy indica V_0 em m/s. Desta maneira, P15 se refere a um pórtico com vão de 15 m e P15-45 se refere a esse pórtico considerando vento com $V_0 = 45$ m/s.

São executadas 3 otimizações independentes para cada caso, usando os parâmetros definidos para HS1 na Tabela 2. A única exceção é o caso P15-40, cujo resultado obtido por 10 otimizações foi mostrado na seção anterior. A melhor solução encontrada para cada caso estudado é apresentada na Tabela 5 em termos das variáveis de projeto e da função objetivo.

Uma tendência muito clara de evolução da massa como uma função não linear do vão pode ser vista na Figura 4. Também se observa que, em comparação com a variação do vão, a alteração da velocidade do vento tem efeito reduzido sobre a massa total da solução otimizada para as estruturas consideradas. Em geral, as almas dos perfis apresentaram a menor espessura possível enquanto as outras variáveis têm valor crescente conforme o vão aumenta. As seções transversais das colunas também costumam ter uma área superior à das vigas nas soluções encontradas pelo algoritmo, o que é compreensível, considerando que o último elemento tem maior influência na massa total, pois $L_v > L_c$.

Os casos de projeto P25 e P45-40 foram os únicos em que a melhor solução encontrada com um total de 1296 avaliações da função objetivo foi insatisfatória. Em uma única otimização com um total de 2000 avaliações de $f(x)$, o algoritmo HS obteve soluções com restrições ativas ou quase-ativas nestes quatro casos de projeto (Tabela 6). Essas análises indicam que, em alguns casos e para uma quantia fixa de esforço computacional, executar uma única otimização com um número grande de avaliações de $f(x)$, pode ser melhor do que realizar diversas otimizações independentes com menos avaliações de $f(x)$.

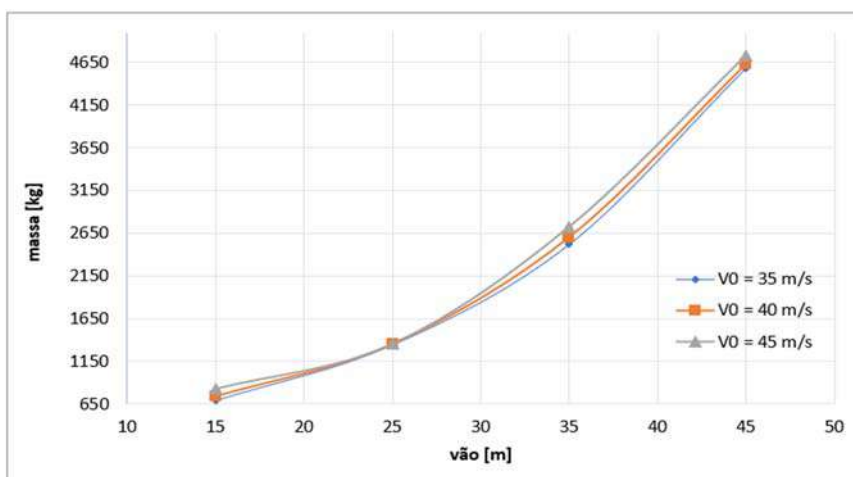


Figura 4 - Massa das soluções otimizadas

Tabela 5 - Característica da solução ótima de cada caso

Caso de Projeto	Viga (mm)				Coluna (mm)				f (kg)
	d_v	t_{wv}	t_{fv}	b_{fv}	d_c	t_{wc}	t_{fc}	b_{fc}	
P15-35	325,1	4,75	4,75	113,9	346,3	4,75	6,3	200,7	696,1
P15-40	391,4	4,75	4,75	122,6	320,0	4,75	6,3	203,6	735,3
P15-45	377,7	4,75	6,3	114,1	431,8	4,75	6,3	218,9	826,6
P25-35*	523,0	4,75	6,3	130,7	413,7	4,75	8,0	236,9	1346,2
P25-40*	545,2	4,75	6,3	127,8	386,3	4,75	8,0	238,2	1349,6
P25-45*	537,3	4,75	6,3	132,7	391,2	4,75	8,0	235,0	1351,8
P35-35	657,6	4,75	9,5	178,9	628,2	4,75	9,5	254,9	2523,5
P35-40	645,7	4,75	9,5	173,2	712,3	6,3	9,5	245,3	2599,1
P35-45	616,5	4,75	9,5	203,9	797,0	6,3	8,0	258,3	2725,2
P45-35	871,4	6,3	9,5	221,1	848,5	6,3	12,5	282,2	4586,4
P45-40*	876,9	6,3	9,5	220,9	849,1	6,3	16,0	231,3	4626,5
P45-45	888,8	6,3	16,0	140,1	848,9	6,3	12,5	296,0	4730,3

* Número de avaliações de f(x) igual a 2000.

A Tabela 6 mostra que praticamente todas as soluções apresentaram uma ou mais restrições quase-ativas. A restrição que restringe perfis de alma esbelta (g_6) tem papel importante no projeto dos pórticos com maiores vãos, quando os perfis assumem dimensões maiores. O carregamento do vento, incluído na CN-11, só é determinante para as restrições associadas ao ELU (g_2) nos casos P15-40, P15-45 e P25-45. Nos demais casos, as condições críticas associadas à segurança à flexocompressão foram encontradas na CN-1, que apresenta a maior intensidade das forças gravitacionais. De forma condizente com o que se observa na prática do projeto desse tipo de estrutura, a ação do vento, presente na CF-8, tem papel fundamental na limitação do deslocamento lateral (restrição g_3), que se encontra ativa (ou quase) nos P15, P35 e P45. Os P25 são os únicos pórticos em que a restrição mais crítica associada ao ELS é a que limita o deslocamento vertical na cumeeira (g_4), além de ter o maior deslocamento lateral (d_x)

na CF-1, que não apresenta força de vento lateral (conforme Tabela 6). Essa peculiaridade pode ser entendida observando o padrão de deformações decorrente das forças gravitacionais ou da incidência lateral do vento na Figura 5.

Tabela 6 - Restrições críticas na solução ótima em cada caso

Caso de Projeto	Viga			Coluna			d_x		d_z	
	CN	$1 + g_2$	$1 + g_6$	CN	$1 + g_2$	$1 + g_6$	CF	$1 + g_3$	CF	$1 + g_4$
P15-35	1	0,934	0,49	1	0,974	0,52	8	1,00	1	0,91
P15-40	11	0,812	0,59	11	0,962	0,48	8	0,98	1	0,71
P15-45	11	0,944	0,57	11	0,957	0,65	8	0,79	1	0,54
P25-35*	1	0,987	0,79	1	0,899	0,62	1	0,861	1	0,999
P25-40*	1	0,951	0,81	1	0,940	0,56	1	0,862	1	0,999
P25-45*	11	0,956	0,81	11	0,983	0,58	1	0,862	1	1,00
P35-35	1	0,854	0,99	1	0,889	0,94	8	0,97	1	0,80
P35-40	1	0,896	0,97	1	0,998	0,81	8	1,00	1	0,77
P35-45	1	0,936	0,92	1	0,944	0,91	8	1,00	1	0,74
P45-35	1	0,908	0,99	1	0,646	0,96	8	0,98	1	0,61
P45-40*	1	0,884	1,00	1	0,691	0,95	8	1,00	1	0,61
P45-45	1	0,896	1,00	1	0,643	0,96	8	0,99	1	0,58

* Número de avaliações de $f(x)$ igual a 2000.

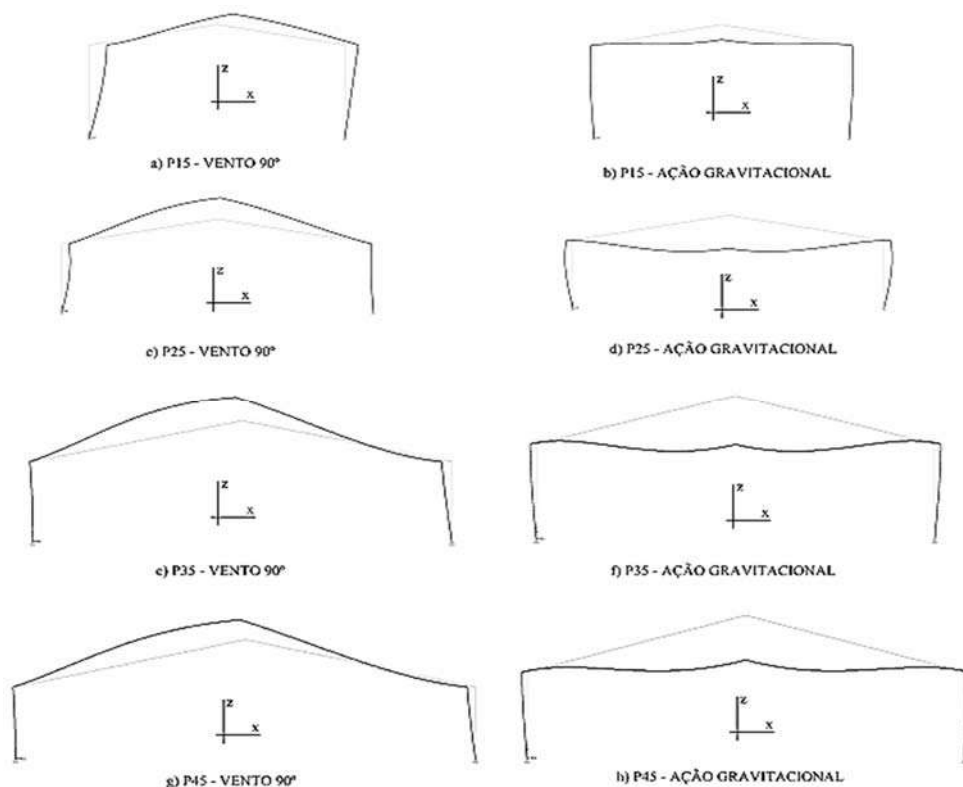


Figura 5 – Deformadas (magnificadas) por vento lateral (CV_{90°) e ação gravitacional

Como esperado, os topos dos pilares sempre se afastam do centro do pórtico pela ação das forças gravitacionais. Por outro lado, o deslocamento lateral devido à ação do vento muda com o vão do pórtico. No P15, os deslocamentos ocorrem no sentido positivo do

eixo x , enquanto deslocamentos no sentido oposto são observados para os P35 e P45. No caso do P25 o deslocamento lateral pelo efeito do vento é quase nulo. Como se observa pela distribuição de forças na Figura 3 (b), a componente horizontal da resultante das forças na cobertura se opõe à resultante das forças sobre as colunas. Conforme o vão aumenta, a resultante total da força de vento passa do sentido positivo do eixo x para o sentido negativo, o que se reflete nos deslocamentos laterais observados. O vão de 25 m corresponde ao estágio de transição, quando essa resultante é praticamente nula, levando a deslocamentos laterais pouco significativos.

Deve-se destacar que as otimizações foram realizadas empregando análise linear e incorporando o efeito local de segunda ordem aos esforços de flexão por meio do coeficiente $B1$, dado pelo método da amplificação dos esforços descrito no anexo D da NBR8800 (ABNT, 2008). Para as soluções reportadas na Tabela 4, a amplificação máxima dos esforços foi de 1% para pilares e 4% para vigas. Após a conclusão das otimizações, estas soluções foram analisadas considerando efeitos globais de segunda ordem. Constatou-se que a razão entre os deslocamentos laterais observados em análise de segunda ordem ($d_{x,2}$) não excedem em mais de 5,5 % os deslocamentos laterais obtidos em análise de primeira ordem (d_x). Com isso, as soluções obtidas se enquadram como estruturas de pequena deslocabilidade, para as quais a determinação dos efeitos de segunda ordem é dispensada pela NBR8800 (ABNT, 2008). Isso valida a estratégia descrita no trabalho, que emprega apenas análise linear, evitando uma excessiva carga computacional na otimização.

5 Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho se mostrou uma ferramenta viável para o auxílio no projeto de pórticos de galpões industriais. A expressão do dimensionamento como um problema de otimização constitui parte fundamental da estratégia. Como foi demonstrado, vários algoritmos meta-heurísticos podem ser aplicados para a resolução do problema de otimização, mas a determinação das alternativas mais eficientes é um tópico a ser continuamente examinado. *Softwares* comerciais de análise estrutural com aplicação consolidada nas atividades de projeto, podem ser incorporados à estratégia uma vez que grande parte deles dispõem de APIs para integração com outros programas, o que facilita a troca de informações.

6 Referências bibliográficas

- ABNT. “NBR6123:1988 - **Forças Devidas ao Vento em Edificações.**” Standard. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1988.
- ABNT. “NBR8800:2008 - **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.**” Standard. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008.
- Almeida, F. S. de, Vargas, G. D.; Braun, E. “**Aplicação do Algoritmo Harmony Search no Dimensionamento de Perfis I Soldados.**” *Revista da Estrutura de Aço* 8: 294-310. 2019.
- Barg, S.; Flager, F.; Fischer, M. “**An Analytical Method to Estimate the Total Installed Cost of Structural Steel Building Frames during Early Design.**” *Journal of Building Engineering* 15: 41–50. 2018.
- Bellei, I. H. *Edifícios Industriais em Aço*. 5. ed. São Paulo: Pini. 2006.
- COMPUTERS & STRUCTURES. “**CSI API Documentation.**” 2018.
- Dogan, E.; Saka, M. P. “**Optimum Design of Unbraced Steel Frames to LRFD– AISC Using Particle Swarm Optimization.**” *Advances in Engineering Software* 46 (1): 27– 34. 2012.
- Fu, J. Y., J. R. Wu, C. C. Dong, A. Xu; Pi, Y.-L. “**Optimization Design of Large Span Portal-Rigid Steel Frame with Tapered Sections Under Wind-Induced Drift Constraint.**” *Engineering Structures* 194: 396–405. 2019.
- Geem, Z. W.; Joong, H. K.; Loganathan, G. V. “**A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search.**” *SIMULATION* 76 (2): 60–68. 2001.
- McKinstry, R.; LIM, J. B.P.; Tanyimboh, T. T.; Phan, D. T.; Sha, W. “**Optimal Design of Long-Span Steel Portal Frames Using Fabricated Beams.**” *Journal of Constructional Steel Research* 104: 104–14. 2015
- McKinstry, R.; LIM, J. B.P.; Tanyimboh, T. T.; Phan, D. T.; Sha, W. **Comparison of Optimal Designs of Steel Portal Frames including Topological Asymmetry considering Rolled, Fabricated and Tapered Sections.** ScienceDirect. *Engineering Structures* 111: 505–24. 2016.
- Oliveira, P. C. G. P.; Falcón, G. A. S. “**Dimensionamento Ótimo de Pórtico de Aço considerando Ligações Semirrígidas e Análise Não Linear Geométrica.**” *Revista da Estrutura de Aço* 9: 281–300. 2020.
- Phan, D. T.; Lim, James B. P.; Tanyimboh, Tiku T.; Lawson, R. Mark; Xu, Yixiang; Martin, Steven; Sha, Wei. 2013. “**Effect of Serviceability Limits on Optimal Design of Steel Portal Frames.**” *Journal of Constructional Steel Research* 86: 74–84.
- Solgi, R. M. “**Geneticalgorithm.**” PyPI, 2020.
- Yang, X. S. 2014. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Oxford: Elsevier.