

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Giovanni Silveira Brasil

**OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE AÇO DE GALPÕES POR
MÉTODOS METAHEURÍSTICOS**

Porto Alegre
2022

GIOVANNI SILVEIRA BRASIL

Otimização de pórticos de aço de galpões por métodos metaheurísticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Orientador: Felipe Schaedler de Almeida

Orientador: Herbert Martins Gomes

Porto Alegre
2022

Giovanni Silveira Brasil

**OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE AÇO DE GALPÕES POR
MÉTODOS METAHEURÍSTICOS**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de abril de 2022

Prof. Felipe Schaedler de Almeida
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul (UFRGS)

orientador

Prof. Herbert Martins Gomes
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul (UFRGS)

orientador

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Enio Carlos Mesacasa Júnior - UFRGS
Dr. Pela Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Gustavo Prates Mezzomo - UFRGS
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Ignacio Iturrioz - UFRGS
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel - UFRGS
Dra. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho a minha família e namorada pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação aos estudos e a produção deste trabalho.

Ao Prof. Felipe Schaedler de Almeida, orientador deste trabalho, por toda sua disposição, colaboração e apoio.

Ao Prof. Herbert Martins, orientador deste trabalho, por toda sua disposição, colaboração e apoio.

À minha mãe, a quem devo tudo, por todo incentivo, apoio e compreensão.

À minha namorada por toda compreensão nos diversos momentos em que foi privada da minha presença.

A todos os amigos e professores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

“Há três caminhos para o fracasso: não ensinar o que se sabe, não praticar o que se ensina, e não perguntar o que se ignora.”

Autor:
Monge São Beda

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o dimensionamento ótimo de pórticos rígidos de aço comumente encontrados em edificações industriais. É proposta uma metodologia que integra o programa comercial SAP2000 de análise estrutural com algoritmos de otimização metaheurísticos. O estudo trata de pórticos planos de vão único, simétricos e com cobertura inclinada, formados por colunas e vigas em perfis I soldados, em que as seções transversais desses elementos são otimizadas com o objetivo de minimizar o consumo de aço. O projeto dos pórticos considera a aplicação de cargas permanentes e de serviço, incluindo cargas de vento de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988). O processo de dimensionamento dos pórticos é formulado como um problema não linear, em que as restrições de projeto para as combinações de carregamentos verificam os Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS) de acordo com as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008). A altura total do perfil e a largura das mesas são consideradas como variáveis contínuas, enquanto as espessuras das chapas da alma e da mesa são limitadas a valores comerciais. Inicialmente é apresentado um estudo de desempenho dos algoritmos metaheurísticos *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Harmony Search* (HS) para o projeto ótimo de pórtico plano. Em seguida, o algoritmo *Harmony Search* (que obteve o melhor desempenho) foi empregado para a otimização de pórticos com vãos entre 15 e 45 m e submetidos a ações de vento com velocidades básicas entre 35 e 45 m/s. Por fim, o estudo foi estendido à otimização de pórticos com elementos não prismáticos, obtidos pela variação linear da altura total dos perfis I. Os resultados obtidos nos experimentos numéricos indicam que a redução da massa é limitada pelo deslocamento lateral excessivo do pórtico, verificado em combinações de serviço que incluem a ação do vento. Como esperado, os algoritmos metaheurísticos foram eficientes para a obtenção de soluções quase-ótimas, mas apresentam convergência lenta e baixa confiabilidade para a determinação da solução ótima global. O emprego de elementos não-prismáticos proporciona uma economia média de aço entre 8% e 15%, sendo mais relevantes para pórticos com vãos maiores. No entanto, os elementos não-prismáticos são mais suscetíveis aos efeitos de segunda ordem local, devendo receber adequada atenção. Os pórticos estudados podem ser classificados como de pequena deslocabilidade, e os efeitos P-Delta não provocam aumento nos esforços internos dos elementos maiores que 2%.

Palavras-chave: Estruturas de aço, otimização estrutural, elementos não-prismáticos.

ABSTRACT

This work presents a study on the optimal design of rigid steel frames commonly found in industrial buildings. A methodology is proposed that integrates a commercial program of structural analysis with metaheuristic optimization algorithms. The study deals with single-span, symmetrical and sloping roof frames, formed by columns and beams fabricated from built-up welded I-shaped sections with rigid connections, in which the cross sections of these elements are optimized to minimize steel consumption. The portal frame design considers the application of dead and live loads, including wind loads according to NBR 6123 (ABNT, 1988). The portal frame design process is formulated as a non-linear problem, in which the design constraints for the loading combinations verify the Ultimate Limit States (ELU) and Service Limit States (ELS) according to the recommendations of NBR 8800 (ABNT, 2008). The total height of the section and the width of the flanges are considered as continuous variables, while the thicknesses of the web and flanges are limited to commercial values. Initially, a study on the performance of metaheuristic algorithms for the optimal design of a plane portal frame is presented. Then, the Harmony Search algorithm was used to optimize portal frames with spans between 15 and 45 m and subjected to wind actions with characteristic speeds between 35 and 45 m/s. Finally, the study was extended to the optimization of portal frames with non-prismatic elements, obtained by the linear variation of the total height of the I section. The results obtained in the numerical experiments indicate that the mass reduction is limited by the excessive lateral displacement of the portal frame, verified in service combinations that include wind actions. As expected, the metaheuristic algorithms were efficient to obtain quasi-optimal solutions, but they present slow convergence and low reliability for the determination of the global optimal solution. The use of non-prismatic elements provides an average steel saving of between 8% and 15%, being more relevant for frames with larger spans. However, non-prismatic elements are more susceptible to local second-order effects and should receive adequate attention. The studied frames can be classified as having small displaceability, and the P-Delta effects do not cause an increase in the internal forces of the elements greater than 2%.

Keywords: Steel structures, structural optimization, non-prismatic elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Exemplo de estrutura de treliça 3D	28
Figura 2 Estrutura aporticada de 2 pavimentos e 3 vãos	29
Figura 3 Edificação de aço modelo 3D	30
Figura 4 Modelo de estrutura e carregamento analisado por Kravanja e Zula (2010)	30
Figura 5 Modelo de pórtico com mísulas de beirais	31
Figura 6 Pórtico de elementos não-prismáticos	32
Figura 7 Modelo de pórtico analisado por Chen e Hu (2008)	32
Figura 8 Pórtico assimétrico com elementos não-prismáticos.....	33
Figura 9 Modelo de pórtico de Kaveh and Ghafari (2019).....	34
Figura 10 Modelo de pórtico de vão duplo	35
Figura 11 Número de variações das alturas das seções: a) 6, b) 5 e c) 3.....	35
Figura 12 Relação da teoria genética com o algoritmo de otimização	39
Figura 13 Operadores de Cruzamento	40
Figura 14 Pseudocódigo do GA.....	41
Figura 15 - Pseudocódigo <i>gbest</i> PSO.....	44
Figura 16 - Pseudocódigo do algoritmo HS.....	47
Figura 17 - Estrutura geral de um galpão industrial	49
Figura 18 - a) Pórtico Rígido b) Pórtico Rígido com Mísulas c) Viga Treliçada d) Tesoura Treliçada e) Pórtico Treliçado f) Estrutura Treliçada em Arco	49
Figura 19 Modelo de Pórtico Rígido	50
Figura 20 Vista frontal de sistema de correntes em Terças	51
Figura 21 Vista de topo de sistema de correntes em Terças	51
Figura 22 Sistema de contraventamento em X	52
Figura 23 Mão Francesa como contenção lateral da Viga.....	53
Figura 24 - Ligação típica nos beirais.....	53
Figura 25 - Ligação típica no cume	54
Figura 26 - Ligação típica de base rotulada	54
Figura 27 Exemplo de vigas não prismáticas: a) viga bi apoiada b) viga engastada.....	55
Figura 28 Análise do diagrama de momento fletor	58
Figura 29 Efeitos de segunda ordem: $P - \Delta$ e $P - \delta$	61
Figura 30 Influência do efeito $P - \Delta$ na modificação do diagrama de momento fletor	61
Figura 31 - Modelo de galpão gerado	67

Figura 32 - Direção e sentido dos ângulos de incidência de vento sobre a estrutura de galpão	68
Figura 33 - Modelo de carregamento de vento	68
Figura 34 - Modelo de carregamento gravitacional	69
Figura 35 a) Modelo Pórtico com barras prismáticas b) Seção transversal perfil I.....	70
Figura 36 Modelo de pórtico e perfil I não prismático	74
Figura 37 Verificação da estabilidade pela seção equivalente.....	77
Figura 38 Análise <i>Nex</i> adotada no presente trabalho.....	78
Figura 39 Fluxograma do processo de otimização	80
Figura 40 Cruzamento uniforme do algoritmo GA.....	81
Figura 41 Pseudocódigo: GA.....	83
Figura 42 Pseudocódigo: PSO implementado	85
Figura 43 Pseudocódigo: HS implementado.....	86
Figura 44 - Estrutura modelo de pórtico	87
Figura 45 - Convergência de $f(x)$ - Teste A	94
Figura 46 - Convergência de $f(x)$ - Teste B	94
Figura 47 - Convergência de $f(x)$ - Teste C	95
Figura 48 - Viga e Coluna: área da seção transversal (cm ²)	96
Figura 49 - Convergência de $f(x)$ - Teste B	99
Figura 50 - Convergência de $f(x)$ - Teste C	99
Figura 51 – Viga e Coluna: área da seção transversal (cm ²)	100
Figura 52 Parâmetros dos algoritmos: GA, PSO e HS.	102
Figura 53 Coeficiente de variação dos algoritmos.....	104
Figura 54 Estudos parametrizados: comportamento da função objetivo	107
Figura 55 Elementos prismáticos: predominância da área de colunas sob vigas	108
Figura 56 Deslocamentos laterais para vento de 45 m/s.....	111
Figura 57 Modelo de carregamento das ações de vento e gravitacionais	111
Figura 58 Deformada dos pórticos.....	112
Figura 59 Vetores de força dos carregamentos de vento	113
Figura 60 Modelo de pórtico não prismático obtido nas otimizações	117
Figura 61 Resultados de $f(x)$ dos pórticos: elementos prismáticos x não-prismáticos	118
Figura 62 Economia média do consumo de aço	119
Figura 63 Avaliação dos deslocamentos laterais: barras não prismáticas	120

Figura 64 Divisão da estrutura em duas subestruturas nt e lt	122
Figura 65 Exemplo de barra submetida ao esforço normal de compressão e a flexão simples	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo entre o processo de otimização e o arranjo musical.....	46
Tabela 2 Combinações dos carregamentos	69
Tabela 3 Variáveis de projeto de cada seção	71
Tabela 4 Definição das variáveis de projeto	74
Tabela 5 Cargas atuantes no galpão.....	88
Tabela 6 Combinações normais últimas	88
Tabela 7 Combinações frequentes de serviço	89
Tabela 8 Propriedades do aço	89
Tabela 9. Limites das variáveis de projeto.....	92
Tabela 10 Melhor solução do modelo 01: variáveis de projeto	93
Tabela 11. Melhor solução do modelo 01: restrições de projeto	93
Tabela 12. Dados gerais dos testes A, B e C	95
Tabela 13. Intervalo de confiança dos testes A, B e C	95
Tabela 14 Melhor solução do modelo 2: variáveis de projeto	98
Tabela 15. Melhor solução do modelo 2: restrições de projeto	98
Tabela 16. Dados estatísticos de $f(x)$ para a solução ótima do modelo 2.....	100
Tabela 17 Média da redução do consumo de aço: referência 1048 kg	100
Tabela 18 Configurações de cada algoritmo.....	102
Tabela 19 Resultados gerais da solução $f(x)$	103
Tabela 20 Variáveis de projeto para a solução obtida por cada algoritmo	104
Tabela 21 Resultado das restrições de projeto: ELU e ELS	105
Tabela 22 Elementos prismáticos: Variáveis de projeto.....	106
Tabela 23 Elementos prismáticos: valores e combinações das restrições	109
Tabela 24 Otimização assistida pelo algoritmo HS com um total de 2000 avaliações de $f(x)$	110
Tabela 25 Comprimentos dos elementos de viga (m).....	114
Tabela 26 Intervalo dos valores das variáveis de projeto (cm) para cada vão de pórtico.....	114
Tabela 27 Resultados de $f(x)$ e medições das otimizações	115
Tabela 28 Valores das variáveis de projeto (cm) das melhores soluções encontradas.....	116
Tabela 29 Restrições de Projeto dos pórticos com elementos não-prismáticos.....	119
Tabela 30 Amplificação dos esforços pelo coeficiente $B2$	122
Tabela 31 Barras prismáticas: análise P- Δ	123

Tabela 32 Barras não-prismáticas: análise P- Δ	124
Tabela 33 Incremento médio da função de restrição g_2 pela inclusão dos efeitos de 2ª ordem.	124
Tabela 34 Validação dos resultados à compressão e flexão simples	134
Tabela 35 Validação da resistência ao corte: exemplo 5.5 do <i>Design Guide 25</i> (AISC, 2011)	135

LISTA DE SIGLAS

ABC	Artificial Bee Colony
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACO	Ant Colony Optimization
AISC	American Institute of Steel Construction
BB-BC	Big-Bang Big Crunch
BS	British Standard
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
CBO	Colliding Bodies Optimization
CSI	Computers & Structures, INC.
CVS	Coluna Viga Soldada
DDHS	Design-Driven Harmony Search
DM	Direct Method
EA	Evolutionary Algorithm
ECBO	Enhanced Colliding Bodies Optimization
ELM	Effective Length Method
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	European Standard
ES	Evolution Strategies
FLA	Flambagem Local da Alma
FLM	Flambagem Local da Mesa
FLT	Flambagem Lateral com Torção
FOM	First-Order Method
GA	Genetic Algorithm
GWO	Grey Wolf Optimizer
HS	Harmony Search
IWO	Invasive Weed Optimization
LRFD	Load and Resistance Factor Design
MAES	Método de Amplificação dos Esforços
MINPL	Mixed-Integer Non-Linear Programming
NECBO	New Enhanced Colliding Bodies Optimization

NBR	Norma Brasileira
OC	Optimality Criteria
PSO	Particle Swarm Optimization
PyPi	Python Package Index
QEA	Quantum Evolutionary Algorithm
RC-NGA	Real-Coded Niching Genetic Algorithm
SA	Simulated Annealing
SAO	Simulated Annealing Optimization
SCI	Steel Construction Institute
SLS	Serviceability Limite State
ULS	Ultimate Limite State
VPS	Vibration Particles System
WOA	Whale Optimization Algorithm

LISTA DE SIMBOLOS

A_c	Área da seção transversal do perfil da coluna
A_v	Área da seção transversal do perfil da viga
A_{s_i}	Área da seção transversal (i)
A_{max}	Área máxima da seção transversal obtida pelos maiores valores das variáveis de projeto
B_1	Coefficiente de amplificação dos esforços devido aos efeitos locais de segunda ordem
B_2	Coefficiente de amplificação dos esforços devido aos efeitos globais de segunda ordem
CP	Carga permanente
CA	Carga acidental
CV	Carga de vento
C_b	Coefficiente de ajuste do diagrama de momento fletor
C_m	Coefficiente de equivalência de momentos fletores
C_{p_e}	Coefficiente de pressão externa da NBR 6123 (ABNT, 1988)
C_{p_i}	Coefficiente de pressão interna da NBR 6123 (ABNT, 1988)
C_{prob}	Probabilidade de cruzamento entre indivíduos
D_i	Intervalo de valores viáveis para cada variável de projeto x_i
E	Módulo de elasticidade longitudinal
E_a	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
$E_{a_{red}}$	Módulo de elasticidade longitudinal do aço reduzido
F_1	Primeiro “filho” formado no cruzamento
F_2	Segundo “filho” formado no cruzamento
$F_{e_{FLT}}$	Tensão da flambagem elástica lateral com torção
F_L	Tensão de escoamento residual
F_n	Força nocional
G	Módulo de elasticidade transversal
G_i	Maior valor obtido entre o resultado de g_i e 0
H	Altura do andar
HM	Tamanho da memória
$HMCR$	Probabilidade de consideração da memória harmônica

H_{novo}	Novo harmônico gerado
H_{pior}	Pior harmônico existente na memória harmônica
H_{melhor}	Melhor harmônico existente na memória harmônica
H_{sd}	Força horizontal total atuante no andar, obtida no modelo l_t
I	Momento de inércia do perfil
I'	Momento de inércia da seção equivalente do perfil
$I_{x_{min}}$	O menor momento de inércia do perfil no plano
$I_{x_{max}}$	O maior momento de inércia do perfil no plano
P_{prob}^j	Probabilidade de um indivíduo (j) ser escolhido
P^j	Indivíduo (j)
I_{elite}	Indivíduos de elite
J	Momento de inércia polar do perfil
L	Comprimento destravado da barra na direção considerada
L_x	Comprimento destravado da barra no plano
L_y	Comprimento destravado da barra fora do plano
L_b	Comprimento de barra entre contenções laterais
L_{barra}	Comprimento total da barra
L_c	Comprimento da coluna
L_v	Comprimento da viga
$L_{vão}$	Comprimento do vão
L_g	Comprimento do galpão
L_{V1}	Comprimento do trecho 1 da viga
L_{V2}	Comprimento do trecho 2 da viga
L_{V3}	Comprimento do trecho 3 da viga
M_a	Menor momento fletor atuante na barra
M_b	Maior momento fletor atuante na barra
M_p	Momento de plastificação do perfil
M_{yc}	Momento de início do escoamento da região comprimida
M_{sd_x}	Esforço de momento fletor na direção x de solicitação
M_{Rd}	Momento resistente de cálculo do perfil
M_{Rd_x}	Esforço de momento fletor na direção x resistente de cálculo
$M_{rd_{FLT}}$	Momento resistente de cálculo para a FLT

$M_{rd_{FLM}}$	Momento resistente de cálculo para a FLM
M_{prob}	Probabilidade de ocorrer mutação dos indivíduos “filhos”
N_I	Número total de indivíduos
N_e	Carga crítica de flambagem elástica
N_{e_x}	Carga crítica de flambagem elástica na direção x
$N_{c_{sd}}$	Esforço normal de compressão de solicitação
$N_{c_{Rd}}$	Esforço normal de compressão resistente de cálculo
N_{pais}	Número de indivíduos “pais”
N_{n_t}	Força axial na barra extraída do modelo n_t
N_{l_t}	Força axial na barra extraída do modelo l_t
P	Forças axiais
P1	Ponto do nó de beiral da coluna 1
P2	Ponto do nó do cume do pórtico
P3	Ponto do nó de beiral da coluna 2
PP	Peso próprio da estrutura
P-Δ	Análise não linear geométrica global
P-δ	Análise não linear geométrica local
PAR	Probabilidade de ajuste de nota
P_{sd}	Carga total gravitacional da estrutura no andar de referência no modelo n_t
P_a	Indivíduo “pai a” do cruzamento
P_b	Indivíduo “pai b” do cruzamento
P^i	Indivíduo “pai” (i)
R_{pc}	Fator de plastificação da alma
R_{pg}	Fator de flambagem da alma
R_m	Coefficiente de ajuste que considera a influência do efeito local na amplificação do deslocamento Δ_h
S1	Fator topográfico da NBR 6123 (ABNT, 1988)
S2	Fator de rugosidade da NBR 6123 (ABNT, 1988)
S3	Fator probabilístico da NBR 6123 (ABNT, 1988)
S_x	Módulo de resistência elástico na direção x
S_i	Seção transversal (i)

T_{pop}	Tamanho da população
V_{e1}	Elemento 1 da viga
V_{e2}	Elemento 2 da viga
V_{e3}	Elemento 3 da viga
V_0	Velocidade básica do vento em m/s da NBR 6123 (ABNT, 1988)
V_{sd}	Esforço de cisalhamento de solicitação
W_{max}	Máxima massa do pórtico possível de ser obtida por A_{max}
X	Lista de variáveis de projeto
b_w	Largura de banda de nota
b_f	Largura do perfil
b_{fc}	Largura da mesa comprimida do perfil, da coluna
b_{fv}	Largura da mesa do perfil da viga
c	Comprimento para avaliação da carga crítica de flambagem elástica
c_1	Parâmetro componente cognitivo
c_2	Parâmetro componente social
d	Altura total do perfil
d_{si}	Altura total da seção transversal (i)
d_i	Altura inicial da seção transversal de um elemento
d_j	Altura final da seção transversal de um elemento
d_c	Altura total do perfil da coluna
d_v	Altura total do perfil da viga
d_{base}	Altura total do perfil na seção de base
d_{topo}	Altura total do perfil na seção de topo
d_x	Deslocamento na direção do eixo x
d_{x2nd}	Deslocamento lateral do pórtico de 2ª ordem global
d_{x1st}	Deslocamento lateral do pórtico de 1ª ordem global
d_z	Deslocamento vertical do pórtico
$d_{xlimite}$	Deslocamento lateral limite
$d_{zlimite}$	Deslocamento vertical limite
e_{c1}	Espaçamento entre contenções laterais da viga
e_{c2}	Espaçamento entre contenções laterais da coluna

e_f	Espaçamento entre pórticos
e_p	Espaçamento entre terças; Espaçamento equidistante entre pórticos
$f(\cdot)$	Função objetivo
$f_p(\cdot)$	Função de penalidade
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_0	Momento atuante na extremidade oposta a f_2
f_1	Momento fletor calculado a partir de f_2 , f_{meio} e f_0
f_2	Momento fletor máximo positivo das extremidades
f_{meio}	Momento fletor atuante na seção central da barra
g_i	Restrição de projeto de desigualdade (i)
$g^{ótimo}$	Solução ótima global encontrada
h	Altura da alma do perfil
h_c	Dobro da distância do centroide da seção até a face interna da mesa comprimida
h_0	Distância entre os centroides das mesas do perfil
h_{max}	Maior altura da alma do perfil
k	Fator de ajuste do comprimento de flambagem efetivo
l_t	Estrutura livre
n_t	Estrutura restrita
n_p	Número de pórticos
n_p	Número total de partículas
n^{ELU}	Número total de combinações de ações do ELU
n_x	Número total de variáveis de projeto
\bar{p}^j	Melhor posição já assumida pela partícula (j)
r_1	Valor aleatório do parâmetro c1
r_2	Valor aleatório do parâmetro c2
r_x	Raio de giração em relação ao eixo x
r_y	Raio de giração em relação ao eixo y
r_t	Raio de giração à torção do perfil
$t_{x_{pais}}$	Taxa de “pais” na população
$t_{x_{elite}}$	Taxa de “elite” na população
t	Tempo ou número da interação

t_w	Espessura da alma do perfil
t_f	Espessura da mesa do perfil
t_{w_c}	Espessura da alma do perfil da coluna
t_{w_v}	Espessura da alma do perfil da viga
t_{f_c}	Espessura da mesa do perfil da coluna
t_{f_v}	Espessura da mesa do perfil da viga
t_{f_c}	Espessura da mesa comprimida do perfil
$u()$	Função que retorna um valor aleatório com mesma probabilidade de ocorrência para todos os sorteados
ν	Coefficiente de Poisson
v_i	Velocidade da partícula (i)
v_{ij}	Velocidade da partícula (i) do arranjo (j)
w	Momento da partícula
x_i	Posição da partícula (i)
x_{ij}	Posição da partícula (i) do arranjo (j)
\hat{x}_i	Melhor valor da variável (i) já encontrada por todo enxame de partículas
\bar{x}_i^j	Melhor valor da variável (i) já encontrada pela partícula (j)
$y_{ij}(t)$	Melhor solução encontrada pela partícula (i)
$\hat{y}_j(t)$	Melhor posição encontrada no arranjo (j)
Δ	Deslocamento transversal da barra
Δ_h	Deslocamento horizontal no topo dos pilares relativo de cada andar obtido na estrutura l_t
α	Ângulo de variação linear das alturas das seções transversais da barra
α_{limite}	Ângulo de variação linear das alturas das seções transversais da barra limite
α_w	Relação entre as áreas comprimidas da alma e da mesa do perfil
ε	Número aleatório entre -1 e 1
θ	Inclinação das vigas de cobertura
λ	Esbeltez do elemento
λ_{p_w}	Esbeltez da alma no regime plástico
λ_{r_w}	Esbeltez da alma no regime elástico
ρ	Massa específica do aço

ϕ_1	Produto entre os valores c_1 e r_1
ϕ_2	Produto entre os valores c_2 e r_2
Φ_c	Coefficiente de minoraçãõ do aço
χ	Coefficiente de constriçãõ

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVO DO TRABALHO.....	26
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3 REFERENCIAL TEÓRICO	37
3.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS DE OTIMIZAÇÃO.....	37
3.1.1 Genetic Algorithm (GA)	39
3.1.2 Particle Swarm Optimization (PSO)	42
3.1.3 Harmony Search (HS)	45
3.2 ESTRUTURAS METÁLICAS EM EDIFICAÇÕES INDUSTRIAIS.....	48
3.3 BARRAS DE AÇO NÃO-PRISMÁTICAS	54
4 METODOLOGIA	66
4.1 PROJETO PARAMETRIZADO DE PÓRTICOS DE GALPÃO INDUSTRIAL	66
4.1.1 Pórtico com barras prismáticas	70
4.1.2 Pórtico com barras não-prismáticas	73
4.2 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DOS PÓRTICOS DE AÇO	79
4.3 ALGORÍTMOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS AO PROJETO DE PÓRTICOS.....	81
4.3.1 Algoritmo GA	81
4.3.2 Algoritmos de otimização: PSO e HS	84
5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	87
5.1 OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONTENÇÃO LATERAL NAS VIGAS	90
5.1.1 Modelo 1: Viga totalmente contida lateralmente	91
5.1.2 Modelo 2: Viga sujeita à flambagem lateral com torção (FLT)	97

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS NA OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE GALPÕES INDUSTRIAIS	101
5.3 OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS COM BARRAS PRISMÁTICAS	105
5.4 OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS COM BARRAS NÃO-PRISMÁTICAS	113
5.5 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM	121
6 CONCLUSÃO	126
7 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	128
REFERÊNCIAS	129
APÊNDICE A - VALIDAÇÃO DA VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DOS ELEMENTOS NÃO-PRISMÁTICOS	133

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas são amplamente empregadas em construções comerciais, como shoppings, supermercados, lojas, estacionamentos, quadras esportivas e construções industriais. A escolha desse material está relacionada à economia, flexibilidade de uso, arquitetura, rápida execução e facilidade de manutenção. Galpões de uso industrial são edificações que empregam estruturas aporricadas de aço com características de vãos entre 15 e 50 metros (SALTER, 2004).

Os galpões industriais costumam ter formato retangular com grandes vãos para proporcionar um ambiente interno livre. A estrutura é constituída por pórticos que se repetem ao longo do comprimento do galpão e são interligados por estruturas secundárias como as terças de cobertura e as travessas laterais. O peso próprio dos elementos estruturais e das vedações, as cargas acidentais de cobertura e as forças do vento são as principais ações atuantes. Esforços devido a pontes rolantes, equipamentos, mezaninos ou situações de incêndio são exemplos de outras ações que podem ocorrer.

Os pórticos de aço de galpões industriais devem ser verificados conforme o caso para essas ações e suas respectivas combinações de carregamentos para que atendam os requisitos de projeto quanto aos critérios de segurança e de serviço, não permitindo que as solicitações internas de cálculo superem as respectivas resistências dos elementos, e que os deslocamentos dos nós da estrutura não causem perda da funcionalidade da edificação.

Em um processo de otimização devem ser definidas as variáveis de projeto que estejam direta ou indiretamente ligadas ao cálculo da função objetivo. O dimensionamento ótimo de pórticos de aço costuma ter como objetivo a redução do consumo de material e variáveis de projeto definidas como as dimensões das seções transversais dos perfis. Dessa forma, o projeto otimizado é caracterizado por agregar um melhor custo-benefício, pois consegue proporcionar a maior economia possível que atenda as restrições de projeto.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o dimensionamento otimizado de pórticos rígidos de aço simétricos de vão único construídos por barras em perfis I simétricos soldados. São consideradas ações permanentes, acidentais e de vento, onde esta última é determinada de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988) para forças estáticas equivalentes. A verificação

dos critérios últimos e de serviço de projeto (restrições da função objetivo) é feita por meio de um programa desenvolvido em linguagem Python 3, com a comparação entre 3 algoritmos metaheurísticos, *Genetic Algorithm* – GA (JOHN HOLLAND, 1975), *Particle Swarm Optimization* – PSO (ENGELBRECHT, 2007) e *Harmony Search* – HS (GEEM e KIM, 2001) utilizados como estratégia de otimização de projeto, visando minimizar o consumo de aço. As análises estruturais (lineares e P- Δ) dos esforços internos dos elementos e os deslocamentos do pórtico são realizadas pelo *software* SAP2000 (*ANALYSIS REFERENCE MANUAL*, CSI, 2022).

Um total de 12 casos são formados combinando a variação dos vãos entre valores de 15 m e 45 m, e velocidades de vento entre 35 m/s e 45 m/s. Todas essas configurações são analisadas para pórticos com o uso de elementos prismáticos e não-prismáticos. A análise linear elástica é utilizada ao longo de todas as otimizações iniciais, posteriormente, os efeitos de segunda ordem local e a não linearidade do material são considerados de forma aproximada pelo coeficiente de amplificação B_1 e a redução da rigidez do material em 20%. Ao final do processo, um estudo avaliativo da consideração dos efeitos de segunda ordem global é realizado para as soluções otimizadas. O método de amplificação dos esforços (MAES) fornecido pela NBR 8800 (ABNT, 2008) é comparado ao procedimento de análise P- Δ disponível no *software* SAP2000.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O trabalho propõe e avalia um método computacional de dimensionamento otimizado de pórticos de aço de perfis I soldados, típicos de galpões industriais (denominados, “*portal frames*”), considerando critérios usuais de projeto. O objetivo é apresentar uma ferramenta que permite ao engenheiro compreender melhor o comportamento da estrutura analisada, fornecendo parâmetros indicativos do desempenho frente aos esforços aplicados. Além disso, objetiva demonstrar o benefício da aplicação de algoritmos metaheurísticos na otimização de estruturas de engenharia, como a redução do consumo de material.

Alguns objetivos secundários do trabalho são: avaliar o desempenho de diferentes algoritmos metaheurísticos no problema proposto; avaliar o efeito das ações de vento no dimensionamento dos pórticos; e avaliar o uso de elementos não-prismáticos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos iniciais apresentam uma revisão bibliográfica e um referencial teórico sobre os principais assuntos tratados diretamente no trabalho, dentre os quais se destacam: métodos de otimização, estruturas metálicas em edificações industriais, critérios de verificação para elementos não-prismáticos e efeitos de segunda ordem.

Em seguida é apresentada a metodologia empregada, bem como a formulação do problema de otimização, as características dos algoritmos utilizados e o fluxo de processo do programa implementado e a sua integração com o *software* SAP2000.

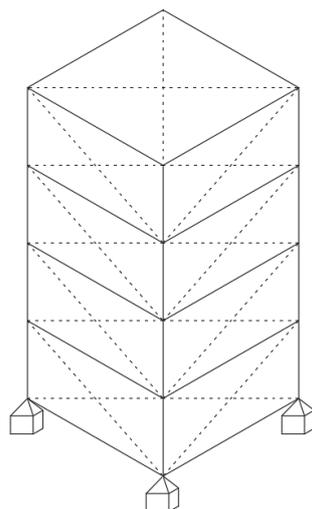
Por último são apresentadas aplicações da metodologia desenvolvida a uma série de problemas de dimensionamento ótimo de pórticos. As seções iniciais desse capítulo descrevem um comparativo entre os 3 algoritmos de otimização. A seção seguinte apresenta um estudo sobre a configuração ótima de pórticos com diferentes vãos e velocidades básicas do vento empregando o algoritmo Harmony Search (HS). Estudos adicionais são apresentados considerando pórticos com barras não-prismáticas, e o capítulo de exemplos de aplicação é encerrado com a apresentação de um estudo sobre os efeitos globais de segunda ordem nas configurações otimizadas obtidas para os diversos problemas considerados nas seções anteriores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos trabalhos acadêmicos têm sido realizados na área de otimização de estruturas de aço, verificando a eficiência de algoritmos metaheurísticos na resolução de problemas não lineares de engenharia. A aplicação de métodos de otimização no dimensionamento de estruturas tornam-se relevantes ao proporcionar soluções de projeto que agregam economia e segurança. Além disso, esses métodos tornam possível automatizar o processo repetitivo de verificação dos elementos estruturais. Uma revisão de trabalhos que tratam da otimização de pórticos de galpões industriais é priorizada, e tem como objetivo uma compreensão inicial de como essas estruturas são tratadas.

A avaliação do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) na otimização de torres treliçadas (PEREZ E BEHDINAN, 2007), como a ilustrada na Figura 1, e pórticos de múltiplos pavimentos (DOGAN E SAKA, 2012), demonstrou a eficiência do algoritmo na resolução de problemas não lineares e com restrições. Os resultados indicam a dependência da qualidade dos resultados do algoritmo frente a escolha dos valores adotados para os parâmetros.

Figura 1 Exemplo de estrutura de treliça 3D



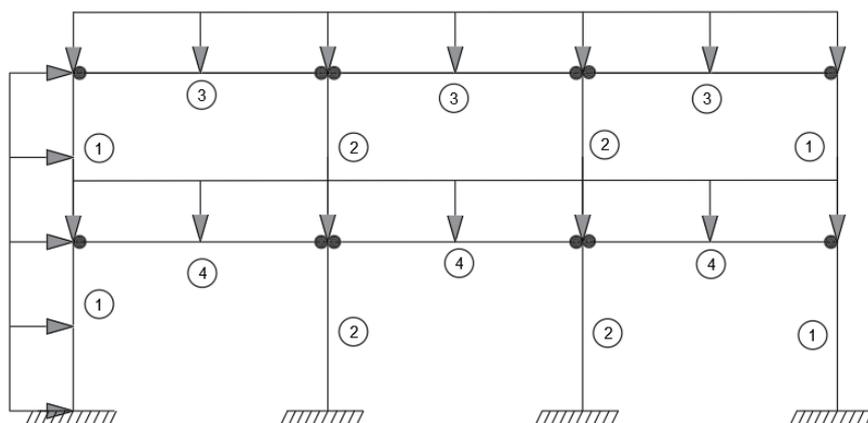
Fonte: Adaptado de Perez e Behdinan (2007)

Braun (2016) demonstrou o uso do algoritmo *Harmony Search* (HS) para otimização de uma viga de aço de seção I bi apoiada, considerando a flexão simples, o cisalhamento e o limite de deslocamento como restrições de projeto. Murren e Khandelwal (2014) modificaram o HS,

criando um algoritmo chamado de *Design-driven Harmony Search* (DDHS) para a otimização de pórticos rígidos de múltiplos pavimentos com variáveis discretas. O novo algoritmo incorpora inteligência na pesquisa estocástica buscando condicionar a satisfação ou violar dados de soluções de teste anteriores para orientar a otimização na direção de seções maiores ou menores, conforme classificado por um parâmetro de seção apropriado. O algoritmo apresentou ótimos resultados quando comparados com o algoritmo original HS, *Genetic Algorithm* (GA) e *Ant Colony Optimization* (ACO).

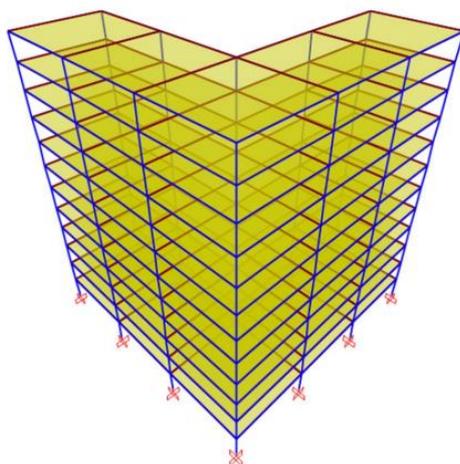
Oliveira e Fálcon (2020) implementaram uma integração entre os *softwares* MATLAB e SAP2000 para a otimização de uma estrutura de três vãos com seis metros e dois pavimentos com quatro metros (Figura 2), utilizando o algoritmo GA. Aspectos como a rigidez rotacional das ligações, análise não linear geométrica e a verificação a flexocompressão foram considerados. Trabalhos como Kaveh (2020) apresentaram a mesma integração entre os *softwares* na otimização de uma edificação aporticada (Figura 3) com elementos não-prismáticos e concluíram que o algoritmo HS se destacou frente aos algoritmos *Enhanced Colliding Bodies* (ECBO) e *Vibrating Particles System* (VPS). Variáveis discretas foram definidas de acordo com as tabelas de perfis metálicos e as restrições de projeto seguiram critérios normativos.

Figura 2 Estrutura aporticada de 2 pavimentos e 3 vãos



Fonte: Adaptado de Oliveira e Fálcon (2020)

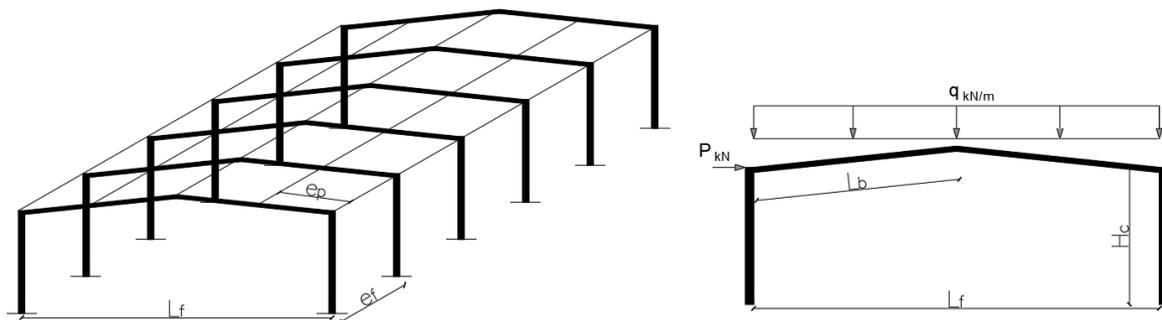
Figura 3 Edificação de aço modelo 3D



Fonte: Kaveh (2020)

Kravanja e Zula (2010) apresentam uma otimização simultânea de redução do custo e topológica de pórticos de um pavimento de edificações industriais (Figura 4). A estrutura está sujeita as restrições de análise estrutural recomendadas pelo EN 1993-1-1 (2005). Os autores consideraram custos aproximados de material, execução e pintura anticorrosiva. O pórtico possui ligações rígidas e base rotulada, e o espaçamento entre pórticos (e_f) e entre terças (e_p) com contraventamento são variáveis de projeto tanto quanto as dimensões dos perfis.

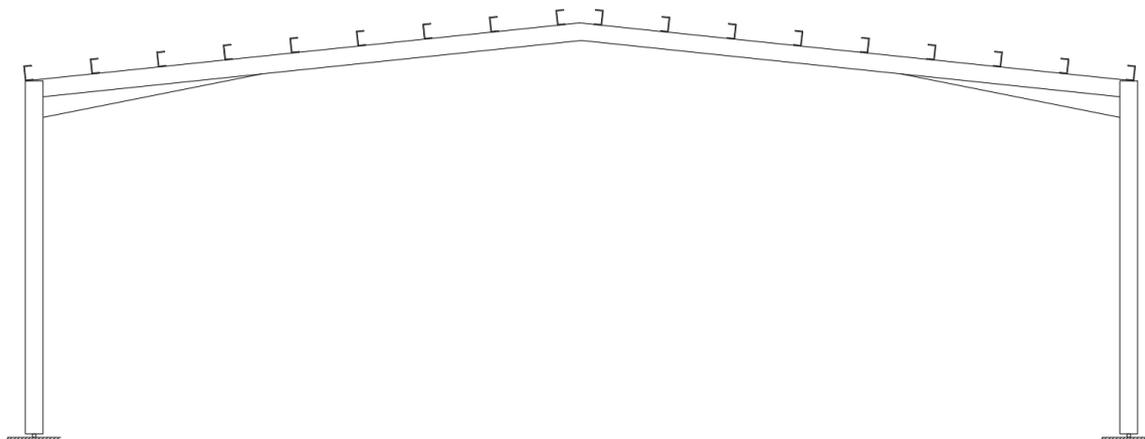
Figura 4 Modelo de estrutura e carregamento analisado por Kravania e Zula (2010)



Fonte: Adaptado de Kravanja e Zula (2010)

Phan et. al. (2013) e Mckinstry et. al. (2015) utilizaram o algoritmo *Real-Coded Niching Genetic Algorithm* (RC-NGA) na otimização de pórticos industriais de grandes vãos formados por perfis I com restrições normativas de projeto referentes ao ELU e ELS. Destacaram o uso de mísulas de beirais (Figura 5) e a importância da consideração dos ELS na verificação de projeto.

Figura 5 Modelo de pórtico com mísulas de beirais



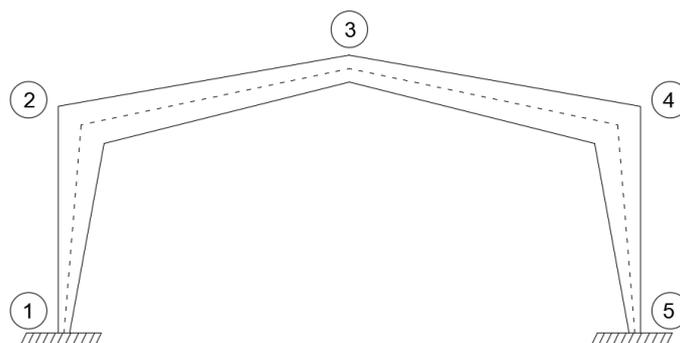
Fonte: Autor (2022)

Nas últimas décadas diversos trabalhos têm sido desenvolvidos sob a perspectiva de elementos não-prismáticos, com o foco em perfis de seções I com variação linear da altura da alma. O objetivo é o uso do material em seu limite, agregando economia de custo. Como a flexão é o principal esforço na maioria das estruturas, a ideia é que a seção transversal do elemento acompanhe o desenvolvimento do diagrama de tensões de momento fletor.

Hayalioglut e Saka (1992) são uns dos pioneiros no estudo de otimização de estruturas compostas por elementos não-prismáticos de seção I. As variáveis de projeto adotadas foram a área da seção transversal de uma das extremidades do elemento, e a taxa de variação entre as áreas de cada extremidade. A largura das mesas e as espessuras de chapas da alma e das mesas foram mantidas constantes. As restrições do problema de otimização foram os critérios de deslocamentos e tensões máximas.

Hayalioglut e Saka (1992) otimizaram uma estrutura de pórtico com elementos não-prismáticos, considerando a não linearidade geométrica e de material. O cálculo dos gradientes das funções, os multiplicadores de Lagrange e a técnica de Newton-Raphson foram utilizados para a realização do processo de otimização e resolução das equações de equilíbrio da estrutura. A Figura 6 ilustra a estrutura verificada por Hayalioglut e Saka (1992), onde são identificados os 5 pontos de seções transversais, que podem assumir diferentes valores de altura do perfil.

Figura 6 Pórtico de elementos não-prismáticos

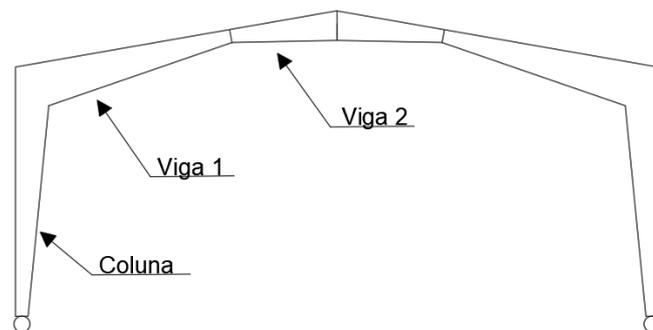


Fonte: Adaptado de Hayalioglut e Saka (1992)

Posteriormente, Saka (1997) elaborou um trabalho que considera como variáveis de projeto a altura inicial e final da seção transversal de cada elemento. Além disso, introduziu no problema de otimização a instabilidade do elemento pela ocorrência da flambagem lateral com torção (FLT). Novamente considerou a não linearidade geométrica nas análises.

Chen e Hu (2008) realizaram a otimização de um pórtico de aço (Figura 7) com a aplicação do GA tradicional. O programa foi desenvolvido no *software* MATLAB e modelado considerando a coluna como um elemento único, e a viga dividida em dois elementos. O problema de otimização conta com um total de 7 variáveis de projeto, entre elas as alturas e larguras da seção transversal. As espessuras de chapas foram tomadas como constantes. A função objetivo é minimizar a massa do pórtico e é restrita por critérios normativos. O método da penalidade foi aplicado para contornar as restrições do problema. Chen e Hu (2008) constataram uma economia de material de 10,40% em relação a uma solução não otimizada.

Figura 7 Modelo de pórtico analisado por Chen e Hu (2008)

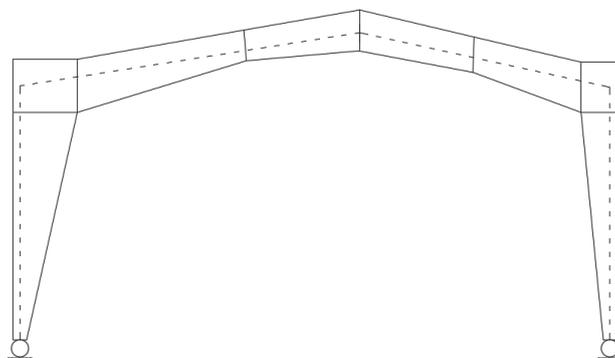


Fonte: Adaptado de Chen e Hu (2008)

Mckinstry et al. (2016) investigaram o efeito da assimetria em pórticos de aço rígidos com a aplicação do algoritmo RC-NGA para a otimização. Três modelos de pórticos foram comparados, pórticos com perfis laminados e soldados com a inclusão de mísulas de beirais, e pórticos com elementos não-prismáticos (Figura 8). O trabalho considera cargas de vento e neve, e realiza verificações ao ELU e ELS. Mckinstry et al. (2016), também, estudaram o aumento da altura das colunas de 6 para 12 metros e variações dos vãos de 14,50 a 50 metros.

Como resultados, os autores Mckinstry et al. (2016), puderam constatar que os perfis laminados produziram os pórticos mais pesados, enquanto os pórticos de seção variada os mais leves, como era esperado. Os pórticos assimétricos tiveram em média um maior consumo de aço do que os pórticos simétricos, em alguns casos 5% e em outros quase 20%. Observou-se que os limites de deslocamentos predominam no dimensionamento dos elementos, aumentando consideravelmente as seções transversais quando há aumento da altura das colunas de 6 para 12 metros.

Figura 8 Pórtico assimétrico com elementos não-prismáticos



Fonte: Adaptado de Mckinstry et al. (2016)

Balogh e Vigh (2017) utilizaram o algoritmo GA na otimização de pórticos com elementos não-prismáticos, inovando na consideração de uma situação de incêndio e na formulação da função objetivo de forma a contemplar os custos da estrutura, proteção passiva e ativa, e um fator probabilístico na perda total ou parcial dos elementos. Assim, consideraram como variáveis de projeto as dimensões da seção transversal e a espessura da proteção passiva. Utilizaram como estratégia de otimização a variação do tamanho da população do GA ao longo das iterações.

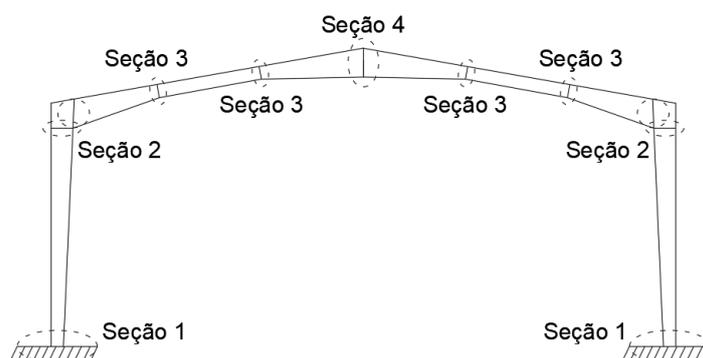
Balogh e Vigh (2017) destacaram que estruturas analisadas para o caso de incêndio conduzem os elementos a terem espessuras de chapas ligeiramente mais espessas (em média

1 espessura comercial acima), visto que perdem rapidamente sua rigidez quando expostas ao fogo. Outro fator, é que uma menor área superficial proporciona um menor custo de proteção passiva, como argamassas resistentes ao fogo ou pinturas intumescente.

Ozbasaran e Yilmaz (2018) elaboraram um trabalho que apresenta a otimização de forma de vigas de seção I simétricas, considerando a variação linear das mesas e das almas. O trabalho compara o método de Rayleigh-Ritz na determinação da carga crítica para flambagem lateral com torção (FLT) com um modelo em elementos finitos no *software* ABAQUS, utilizando elemento de casca de 8 nós e 5 graus de liberdade para cada nó. Ozbasaran e Yilmaz (2018) verificam que a teoria de Rayleigh-Ritz para elementos isolados de comportamento de viga é satisfatória.

Kaveh e Ghafari (2019) otimizaram as seções transversais de perfis I duplamente simétricos de pórticos de aço (conforme Figura 9) e constataram que um dos algoritmos de otimização que melhor se destacaram foi o HS. A melhor configuração de pórtico encontrada tem como característica uma inclinação de telhado de 3,58 graus e comprimento dos trechos de viga com elementos não-prismáticos iguais a 40% do comprimento total da viga. As combinações que levaram ao limite as restrições de projeto foram a combinação com carregamento de neve e a combinação com vento.

Figura 9 Modelo de pórtico de Kaveh and Ghafari (2019)

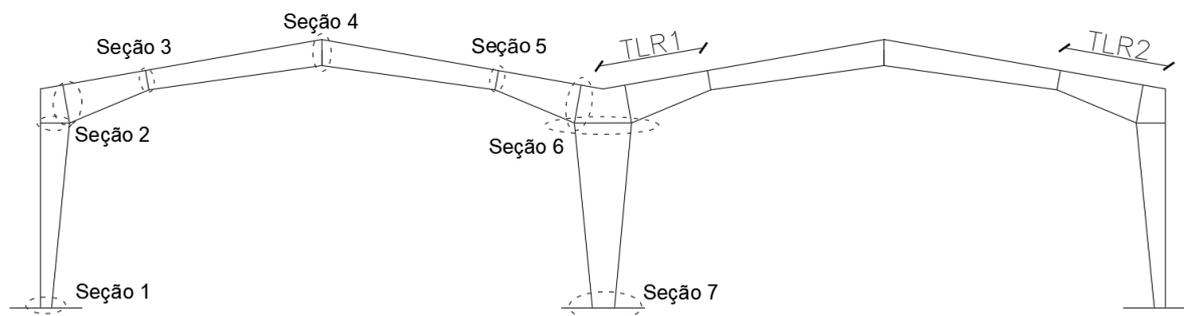


Fonte: Adaptado de Kaveh e Ghafari (2019)

A otimização de pórticos similares ao apresentado por Kaveh e Ghafari (2019) foi realizada por Fu et al. (2019) que consideraram os efeitos de ligações semirrígidas nas conexões coluna-viga. Arzani et. al. (2019) testaram a eficiência do algoritmo metaheurístico *Quantum Evolutionary Algorithm* (QEA) na resolução do problema de pórtico com vão duplo,

conforme é apresentado na Figura 10, onde *TLR* representa o comprimento dos trechos de viga de beiral.

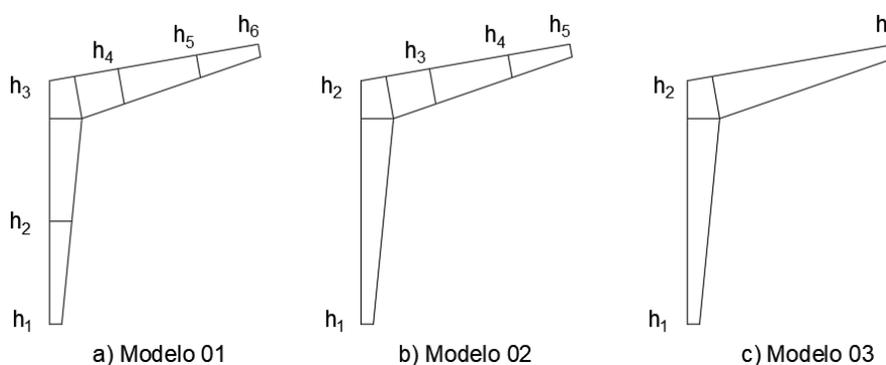
Figura 10 Modelo de pórtico de vão duplo



Fonte: Adaptado de Arzani et. al. (2019)

Kaveh et. al. (2021) analisaram a aplicação de um novo algoritmo chamado *New Enhanced Colliding Bodies Optimization* (NECBO) na otimização de pórticos simétricos de aço de seção I soldada com altura de alma variada. O problema aborda 3 diferentes tipos de formulação do pórtico, o primeiro considera a coluna dividida em 2 elementos e a viga em 3 elementos. O segundo altera a coluna para um único elemento e por último, o terceiro considera a coluna e a viga como um único elemento. Os modelos de análise são apresentados na Figura 11. Dessa forma, o primeiro tipo permite maior flexibilidade de variação dos elementos, porém acarreta um maior número de variáveis, enquanto o último limita mais a configuração do pórtico, mas exige um menor número de variáveis de projeto.

Figura 11 Número de variações das alturas das seções: a) 6, b) 5 e c) 3



Fonte: Adaptado de Kaveh et. al. (2021)

Os resultados apontam que a divisão das colunas em dois elementos para variação da altura da alma não influencia na solução ótima do pórtico, pois tanto o modelo 01 e o modelo 02 obtiveram respostas muito similares. Entretanto, o modelo 03 em que considerou a viga como

um elemento único e não dividido em partes obteve um aumento de 16% no consumo de aço em relação aos demais modelos.

Os artigos apresentados tornam-se relevantes ao trabalho desenvolvido por apresentaram a evolução da metodologia de otimização aplicada a estruturas de aço, demonstrando que atualmente os algoritmos metaheurísticos são a melhor opção a ser aplicada na resolução de problemas não lineares de estruturas de engenharia. De acordo com os trabalhos, os algoritmos clássicos (*Genetic Algorithm*, *Particle Swarm Optimization* e *Harmony Search*) apresentam bom desempenho na resolução destes problemas. Por último, a avaliação de diversas configurações de pórticos e discretização dos elementos de vigas e colunas, permitiu elaborar exemplos aplicados de maior relevância.

O trabalho desenvolvido apresenta exemplos práticos considerando aspectos de projetos baseados nas normas brasileiras, e inova na elaboração de um programa que permite a parametrização geométrica de pórticos de galpões. Considera os principais critérios de projeto ao ELU e ELS, disposições construtivas e análise do estado limite de flambagem lateral com torção de acordo com o posicionamento de elementos secundários, como terças de cobertura e contraventamentos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O embasamento teórico da metodologia do trabalho é apresentado e está organizado de acordo com os tópicos mais relevantes ao projeto ótimo de pórticos de galpões industriais. Inicia-se descrevendo os métodos metaheurísticos de otimização, incluindo suas características gerais, vantagens e desvantagens. Em seguida apresentam-se os três algoritmos utilizados no presente trabalho, incluindo ilustrações de pseudocódigo e as definições das equações. Uma explicação geral das características das estruturas de aço em galpões industriais é apresentada, incluindo uma ilustração do modelo de galpão ao qual o trabalho está baseado. Por último, duas seções tratam de forma mais específica sobre a consideração de elementos não-prismáticos e os efeitos de segunda ordem, apresentando conceitos e recomendações normativas.

3.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS DE OTIMIZAÇÃO

O processo de otimização de estruturas busca comumente a redução do consumo de material, de forma que a função objetivo descreva a massa da estrutura em função das variáveis de projeto. As técnicas de otimização podem ser separadas em dois grandes grupos: algoritmos determinísticos e algoritmos heurísticos, (SAKA e GEEM, 2013). Os métodos de otimização determinísticos são aqueles que apresentam uma regra determinística para atualização da solução procurada de forma que, uma vez inicializados, sempre resultarão em uma mesma solução para o problema. Uma grande parte destes algoritmos faz uso de informações de derivadas da função objetivo e das restrições, exigindo o cálculo dos gradientes da função objetivo e, algumas vezes, da matriz Hessiana (derivadas de segunda ordem) das mesmas. Há várias técnicas de programação disponível na literatura, entre elas: programação sequencial linear, método do gradiente reduzido, método de quase-Newton e método de Newton, método do gradiente conjugado, programação quadrática sequencial etc. (ARORA, 2017).

Para os algoritmos não-determinísticos, as regras de procura da solução ótima agrega operadores aleatórios de forma que, mesmo para inicializações idênticas, podem obter resultados diferentes. Esta característica ressalta a vantagem de serem menos propensos a ficarem presos em soluções sub-ótimas. Dentre os algoritmos não-determinísticos há uma grande classe chamada de algoritmos heurísticos e metaheurísticos. Muitos deles são baseados na simulação de fenômenos naturais (SAKA e GEEM, 2013). Dentre esses métodos heurísticos podem ser citados: *Evolutionary Algorithm* (EA), *Genetic algorithm* (GA),

Evolution Strategies (ES), Simulated Annealing (SA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), Harmony Search (HS) e Big-Bang Big Crunch (BB-BC).

No projeto estrutural as variáveis de projeto costumam ser classificadas em dois tipos: variáveis contínuas ou discretas. De acordo com (HAFTKA; GÜRDAL, 1992 apud BRAUN, 2016) variáveis de projeto contínuas têm um alcance de variação e podem assumir qualquer valor dentro deste alcance. Já variáveis de projeto discretas só podem assumir valores isolados, tipicamente de uma lista de valores permitidos.

Em problemas de projeto de estruturas de aço, os métodos determinísticos não se demonstram tão eficazes, ora pela limitação do número de variáveis e ora por não conseguir tratar de forma adequada problemas com variáveis discretas. Com isso, os métodos heurísticos tornam-se mais atrativos, desenvolvendo-se diversos algoritmos, (SAKA e GEEM, 2013).

As técnicas de otimização heurísticas possuem duas desvantagens. A primeira é que não é possível afirmar com certeza de que a solução encontrada é de fato uma solução ótima global ou apenas um ótimo local. A segunda é que elas precisam da avaliação da função objetivo em muitos pontos no espaço de resposta para alcançar uma solução quase-ótima, elevando o tempo computacional, (SAKA e GEEM, 2013). Com o intuito de reduzir essas desvantagens, novas técnicas heurísticas foram elaboradas.

Em geral, os algoritmos metaheurísticos são desenvolvidos para a solução de problemas irrestritos. Dessa forma, a solução de problemas de otimização com restrições exige uma adaptação, que normalmente é atendida pela adoção de funções de penalidade, que incrementam o valor da função objetivo na medida em que as restrições são violadas (SAKA e GEEM, 2013).

Em algoritmos metaheurísticos, existem dois fatores importantes em questão de desempenho, a diversificação e a intensificação. A exploração do domínio das variáveis é fornecida pelo fator de diversificação. Porém, diversificações muito fortes podem retardar em muito a convergência da solução, pois mais pontos no espaço de resposta serão analisados. Já o fator de intensificação é quem controla a “experiência” que o algoritmo adquire a cada iteração, buscando descartar rapidamente soluções não ideais de projeto, (YANG, 2009).

De acordo com Murren e Khandelwal (2014), a qualidade de um determinado algoritmo pode ser avaliada em relação a três critérios. O primeiro é medido pela solução ótima encontrada, o

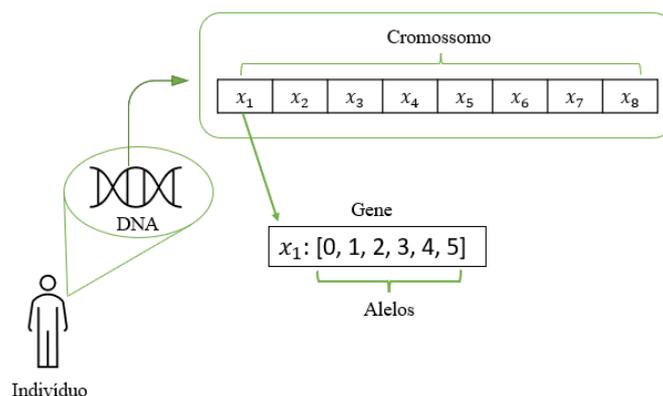
segundo pela robustez e consistência com a qual as soluções são obtidas e o terceiro pelo custo computacional necessário para se obter a solução ótima. Desta forma, existem muitos algoritmos já desenvolvidos, com suas características e comportamento intrínsecos, como por exemplo, alguns com implementação e ajuste difícil devido ao grande número de parâmetros, outros com custo computacional elevado, e ainda outros que geram apenas soluções subótimas.

As subseções seguintes apresentam a descrição dos três algoritmos metaheurísticos (GA, PSO e HS) utilizados na otimização do problema de dimensionamento de pórticos de aço apresentados no capítulo de exemplos numéricos deste trabalho. Esses algoritmos foram selecionados por possuírem elevado estudo na literatura e apresentarem resultados satisfatórios na resolução de problemas de engenharia em diversos trabalhos realizados por outros autores.

3.1.1 Genetic Algorithm (GA)

Desenvolvido por John Holland (1975) e colaboradores, o *Genetic Algorithm* (GA) é um método de otimização metaheurístico geracional baseado na teoria da evolução de Charles Darwin. O algoritmo combina os métodos evolucionários com o uso de três operadores genéticos, seleção, cruzamento e a mutação dos genes, todos atuando na direção da formação e evolução de uma população mais apta (YANG, 2010). A Figura 12 apresenta um esquema da base de formulação do GA relacionado com a teoria genética de um indivíduo. O cromossomo representa os genes de um indivíduo no qual cada gene representa uma variável de projeto. Os genes são compostos de alelos, e representam os valores que podem ser assumidos por cada variável.

Figura 12 Relação da teoria genética com o algoritmo de otimização



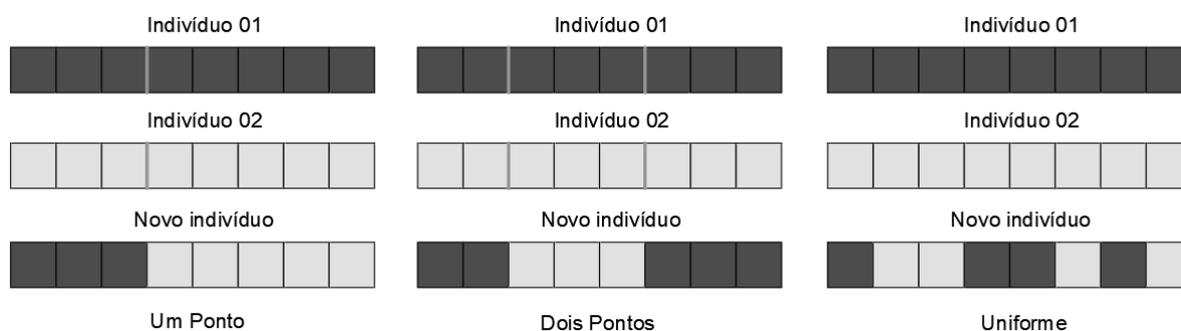
Fonte: Autor (2022)

A inicialização do algoritmo acontece com a formação de uma população de indivíduos aleatórios. Em seguida, o processo de seleção inicia, onde o algoritmo seleciona os melhores indivíduos da atual população para o “acasalamento”, que são chamados de “pais”. O segundo operador aplicado é o cruzamento entre os “pais” escolhidos, no qual o “cromossomo” de cada “pai” é quebrado em segmentos (“genes”) e trocado de forma aleatória entre eles. Esses “genes” são as variáveis de projeto, as quais são combinadas ou trocadas para a formação de novos indivíduos, chamados de “filhos”, com características similares a dos “pais”, (SAKA E GEEM, 2013).

De acordo com Engelbrecht (2007), o processo de cruzamento pode ser dividido em 3 classes. A primeira é assexual, que é quando o descendente é gerado por apenas um indivíduo. Isso pode acontecer, quando ocorre a seleção de um mesmo indivíduo duas vezes. A segunda, e a mais utilizada, é a sexual, que é quando dois “pais” diferentes produzem um ou dois “filhos”. E a terceira é múltipla recombinação, que é quando mais de dois “pais” são usados para produzir um ou mais descendentes. Engelbrecht (2007), afirma que diferentes estratégias devem ser adotadas em cada caso, e que não é conveniente produzir uma cópia idêntica de indivíduo, devendo ser incorporado testes para evitar operações desnecessárias.

Diferentes operadores podem ser utilizados para realizar a troca de genes entre os “pais” para formação do novo indivíduo. Entre eles, destacam-se o cruzamento de um ponto, dois pontos e uniforme, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 Operadores de Cruzamento



Fonte: Adaptado de Engelbrecht (2007)

De acordo com Engelbrecht (2007), o cruzamento de um ponto é aquele que um ponto aleatório é selecionado realizando uma divisão, em que o “filho” receberá os genes de um “pai” até esse ponto e os genes de outro “pai” a partir desse ponto. O cruzamento de dois pontos, define três divisões, na qual a primeira e a terceira divisão de genes são recebidos de

um “pai” e a segunda divisão de genes recebido do outro “pai”. Por último, o cruzamento uniforme é aquele em que cada gene tem a probabilidade de ser escolhido entre os valores de mesma posição de um ou de outro “pai”, não existindo um intervalo de divisão específico, Engelbrecht (2007).

O processo de criação de novos indivíduos é composto por seleção, cruzamento e mutação. Uma vez que os indivíduos são criados, é avaliado o valor da função objetivo, adotando os mais aptos para formação da nova população. Diferente do atributo de cruzamento que busca a diversidade de soluções e propagação das soluções finais mais aptas, a mutação é um mecanismo utilizado para proteger o algoritmo de ficar preso em uma solução ótima local, (SAKA e GEEM, 2013). A Figura 14 apresenta um pseudocódigo do processo de iteração do GA, onde entende-se por critério de parada, para o presente trabalho, o número máximo de iterações (gerações) escolhido pelo usuário.

Figura 14 Pseudocódigo do GA

```

Criação de indivíduos aleatórios
Aptidão - cálculo da função objetivo  $f(x)$ 
Inicialização da população inicial
Enquanto condição de parada não satisfeita:
    Seleção dos indivíduos mais aptos para formação dos pais;
    Reprodução: cruzamento e mutação;
    Aptidão - cálculo da aptidão a partir da função objetivo  $f(x)$ ;
    Seleção dos indivíduos de Elite;
    Criação da nova população (pais e filhos mais aptos);
    Geração +1;
Retornar:
    melhor indivíduo;
  
```

Fonte: Autor (2022)

Uma heurística usual é de manter um certo número de indivíduos (chamados de Elite) de uma geração para a outra para evitar a degradação de boas soluções encontradas, que pode acontecer devido ao operador de mutação. Existem diversas estratégias de parametrizar e selecionar os melhores indivíduos a cada interação que ocorre, por exemplo, o algoritmo pode armazenar uma posição extra do vetor da população (uma cópia de alguns de seus

melhores indivíduos) sem que ocorra a mutação. Desta forma, é um mecanismo que protege os melhores indivíduos para que sobrevivam à próxima geração. Deve-se tomar cuidado, pois quanto maior o número de indivíduos de elite, menor será a diversidade da população, (ENGELBRECHT, 2007).

De acordo com Yang (2010), os GA's tradicionais são organizados por codificação binária, no qual, os dados são armazenados em cadeias de bits, 0 ou 1. Esses arranjos binários são os chamados cromossomos, formados por seus genes, em que cada gene assume o valor de 1 ou 0. Desta forma, todos os operadores já descritos foram desenvolvidos considerando essa codificação binária. Esse modelo tradicional do algoritmo o torna eficaz para resolução de problemas de variáveis discretas. Por outro lado, com o objetivo de melhorar o desempenho para variáveis contínuas e com o avanço das linguagens de programação, o GA foi adaptado para trabalhar com uma codificação real, na qual os dados são armazenados em números decimais, tornando mais eficaz para variáveis contínuas. Esse último é o mais utilizado atualmente.

O GA possui suas limitações que estão associadas a alta sensibilidade em relação aos seus parâmetros, que são: número máximo de iterações, tamanho da população de indivíduos, probabilidade de *crossover*, probabilidade de mutação, porção de pais e a taxa de elitismo. Além disso, o algoritmo costuma necessitar de muitas iterações para garantir a adequada convergência dos resultados, (YANG, 2010).

3.1.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

O PSO é um algoritmo de otimização heurística baseada no comportamento coletivo de animais, como bandos de pássaros e cardumes de peixes, no qual a posição e orientação de cada indivíduo é influenciada pelo comportamento do grupo, (YANG, 2010). Comparativamente, cada partícula pode ser entendida como um indivíduo no AG e o enxame a sua correspondente população. Da mesma forma que o GA, as partículas iniciais são geradas de forma aleatória.

O sistema de partículas é definido por vetores com suas direções e sentidos, em que cada partícula possui uma posição x_i no espaço viável de busca e uma velocidade v_i que simula o tamanho do passo com que a partícula avança em uma determinada direção. As Equação (1) e

Equação (2) apresentam os cálculos para atualização da posição $x_{ij}(t + 1)$ e do vetor velocidade $v_{ij}(t + 1)$ de cada partícula, respectivamente, (ENGELBRECHT, 2007).

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1), \quad (1)$$

$$v_{ij}(t + 1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)], \quad (2)$$

onde $v_{ij}(t)$ e $x_{ij}(t)$ são a velocidade e a posição da partícula i na dimensão j no tempo t , $r_{1j}(t)$ e $r_{2j}(t)$ são valores aleatórios em um intervalo de 0 a 1, que introduzem um elemento estocástico no algoritmo. Os dois componentes básicos que representam a informação do indivíduo e a informação do enxame são chamados de componente cognitivo (c_1) e componente social (c_2), respectivamente. Finalmente, $y_{ij}(t)$ e $\hat{y}_j(t)$ são os valores da melhor posição da respectiva partícula e da melhor posição encontrada na dimensão j (l_{best} PSO). Quando a região de vizinhança representa todo o enxame de partículas, o termo $\hat{y}_j(t)$ é o melhor ótimo encontrado por esse enxame (g_{best} PSO), (ENGELBRECHT, 2007).

Esses dois tipos de PSO possuem suas vantagens e desvantagens. A começar, o l_{best} PSO possui maior diversidade de busca, sendo menos suscetível a ficar preso em um ótimo local. Por outro lado a formulação do l_{best} PSO é mais complexa e o tempo de processamento computacional mais elevado quando comparado com g_{best} PSO. O presente trabalho adotou o algoritmo g_{best} PSO, cujo processo geral está ilustrado no pseudocódigo apresentado na Figura 15.

Como forma de ter um mecanismo de controle do processo de exploração global e local, um coeficiente chamado de momento da partícula (w) é adicionado a função de velocidade das partículas, (ENGELBRECHT, 2007). A Equação 2 pode ser atualizada para a Equação (3).

$$v_{ij}(t + 1) = wv_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (3)$$

De acordo com Engelbrecht (2007), quando se aumenta o valor de w ($w > 1.0$) a exploração global do algoritmo aumenta, aumentando a diversidade do espaço de busca. Por outro lado, para valores menores ($w < 1.0$) a exploração local aumenta, o que melhora a busca por ótimos locais. É importante notar, que quanto menos relevante for o vetor de quantidade de movimento $wv_{ij}(t)$ mais significante se torna os componentes cognitivos e sociais (c_1 e c_2) do algoritmo.

Figura 15 - Pseudocódigo g_{best} PSO

```

Criação de  $n$  partículas aleatórias e inicialização;
Repetir até que a condição de parada seja satisfeita:
    Para cada partícula  $i = 1, \dots, n$  fazer:
        / Melhor posição da partícula
        Se  $f(x_i) < f(y_i)$  então:
             $y_{i_j} = x_{i_j}$ ;
        / Melhor posição do enxame
        Se  $f(y_i) < f(\hat{y})$  então:
             $\hat{y} = y_i$ ;
    Para cada partícula  $i = 1, \dots, n$  fazer:
        Atualizar a velocidade da partícula;
        Atualizar a posição da partícula;
Retornar:
    Melhor partícula  $\hat{y}$ ;

```

Fonte: Autor (2022)

De acordo com Engelbrecht (2007), é comum a adoção de valores iguais ou muito próximos entre os componentes c_1 e c_2 , pois mantém um bom equilíbrio entre a partícula e seu enxame. Valores altos de c_2 proporcionam uma diminuição da variabilidade do algoritmo e uma rápida convergência das partículas para o mesmo ponto ótimo. Isso se torna atrativo em problemas com um espaço de busca suavizado. Enquanto um alto valor de c_1 é melhor para determinar outros pontos ótimos locais do problema de otimização. Assim, muitos estudos têm demonstrado que o comportamento do algoritmo PSO é muito sensível a escolha dos valores de seus parâmetros (c_1, c_2 e w), (ENGELBRECHT, 2007). Apesar de algumas divergências entre as recomendações em bibliografias, é possível identificar um intervalo de valores para os parâmetros c_1 e c_2 , variando de 0,50 a 3,00. Perez e Behdinan (2007) afirmam que a escolha de valores de $\{c_1, c_2\}$ iguais a $\{2, 2\}$ e $\{3, 1\}$ proporcionaram resultados melhores na otimização de estruturas treliçadas.

Os parâmetros podem ser fixos ou variáveis ao longo das iterações do algoritmo, utilizando ajustes aleatórios, lineares e não lineares para aumento ou diminuição gradual. Além disso, Van den Berg e Engelbrecht (2006) apud Engelbrecht (2007) mostram que a aplicação da Equação (4) garante uma convergência da trajetória das partículas e sua aplicação é recomendada.

$$w > \frac{1}{2}(c_1 + c_2) - 1 \quad (4)$$

Como último parâmetro tradicional alternativo que o algoritmo pode conter tem-se o coeficiente de constrição (χ). De acordo com Engelbrecht (2007) esse parâmetro foi desenvolvido por Clerc (1999) como uma abordagem similar ao parâmetro de momento (w) que permite garantir o bom comportamento (não divergente) do algoritmo. Desta forma, a equação do vetor velocidade altera-se para a Equação (5) e o cálculo de χ é dado pela Equação (6).

$$v_{ij}(t + 1) = \chi \left[v_{ij}(t) + \phi_1 (y_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + \phi_2 (\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)) \right], \quad (5)$$

$$\chi = \frac{2K}{|2 - \phi - \sqrt{\phi(\phi - 4)}|}, \quad (6)$$

onde $\phi_1 = c_1 r_1$ e $\phi_2 = c_2 r_2$. Sendo que $\phi \geq \{(c_1 + c_2), 4, 0\}$ e $K \in [0, 1]$. Observa-se que se K for muito próximo de 0, a posição da partícula será pouco atualizada, o que permite analisar pontos muito próximos entre si. Por outro lado, se K for muito próximo de 1,0 a convergência se torna demorada, mas muitos pontos de exploração global são analisados. O valor $K = 0,80$ é usualmente empregado.

3.1.3 *Harmony Search (HS)*

O algoritmo HS 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 metaheurísticos tradicionais (GA e PSO). O HS é baseado no fenômeno artificial de harmonia musical. De acordo com os autores, Geem e Kim (2001), a música é um dos processos mais satisfatórios já produzidos pela humanidade. Trata-se de uma combinação de sons que possam produzir um único som harmônico ao ouvido, buscando a melhor combinação possível. Geem e Kim (2001) estabeleceram uma comparação entre um

problema de otimização e a performance musical com o objetivo de mostrar as similaridades. Os seguintes 4 fatores foram utilizados: “melhor estado”, “estimado por”, “estimado com” e “unidade de processo”. Um quadro adaptado de Geem e Kim (2001) é apresentado a seguir pela Tabela 1.

Tabela 1. Comparativo entre o processo de otimização e o arranjo musical

Fator de Comparação	Processo de Otimização	Processo de Performance Musical
Melhor estado	Ótimo Global	Harmonia Ótima
Estimado por	Função Objetivo	Padrão Harmônico
Estimado com	Valores das Variáveis de Projeto	Notas Musicais
Unidade de processo	Número de Iterações	Número de Práticas

Fonte: Adaptado de Geem e Kim (2001)

E os 4 passos fundamentais do algoritmo HS são:

- Passo 01. Inicializar a Memória Harmônica (*Harmony Memory* - HM);
- Passo 02. Gerar um novo harmônico para a HM;
- Passo 03. Se o novo harmônico é melhor do que o pior harmônico existente, então inclui o novo harmônico e exclui o pior da HM;
- Passo 04. Se o critério de parada não é satisfeito, então volte ao passo 02. Senão, finaliza o processo de otimização.

Com o intuito de evitar ficar preso aos mesmos valores de variáveis e não atingir melhoras de resultados, o algoritmo possui a Taxa de Consideração da Memória Harmônica (*Harmony Memory Considering Rate* – HMCR) como parâmetro, onde é dado como um valor entre 0 e 1 a ser definido pelo usuário, usualmente igual a 0,95. Isso determina a probabilidade de uma variável ter seu valor escolhido da HM ou entre todos os valores iniciais de projeto.

De acordo com Geem e Kim (2001), muitas vezes os algoritmos metaheurísticos possuem dificuldade em determinar a melhor solução, ficando preso em soluções quase-ótimas. Uma estratégia foi elaborada no HS para auxiliar nessa busca pela solução ótima, e esse parâmetro é chamado de Probabilidade de Ajuste de Nota (*Pitch Adjustment Rate* - PAR). As listas de valores de cada variável de projeto são organizadas em ordem crescente, e cada valor anterior e posterior a outro é chamado de vizinho. O parâmetro PAR indica a taxa de probabilidade de o algoritmo escolher um valor vizinho (anterior ou posterior) do valor já escolhido. De forma simplificada, se existe os seguintes valores possíveis {A, B, C, D, E, F, G} para uma variável x_1 , se o valor B é o escolhido, então existe uma probabilidade igual a PAR do valor B ser

trocado ou pelo valor A ou pelo valor C. Valores próximos a 0,10 para o parâmetro PAR são mais usuais.

De acordo com Yang (2009) o processo de ajuste de nota é determinado por dois parâmetros: PAR e Largura de Banda da Nota (*pitch band-width* - b_w). Quando o processo de ajuste de nota ocorre, um valor de variável vizinho deve ser escolhido e ajustado por b_w . Esse processo de formação de uma nova variável é determinado pela Equação (7), (YANG, 2009). Onde ε é um número aleatório do intervalo de $[-1, 1]$. Originalmente b_w era tomado como constante igual a 1, porém é possível alterar esse valor, criando uma vizinhança maior de opções de valores. O processo de otimização do HS com a inclusão desse último parâmetro é apresentado em forma de pseudocódigo na Figura 16, onde a função $u([0, 1])$ retorna um valor aleatório entre 0 e 1.

$$x_i = x_j + b_w * \varepsilon, \quad (7)$$

Figura 16 - Pseudocódigo do algoritmo HS

```

Criação de  $n$  harmônicos aleatórios e inicialização;
Definição do parâmetro PAR e  $b_w$  para cada variável de projeto;
Repetir até que a condição de parada seja satisfeita:
    Cálculo da função objetivo  $f(x)$ ;
    Ordenamento do melhor ao pior harmônico na HM;
    Geração de um novo harmônico;
    Para cada variável de projeto:
        Se  $HMCR \geq u([0, 1])$ :
            Escolha aleatória de um valor existente na HM;
            Se  $PAR \geq u([0, 1])$ :
                Ajuste de valor pelo parâmetro  $b_w$ ;
            Senão:
                Escolha aleatória de qualquer valor dentro do intervalo limite;
        Cálculo da função objetivo  $f(x)$  do novo harmônico gerado;
        Se  $f(H_{novo}) < f(H_{pior})$ :
            Aceita a solução do novo harmônico;
    Retornar:
        Melhor harmônico ( $H_{melhor}$ );

```

Fonte: Autor (2022)

Desde a criação original de Geem e Kim (2001), o algoritmo HS tem sido modificado por diversos autores em busca de uma melhor eficiência no desempenho. Mahdavi et. al. (2007) modificou os parâmetros constantes PAR e b_w para que variassem ao longo das iterações, adotando valores crescentes para PAR e decrescentes para b_w . Cheng et. al. (2008) aplicaram um mecanismo similar ao GA, em que as melhores harmonias possuem maiores chances de serem escolhidas para a geração de uma nova harmonia, e mais de uma harmonia é gerada a cada iteração.

Outras duas modificações do HS foram estudadas (DEGERTEKIN, 2012) para a aplicação de problemas de treliças com até 29 variáveis de projeto. A primeira, *Efficient Harmony Search* (EHS), considera uma variação decrescente em função exponencial ao longo das iterações do parâmetro b_w , e uma variação decrescente linear do parâmetro PAR. A segunda, *Self-adaptive Harmony Search* (SAHS), de forma similar mantém a variação linear do parâmetro PAR, no entanto substitui o parâmetro b_w por uma relação entre o valor existente no HM e o novo valor escolhido para a variável de projeto, (DEGERTEKIN, 2012).

3.2 ESTRUTURAS METÁLICAS EM EDIFICAÇÕES INDUSTRIAIS

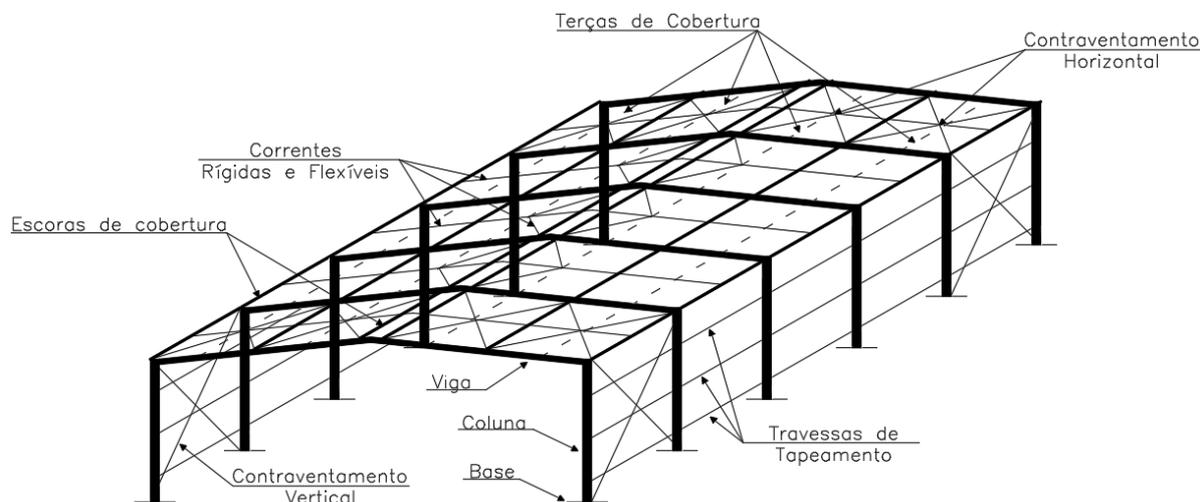
O presente estudo aborda aspectos estruturais de pórticos de galpões industriais, muito utilizado por indústrias automotivas, concreteiras, armazéns etc. Esses edifícios industriais são geralmente projetados para fornecer um ambiente livre interno, e que possam receber equipamentos pesados, pontes rolantes, escritórios e mezaninos. Ainda de acordo com a SCI (2008), o modelo comumente utilizado consiste em um pórtico rígido, com barras de seção I ou treliçadas por perfis cantoneiras e seção U.

A estrutura de um galpão industrial é constituída por seus elementos principais que formam os pórticos (base, coluna e viga) que são repetidos ao longo de todo o comprimento da edificação, e por seus elementos estruturais secundários, como as terças de cobertura, travessas laterais, correntes rígidas e flexíveis, e elementos de contraventamento. De acordo com Fakury (2017), a integração do contraventamento com as terças ou travessas é chamada de escora. Uma estrutura típica de galpão é ilustrada na Figura 17.

A SCI (2008) apresenta diversos modelos de estruturas de pórticos que podem ser utilizadas como por exemplo: estruturas de pórtico rígido com bases fixas; pórticos com elementos não-prismáticos com bases rotuladas; pórticos treliçados; estruturas com contraventamento; estrutura de cobertura sem terças; estrutura com vigas suspensas e estruturas atirantadas. Os

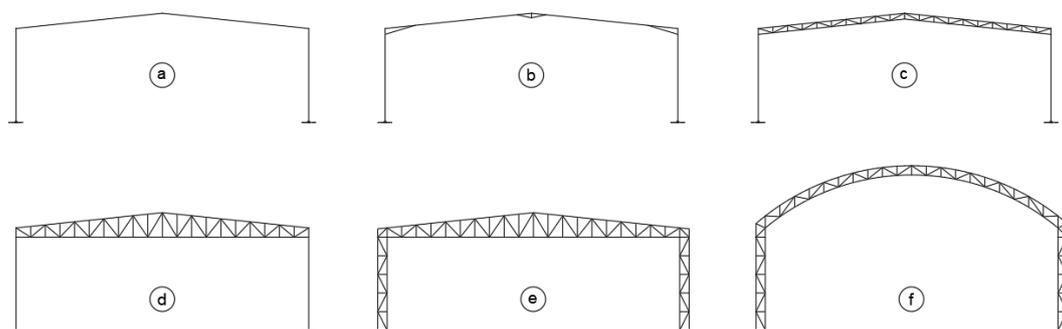
modelos mais comumente utilizados são os pórticos de seção I, com colunas não-prismáticas, bases rotuladas e ligação viga-pilar rígida ou semirrígida. Esse modelo elementar pode sofrer uma modificação para vigas treliçadas quando se é necessário vencer grandes vãos. Alguns modelos de estruturas são ilustrados na Figura 18.

Figura 17 - Estrutura geral de um galpão industrial



Fonte: Autor (2022)

Figura 18 - a) Pórtico Rígido b) Pórtico Rígido com Mísulas c) Viga Treliçada d) Tesoura Treliçada e) Pórtico Treliçado f) Estrutura Treliçada em Arco



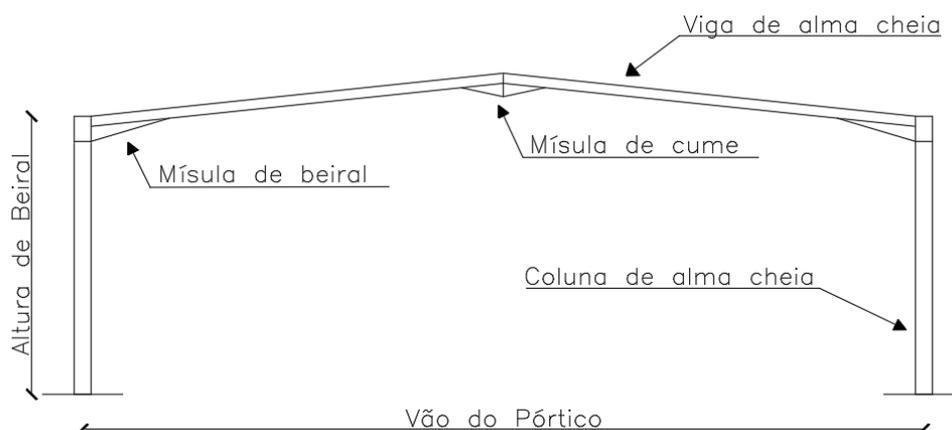
Fonte: Autor (2022)

Os pórticos industriais tendem a possuir ligação viga-coluna resistente ao momento fletor, com o auxílio do uso de mísulas nos beirais e cumeeira, proporcionando estabilidade no plano. A utilização de mísulas na estrutura costuma melhorar o desempenho à resistência dos altos momentos fletores nas extremidades, proporcionando redução dos elementos primários, vigas e colunas. Porém a redução excessiva da viga pode causar problemas de estabilidade na estrutura, (SALTER et. al., 2004). Enquanto as ligações entre pilares e vigas costumam ser

rígidas, as ligações pilar-base usualmente são definidas como rotuladas, pois proporcionam maiores economias com execução mais simples e fundações menores. Entretanto, bases com um mínimo de rigidez podem ser exigidas, quando as cargas horizontais se tornam altas em relação as cargas verticais, (SCI, 2008). A estrutura mais comum de edificações industriais é de pórticos de vãos únicos e simétricos, conforme Figura 19, com as seguintes características, (SCI, 2008):

- Vãos de 15 a 50 metros (25 a 35 são os mais usuais);
- Altura de beirais entre 5 e 10 metros (5 a 6 metros são os mais usuais);
- Inclinação de telhado entre 5 e 10 graus (6° o mais usual);
- Espaçamento entre pórticos de 5 a 8 metros (espaçamentos maiores estão associados a vãos maiores);
- Utilização de Mísulas nas vigas na conexão de beirais e no cume.

Figura 19 Modelo de Pórtico Rígido

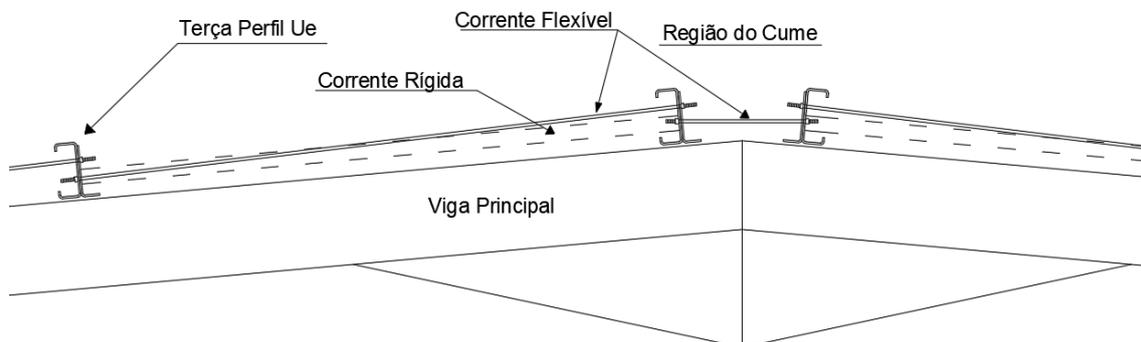


Fonte: Autor (2022)

De acordo com a SCI (2008) a estabilidade fora do plano é na maioria dos casos fornecida por elementos adicionais, como tirantes tubulares, terças e travessas laterais. Esses elementos podem atuar em conjunto na contenção lateral da estrutura principal (pórtico). Usando telha perfilada, o enrijecimento da cobertura pode ser obtido pelas tensões de diafragma de pele, sem adicionar contraventamentos horizontais de cobertura. Assim, uma análise global da estrutura verificando sua estabilidade frente a ações dinâmicas, proporciona auxílio na

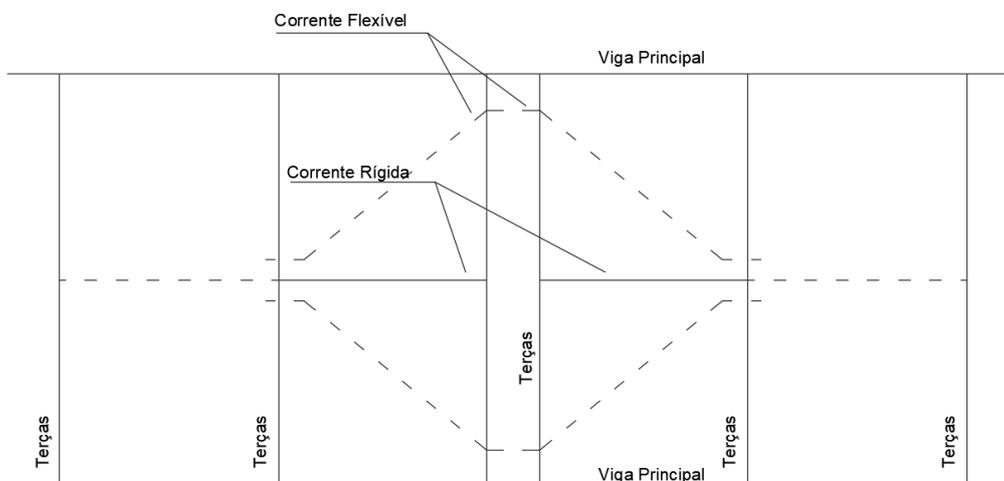
verificação dos contraventamentos. As Figura 20 e Figura 21 apresentam uma vista frontal e de topo de um modelo típico de contenções de terças, respectivamente.

Figura 20 Vista frontal de sistema de correntes em Terças



Fonte: Autor (2022)

Figura 21 Vista de topo de sistema de correntes em Terças



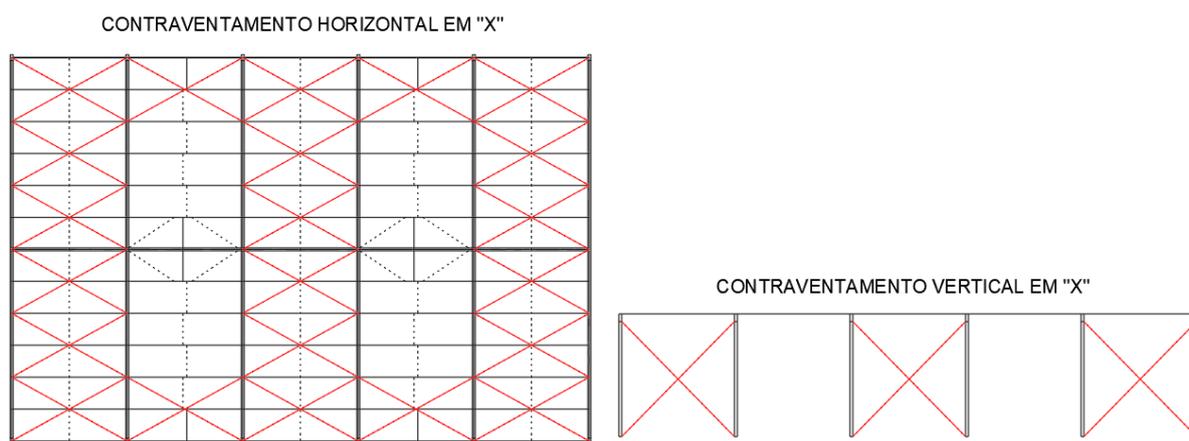
Fonte: Autor (2022)

As correntes rígidas e flexíveis são sistemas de contenção que auxiliam na estabilidade das terças e travessas, reduzindo o comprimento de flambagem lateral. A corrente flexível é disposta entre as terças intermediárias, costuma ser projetada em barras circulares de aço com rosca de extremidade e aperto de porca para resistirem a esforços unicamente de tração, enquanto a corrente rígida é disposta na terça de bordo e cumeeira, e costuma ser projetada em perfis cantoneira, resistindo a esforços de tração e compressão (BELLEI, 1998).

Nas estruturas metálicas é comum a utilização de tirantes especificados em barras redondas com extremidades rosqueadas dispostas em X como sistema de contraventamento horizontal e vertical. Assim, é comum nessas edificações que em uma direção as subestruturas de

contraventamento são os próprios pórticos rígidos e na outra direção o próprio contraventamento, (FAKURY, 2017). Os sistemas de contraventamento garantem estabilidade durante a vida útil da edificação e durante a fase de montagem da estrutura. Os que são dispostos na cobertura fazem parte da formação de diafragma rígido junto as telhas, distribuindo os esforços horizontais provenientes da força do vento, e os contraventamentos verticais além de estabilizarem a estrutura fora do plano dos pórticos rígidos, conduzem as cargas superiores até as fundações, (BELLEI, 1998). A Figura 22 apresenta contraventamentos horizontais e verticais.

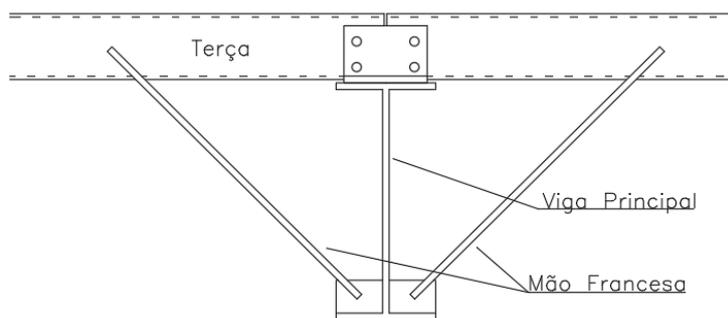
Figura 22 Sistema de contraventamento em X



Fonte: Autor (2022)

Um elemento de travamento muito empregado é a mão francesa que conecta o banzo inferior de treliças ou a mesa de perfis de alma cheia às terças de cobertura. Fakury (2017) salienta que apenas o banzo superior da viga principal está contida lateralmente pelas terças tipo escora, e por essa razão, deve ser previsto sistema de contenção lateral nessa região, como a aplicação de mão francesa. Além de proporcionar contenção lateral, de acordo com Bellei (1998) as mãos francesas podem ser utilizadas como apoio das terças, reduzindo o vão, porém devem ser projetadas para tal função.

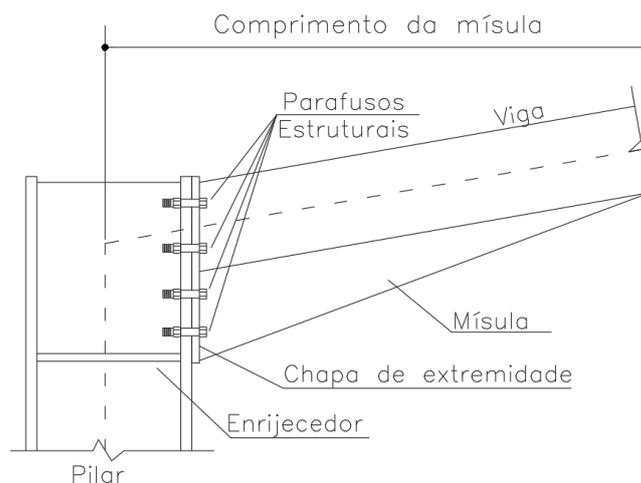
Figura 23 Mão Francesa como contenção lateral da Viga



Fonte: Autor (2022)

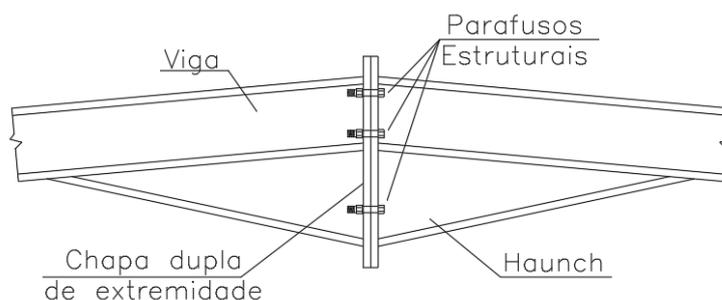
As três maiores ligações são as dos beirais (Figura 24), do cumeeiro (Figura 25) e da fundação (Figura 26). De acordo com CSI (2008) conexões parafusadas são as mais comuns, no qual chapas de extremidade são usadas. O elemento mísula pode ser inserido para melhor eficácia da conexão e geralmente é feito da mesma seção da viga, no qual é soldado nela. Salter et. al. (2004) menciona os benefícios da utilização de mísulas nas ligações, destacando o aumento da resistência ao momento fletor máximo nessas regiões, permitindo vigas menores, e providenciando altura adequada para ligação com a chapa de extremidade, satisfazendo os espaçamentos exigidos pelos parafusos.

Figura 24 - Ligação típica nos beirais



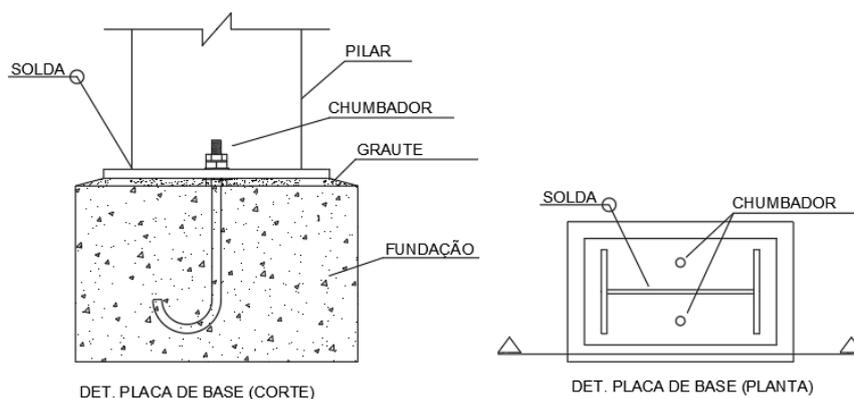
Fonte: Autor (2022)

Figura 25 - Ligação típica no cume



Fonte: Autor (2022)

Figura 26 - Ligação típica de base rotulada



Fonte: Autor (2022)

3.3 BARRAS DE AÇO NÃO-PRISMÁTICAS

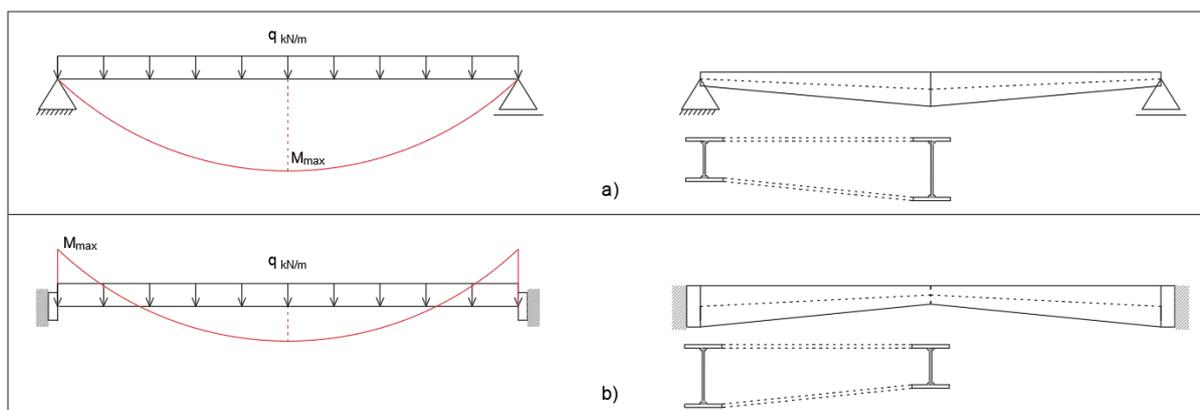
Usualmente as estruturas de aço são dimensionadas por critérios de verificação quanto ao Estado Limite Último (ELU) e ao Estado Limite de Serviço (ELS), verificando as propriedades geométricas da seção transversal do perfil contra os valores máximos dos esforços do elemento de barra. Nomeia-se barras prismáticas àquelas que possuem uma única seção transversal ao longo de todo o comprimento.

As barras de aço não-prismáticas (*non-prismatic member*) possuem uma ou mais dimensões da seção transversal variando ao longo do comprimento da barra, comumente a dimensão da altura da alma do perfil, conhecida como seção de altura variável (*web-tapered*). Elas propõem uma estratégia de economia de material ao considerar a variação da altura do perfil conforme ocorre a variação do diagrama de momentos fletores, que por sua vez tende a ser o principal esforço atuante na barra para a maioria das estruturas. A Figura 27 a seguir,

apresenta um elemento de viga bi apoiada e engastada com seus diagramas de momento fletor e uma alternativa de barra não-prismática para cada caso, respectivamente.

O dimensionamento de barras com a altura da alma variada ao longo do comprimento é abordado em diversos estudos, principalmente em relação à estabilidade do elemento. Neste trabalho serão descritas algumas recomendações normativas do *Design Guide 25 (AISC, 2011)*, o qual foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 27 Exemplo de vigas não prismáticas: a) viga bi apoiada b) viga engastada



Fonte: Autor (2022)

O *Design Guide 25 (AISC, 2011)* é baseado na antiga norma da *AISC Specification for Structural Steel Buildings* de 2005 e em algumas bibliografias de referência do assunto como Kim e White (2006 e 2007). Ele fornece um guia técnico de cálculo para a análise de elementos não-prismáticos, com algumas limitações de projeto:

- Tensão de escoamento do aço $f_y \leq 38 \frac{kN}{cm^2}$;
- Aplicável apenas a elementos homogêneos;
- A variação da altura da alma deve ser linear e restrita a um ângulo de inclinação máximo de 15°;
- A espessura da mesa deve ser maior ou igual a espessura da alma;
- A esbeltez da mesa deve ser limitada a $\frac{0,5 b_f}{t_f} \leq 18$;
- $b_f \geq \frac{h_{max}}{7}$, para cada trecho de comprimento destravado (L_b);

- A esbeltez da alma sem enrijecedores deve ser $\frac{h_{max}}{t_w} \leq \frac{0,40E}{f_y} \leq 260$;

onde h_{max} representa a maior altura da alma existente em cada elemento.

A estabilidade dos elementos estruturais pode ser verificada de acordo com um dos 3 métodos apresentados pelo *Design Guide 25* (AISC, 2011) que são: o método do comprimento efetivo (ELM), o método da análise direta (DM), o método de análise de primeira ordem (FOM). Cada método possui suas vantagens e desvantagens, no entanto de acordo com o *Design Guide 25* (AISC, 2011), o método DM é o único que é permitido para todas as estruturas e combinações de ações. O uso dos demais métodos é limitado pela deslocabilidade da estrutura, onde a razão entre o deslocamento lateral de segunda ($d_{x_{2nd}}$) e primeira ordem ($d_{x_{1st}}$) deve ser menor ou igual a 1,5, avaliado para uma combinação última de projeto.

A maior diferença de análise entre os elementos prismáticos e não-prismáticos é a verificação da estabilidade da barra no plano e fora do plano (x-z e y-z). Em barras comprimidas é importante identificar os modos de flambagem que possam levar a ruptura do elemento. A carga crítica de flambagem elástica (N_e) para barras não-prismáticas é apresentada na Equação (8).

$$N_e = \frac{\pi^2 EI'}{KL^2} \quad (8)$$

onde E é o módulo de elasticidade do aço, K é o fator de ajuste do comprimento de flambagem efetivo e L é o comprimento destravado da barra na direção considerada, e I' é o momento de inércia da seção equivalente de elementos não-prismáticos calculado para uma seção transversal localizada a uma distância c da extremidade da barra com menor altura de alma. As equações (9) e (10) definem a distância (c) para avaliação da carga crítica de flambagem elástica na direção principal do plano (N_{e_x}) e fora do plano (N_{e_y}), respectivamente.

$$c = 0,50L_x \left(\frac{I_{x_{min}}}{I_{x_{max}}} \right)^{0,0732} \quad (9)$$

$$c = \frac{L_y}{2} \quad (10)$$

Onde L_x e L_y são os comprimentos destravados de barra no plano e fora do plano, respectivamente. Sendo comum que L_x seja igual ao comprimento total da barra (L_{barra}), enquanto L_y seja igual ao comprimento entre contenções laterais (L_b). $I_{x_{min}}$ e $I_{x_{max}}$ são os momentos de inércia na direção x mínimo e máximo, respectivamente. O *Design Guide 25* (AISC, 2011) recomenda outros dois métodos de determinação da carga crítica de flambagem que apresentam maior precisão, mas se baseiam em procedimentos mais complexos.

Em elementos não-prismáticos com variação linear da altura da alma ou largura da mesa, os esforços solicitantes devem ser verificados para as seções de extremidade e no ponto médio do elemento para cada comprimento destravado. As recomendações normativas para as verificações dos esforços de compressão, flexão simples e cisalhamento estão descritas nos itens 5.3, 5.4 e 5.6 do *Design Guide 25* (AISC, 2011)

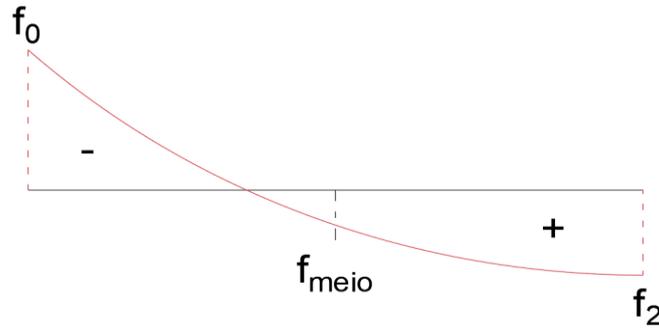
Os critérios de segurança aos esforços de flexão simples para barras não-prismáticas levam em conta dois estados limites últimos de projeto: flambagem lateral com torção (FLT) e flambagem local da mesa (FLM). A verificação à FLT considera o coeficiente de ajuste do diagrama de momento fletor (C_b) determinado a partir dos esforços atuantes nas extremidades e no ponto médio do elemento, conforme as Equações (11) e (12) e a Figura 28.

$$C_b = 1,75 - 1,05 * \frac{f_1}{f_2} + 0,30 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \leq 2,30 \quad (11)$$

$$f_1 = f_0, \quad \text{se } |f_{meio}| < \left| \frac{f_0 + f_2}{2} \right|, \quad (12)$$

$$f_1 = 2f_{meio} - f_2 \geq f_0, \quad \text{se } |f_{meio}| \geq \left| \frac{f_0 + f_2}{2} \right|$$

Figura 28 Análise do diagrama de momento fletor



Fonte: Autor (2022)

Onde f_2 é igual ao momento fletor máximo positivo das extremidades do elemento, f_{meio} é o momento fletor atuante na seção central da barra, independentemente de seu valor, e f_0 é o momento atuante na extremidade oposta a f_2 . O valor de f_1 depende dos valores de f_0 e f_2 , conforme a Equação (12). Em caso de $f_{meio} \geq f_2$, ou $f_2 = 0$, ou se tratar de um elemento em balanço, o coeficiente C_b deve ser tomado igual a 1,0.

O critério de verificação da resistência do elemento de alma do perfil é considerado pelo fator de plastificação da alma (R_{pc}) e fator de flambagem da alma (R_{pw}). Esses fatores que são aplicados na determinação do momento resistente para os estados limites últimos de FLM e FLT. O R_{pc} é aplicável às seções transversais com almas compactas ou não compactas, com seu valor mínimo igual a 1,0, e valor máximo igual a M_p/M_{yc} . Onde M_p é o momento de plastificação da seção do perfil e M_{yc} é o momento de início do escoamento calculado para a região da mesa comprimida, conforme é apresentado nas Equações (13), (14) e (15).

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}}, \quad \lambda = \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw}, \quad (13)$$

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \leq \frac{M_p}{M_{yc}}, \quad (14)$$

$$R_{pc} = 1,0, \quad \lambda = \frac{h_c}{t_w} \geq \lambda_{rw}, \quad (15)$$

onde λ refere-se a esbeltez do elemento, o subíndice w refere-se a alma do perfil, os subíndices r e p referem-se a esbeltez limite do regime elástico e regime plástico,

respectivamente. h_c é o dobro da distância do centroide da seção até a face interna da mesa comprimida e t_w é a espessura da alma.

O R_{pg} é um fator de redução aplicado às seções de perfis com alma esbelta, com seu valor limite igual a 1,0 para perfis com seção de alma compacta ou não compacta, conforme Equação (16). No caso de elementos de alma esbelta, R_{pg} pode ser determinado conforme as Equações (17) e (18), de acordo com o *Design Guide 25* (AISC, 2011).

$$R_{pg} = 1,0, \quad \lambda = \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \quad (16)$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300 a_w} (\lambda - \lambda_{rw}) \leq 1,0 \quad (17)$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 10, \quad (18)$$

onde b_{fc} e t_{fc} são a largura e espessura da mesa comprimida do perfil, respectivamente. De acordo o Design Guide 25 (AISC, 2011), a tensão da flambagem elástica lateral com torção (F_{eFLT}) deve ser determinada (conforme Equação (19)) para cada trecho destravado da barra (L_b) considerando as propriedades geométricas da seção intermediária.

$$F_{eFLT} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{J}{S_{xc} h_0} \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2}, \quad (19)$$

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(\frac{h_0}{d} + \frac{a_w h^2}{h_0 d}\right)}}, \quad (20)$$

onde r_t e J são o raio de giração e o momento de inércia polar da seção, h_0 é a distância entre os centroides das mesas do perfil e d e h são a altura total do perfil e da alma, respectivamente. Em caso de a alma da seção analisada ser esbelta, a constante de torção J deverá ser tomada igual a 0. Por último, o momento fletor resistente (M_{Rd}) do estado limite último FLT é determinado de acordo com as Equações (21), (22), (23) e (24), conforme o caso aplicável.

$$\text{para } \frac{F_{eFLT}}{f_y} \geq 8,2, \text{ FLT não se aplica} \quad (21)$$

$$M_{Rd} = \Phi_c C_b R_{pc} R_{pg} M_{yc} \left[1 - \left(1 - \frac{F_L}{R_{pc} f_y} \right) \left(\frac{\pi \sqrt{\frac{f_y}{F_{eFLT}} - 1,1}}{\pi \sqrt{\frac{f_y}{F_L} - 1,1}} \right) \right], 8,2 > \frac{F_{eFLT}}{f_y} > \frac{F_L}{f_y}, \quad (22)$$

$$M_{Rd} = \Phi_c C_b R_{pg} F_{eFLT} S_x, \frac{F_{eFLT}}{f_y} \leq \frac{F_L}{f_y} \text{ (seção com alma esbelta)}, \quad (23)$$

$$M_{Rd} = \Phi_c C_b F_{eFLT} S_x, \frac{F_{eFLT}}{f_y} \leq \frac{F_L}{f_y} \text{ (seção sem alma esbelta)}, \quad (24)$$

onde o valor limite de M_{Rd} para qualquer caso é dado por $M_{Rd} \leq R_{pg} R_{pc} M_{yc}$. O coeficiente de minoração do aço (Φ_c) é igual a 0,90. S_x é o modulo de resistência elástico na direção x (maior momento de inércia), f_y é a tensão de escoamento do aço e $F_L = 0,70 f_y$. A combinação dos esforços de compressão e flexão simples é similar à fornecida pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

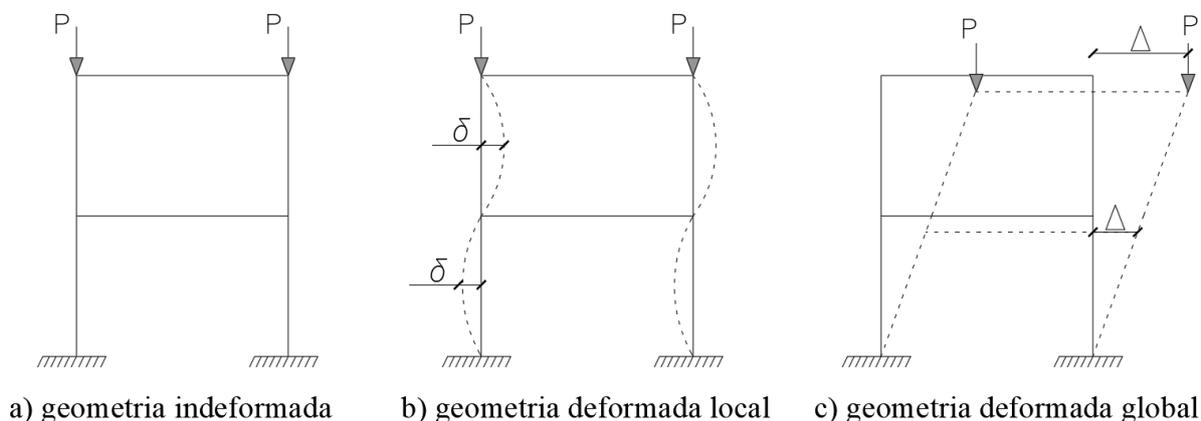
3.4 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM

De acordo com Kimura (2007) os esforços e deslocamentos totais gerados nas estruturas compreendem os efeitos de primeira ordem e de segunda ordem. Os efeitos de primeira ordem são obtidos a partir de uma análise linear elástica do modelo da estrutura indeformada. Um comportamento não linear da estrutura é provocado devido aos efeitos de segunda ordem, que são os esforços adicionais gerados a partir da estrutura deformada, (KIMURA, 2007).

De acordo com Fakury et. al. (2017), o efeito global de segunda ordem é chamado de efeito P- Δ e pode especialmente elevar os esforços axiais e momentos fletores nas barras. É dito efeito global, pois tem consideração a cada pavimento das edificações, sendo analisado o deslocamento horizontal relativo do conjunto estrutura (pórtico ou sistema de contraventamento). Já o efeito local de segunda ordem é denominado de efeito P- δ e considera a configuração deformada de cada barra sofrendo uma resposta de deformação de

acordo com a sua própria força axial atuante. Nota-se que caso a força axial atuante seja de tração ocorre redução do momento fletor. A Figura 29 apresenta os dois tipos de efeitos.

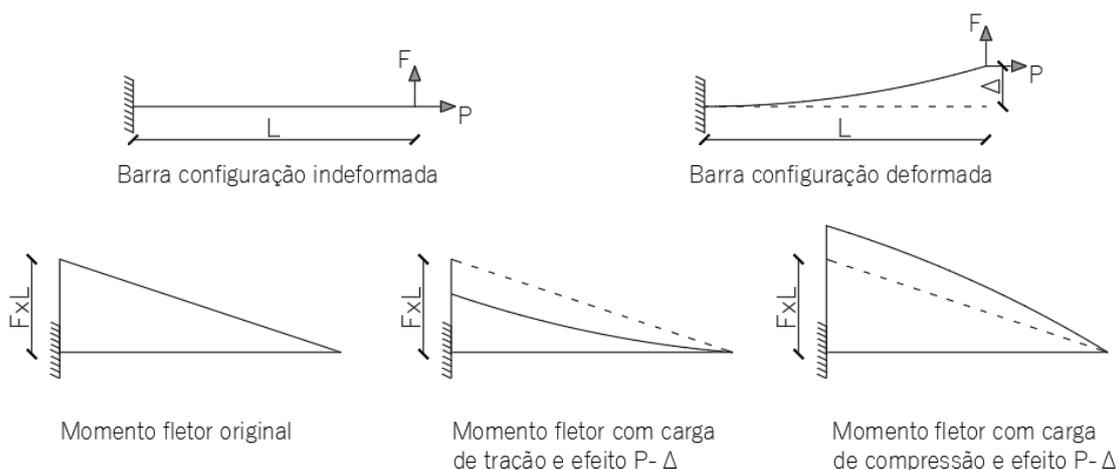
Figura 29 Efeitos de segunda ordem: $P - \Delta$ e $P - \delta$



Fonte: Autor (2022)

Quando se analisa a estrutura em sua forma indeformada, o diagrama de momento fletor atuante na barra é linear. Porém a consideração da geometria deformada causada por uma força axial atuante no elemento proporciona uma nova configuração do diagrama de momento fletor, não mais linear, conforme apresentado na Figura 30. Essa variação é causada pelo produto da carga axial (P) pelo deslocamento transversal da barra (Δ). Deste modo a inclusão de efeitos $P-\Delta$ é recomendada pelo *Analysis Reference Manual* (CSI, 2022) para a adequada consideração dos efeitos das cargas gravitacionais sobre a estrutura (forças axiais que comprimem os elementos).

Figura 30 Influência do efeito $P - \Delta$ na modificação do diagrama de momento fletor



Fonte: Adaptado do Analysis Reference Manual (CSI, 2022)

Os efeitos de segunda ordem associam a amplificação dos esforços sobre a estrutura devido a relação de forças axiais (P) e os deslocamentos transversais (Δ e δ). De acordo com Dobson (2002) uma análise avançada desses efeitos é conhecida como análise não linear estática que se trata de um método iterativo, em que os carregamentos totais são divididos em um número de passos. A cada passo a estrutura é parcialmente carregada e o cálculo dos deslocamentos obtidos, a partir da configuração deformada da estrutura em equilíbrio, uma nova matriz de rigidez é obtida e um novo incremento de passo analisado. O método mais popular para a resolução das equações não lineares é o Newton-Raphson, (DOBSON, 2002).

Lopes et. al. (2005) elaboraram um estudo sobre diferentes métodos de análise P- Δ . Destacam que existem técnicas simplificadas que podem ser vantajosas em análises preliminares como: Método de Dois Ciclos iterativo, Método da Carga Lateral Fictícia, Método da Carga de Gravidade iterativa e o Método da Rigidez Negativa.

Em diversas estruturas os deslocamentos são pequenos o suficiente para que a relação carregamento e deslocamento seja aproximadamente linear. Isso permite com que a equação de equilíbrio estático seja elaborada usando a geometria indeformada, e assim, a equação de equilíbrio torna-se independente do carregamento de carga aplicado e dos deslocamentos calculados, possibilitando a superposição dos carregamentos e tornando a análise computacional mais rápida. Dessa forma, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), um dos critérios de verificação da influência dos efeitos de segunda ordem global (P- Δ) é a classificação das estruturas quanto a sua sensibilidade ao deslocamento lateral, em pequena, média e grande deslocabilidade. A classificação tem como parâmetro a razão entre o deslocamento lateral de segunda ($d_{x_{2nd}}$) e primeira ordem ($d_{x_{1st}}$) obtida para as combinações últimas de projeto.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) fornece o Método da Amplificação dos Esforços Solicitantes (MAES), que permite avaliar a sensibilidade ao deslocamento lateral da estrutura. Esse método divide a estrutura carregada original em duas outras subestruturas iguais, porém com carregamentos diferentes. De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), a primeira estrutura (chamada de estrutura restrita n_t) possui todos os carregamentos (verticais e horizontais) aplicados de acordo com a combinação última de análise, mas com a inserção de apoios laterais no topo dos pilares de cada pavimento que impeçam o deslocamento horizontal. A

segunda estrutura (chamada de estrutura livre l_t) possui como carregamento apenas as reações dos apoios da primeira estrutura, sem a presença destes apoios.

Assim, o primeiro modelo de estrutura n_t serve para a obtenção do efeito local de segunda ordem $P - \delta$ no qual irá obter os deslocamentos laterais de cada barra, mas sem permitir a instabilidade global. Enquanto, o segundo modelo de estrutura obtém os efeitos globais. Para determinar a amplificação dos esforços nas barras, é calculado o coeficiente de amplificação B_1 referente ao efeito $P - \delta$, aplicado sobre os momentos fletores da estrutura n_t . É calculado o coeficiente B_2 referente ao efeito $P - \Delta$ aplicado sobre os momentos fletores e forças axiais da estrutura l_t , (FAKURY et. al., 2017). As formulações dos coeficientes de amplificação são mostradas a seguir.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \left| \frac{N_{n_t} + N_{l_t}}{N_e} \right|} \geq 1,0, \quad (25)$$

C_m é o coeficiente de equivalência de momentos, igual a 1,0 se existir forças transversais no comprimento destravado da barra no plano, ou em todos os outros casos igual a:

$$C_m = 0,60 - 0,40 \frac{M_a}{M_b}, \quad (26)$$

onde M_a e M_b são o menor e o maior momento fletor na barra, respectivamente. N_e é a força axial que provoca flambagem elástica na barra no plano de atuação do momento, calculado como o comprimento destravado real L_b , igual a:

$$N_e = \frac{\pi^2 E_a I}{L_b^2}, \quad (27)$$

onde I é o momento de inércia na direção considerada, e E_a é o módulo de elasticidade do material, devendo ser utilizado o valor reduzido $E_{a_{red}}$ quando a análise abranger imperfeições do material (análise não linear física) com:

$$E_{a_{red}} = 0,80 E_a, \quad (28)$$

N_{n_t} é a força axial na barra extraída do modelo n_t , e N_{l_t} é a força axial da barra extraída do modelo l_t .

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \frac{\Delta_h P_{sd}}{H H_{sd}}}, \quad (29)$$

onde Δ_h é o deslocamento horizontal no topo dos pilares (altura dos beirais) no caso de galpões ou o deslocamento relativo de cada andar no caso de edifícios, obtido na estrutura l_t . R_m é um coeficiente que considera a influência do efeito local na amplificação do deslocamento horizontal Δ_h , igual a 0,85 nas estruturas com pórticos e igual a 1,0 nas subestruturas de contraventamento. H é altura do andar, e no caso dos galpões é a altura medida da base do pilar até os beirais. P_{sd} é carga total gravitacional da estrutura naquele andar obtida na estrutura n_t . H_{sd} é a força horizontal total atuante no andar, obtida na estrutura l_t .

Estruturas com $B_2 \leq 1,10$ são consideradas de pequena deslocabilidade, $1,10 < B_2 < 1,40$ de média deslocabilidade e estruturas com $B_2 \geq 1,40$ de alta deslocabilidade. De acordo com Fakury et. al (2017) esses valores podem ser adotados ligeiramente maiores se a não linearidade física do material ($E_{a_{red}}$) for considerada. Sendo $B_2 \leq 1,13$ para pequena deslocabilidade e $B_2 \geq 1,55$ para alta deslocabilidade. Fakury et. al. (2017) salienta que as estruturas não devem ter classificação de alta deslocabilidade, visto que os métodos de análise e dimensionamento estão baseados na teoria de pequenas deformações.

O *software* SAP2000 é capaz de considerar a não linearidade geométrica da estrutura na forma de efeitos de segunda ordem P- Δ ou grandes-deslocamentos/rotações. Para a análise estática da estrutura o usuário tem a opção de escolher um dos tipos de não linearidade geométrica: sem efeitos, efeitos P - Δ e efeitos de grandes-deslocamentos. A primeira opção resulta em uma análise global linear da estrutura, em que todas as equações de equilíbrio são consideradas de acordo com a configuração indeformada da estrutura. Os efeitos P - Δ , em que as equações de equilíbrio são parcialmente obtidas pela configuração deformada da estrutura. Nessa análise as forças de tração tendem a resistir a rotação dos elementos e aumentar a rigidez da estrutura, enquanto as forças de compressão tendem a desestabilizar a estrutura. A inclusão dos efeitos P- Δ requer um maior número de iterações em cada análise. Por último o efeito de grandes-deslocamentos consideram todas as equações de equilíbrio formuladas de acordo com a configuração deformada da estrutura. Essa última análise é recomendada para a determinação dos modos de flambagem e estruturas de cabos ou

membranas, por exemplo. É recomendado pelo *Analysis Reference Manual* (CSI, 2022) que estruturas complexas sejam discretizadas em um maior número de elementos.

O *software* SAP2000 determina o equilíbrio das equações para cada passo de análise, onde os carregamentos são inseridos parcialmente. Esse equilíbrio é avaliado por um critério de tolerância de erro, e o método de Newton-Raphson é utilizado. Esse critério é verificado comparando a magnitude de erro da força axial calculada pela magnitude da força atuante na estrutura. A adoção de valores de erro muito elevados, tende a proporcionar resultados insatisfatórios, em compensação valores muito pequenos podem não ser possíveis de serem determinados.

De acordo com Fakury et. al. (2017), as análises elásticas comumente utilizadas nos *softwares* não conseguem detectar a não linearidade física do material, que provoca aumento das deformações. Essa análise pode ser simplificada pela redução da rigidez dos elementos, no caso do aço uma redução mínima de 20% do módulo de elasticidade transversal é recomendada pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

4 METODOLOGIA

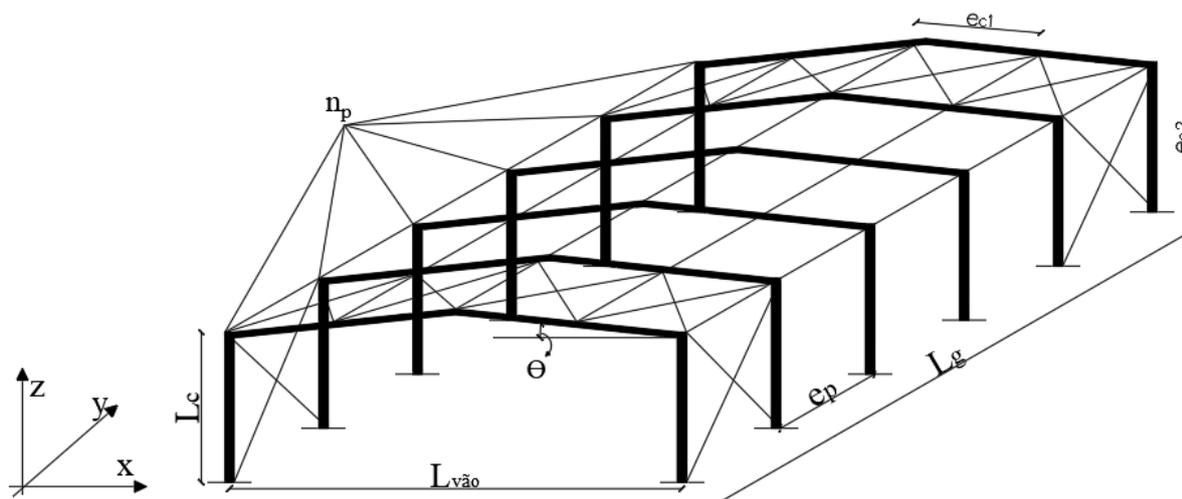
Esse capítulo descreve os diversos elementos que compõem a metodologia proposta para o dimensionamento ótimo dos pórticos de galpões industriais. O trabalho desenvolveu um programa em linguagem Python 3 que contempla um código para a geração da geometria do galpão industrial e a definição do pórtico principal, a criação e composição de todas as ações e suas combinações, uma integração com o *software* SAP2000 para modelagem e análise do pórtico, os procedimentos de verificação quanto aos critérios de segurança e de serviço da estrutura e a aplicação de algoritmos metaheurísticos para a otimização das dimensões das seções transversais dos perfis.

O trabalho adotou o conceito de parametrização das principais características de um projeto de pórtico de galpões industriais com o objetivo de não limitar a metodologia a um único caso particular. Assim, a primeira seção do presente capítulo apresenta os parâmetros de projeto adotados e as características que delimitam o trabalho. Em seguida, a formulação do problema de otimização é apresentada para pórticos com elementos prismáticos e não-prismáticos, onde são descritas as variáveis de projeto, a função objetivo e as restrições do problema de otimização. O processo com que ocorre o dimensionamento ótimo dos pórticos desde a definição dos parâmetros até o retorno da solução otimizada é ilustrado em um fluxograma. Por último, uma descrição dos algoritmos metaheurísticos utilizados no presente trabalho é apresentada.

4.1 PROJETO PARAMETRIZADO DE PÓRTICOS DE GALPÃO INDUSTRIAL

O modelo de galpão industrial (Figura 31) estudado no presente trabalho pode ser descrito por pórticos de vão único e simétricos, construído em perfis I soldados com conexões rígidas entre coluna-viga. A geometria do galpão pode ser parametrizada por suas principais dimensões: comprimento da coluna (L_c), comprimento do vão ($L_{vão}$), comprimento do galpão (L_g), inclinação das vigas (θ), número de pórticos (n_p), espaçamento entre contenções laterais da viga (e_{c_1}) e da coluna (e_{c_2}). As contenções laterais são entendidas como as terças de cobertura e travessas laterais aliadas aos contraventamentos em X. A partir desses parâmetros é possível calcular um espaçamento equidistante entre os pórticos (e_p), possibilitando a determinação dos carregamentos distribuídos sobre as vigas e colunas.

Figura 31 - Modelo de galpão gerado

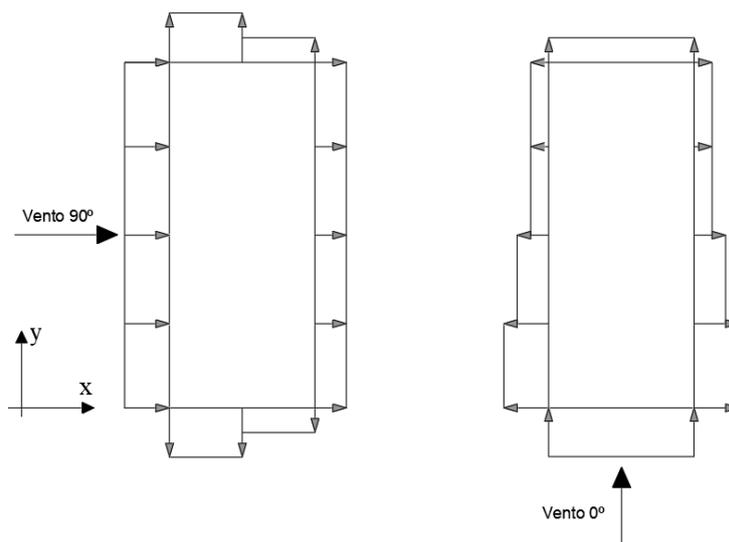


Fonte: Autor (2022)

As cargas aplicadas sobre a estrutura são descritas como parâmetros de carga permanente (CP) e carga acidental (CA) em kN/m^2 . Os carregamentos de vento (CV) são determinados de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988) para carregamento estático equivalente, com as seguintes características: estruturas de galpão retangulares, inclinações de cobertura de até 30 graus, e um fator de rugosidade (S_2) calculada para a cada 3 metros de altura, considerando um terreno de categoria 3 e uma edificação de classe C. Assim, as cargas do vento (CV) são parametrizadas de acordo com a velocidade básica do vento (V_0) em m/s, um fator topográfico (S_1), um fator probabilístico (S_3) e os coeficientes de pressão interna (Cp_i).

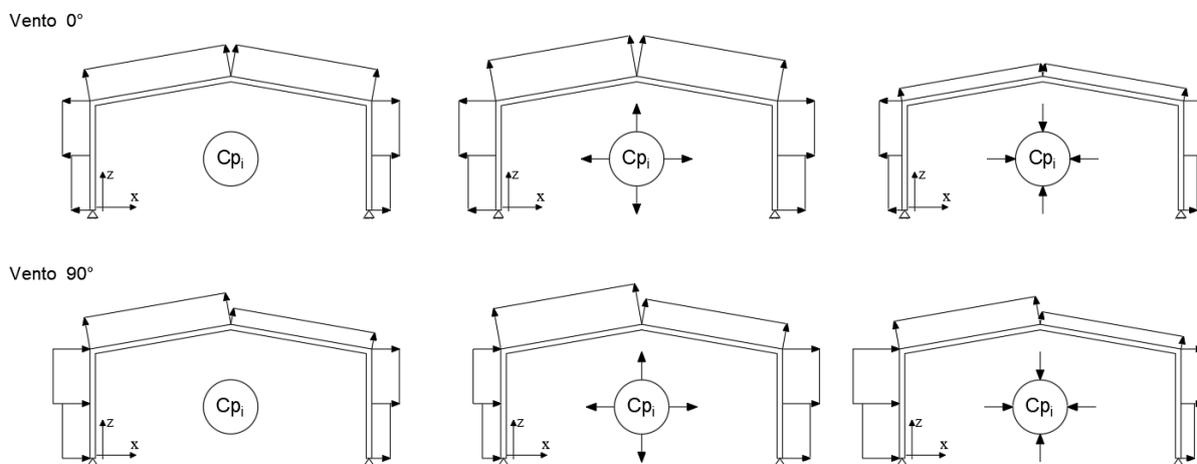
As forças de vento são calculadas para ângulos de incidência iguais a 0° e 90° , correspondendo aos sentidos positivos do eixo x e do eixo y, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 32. Esses ângulos de incidência foram adotados por serem os mais críticos as estruturas retangulares, como os galpões tradicionais. Os carregamentos de vento são obtidos pela combinação dos efeitos externos, dados pelos coeficientes (Cp_e), com os efeitos de pressão interna, dados pelo coeficiente (Cp_i). A Figura 33 ilustra as forças de vento aplicadas sobre um pórtico, onde são apresentadas 3 combinações (nulo, positivo e negativo) para cada ângulo de incidência.

Figura 32 - Direção e sentido dos ângulos de incidência de vento sobre a estrutura de galpão



Fonte: Autor (2022)

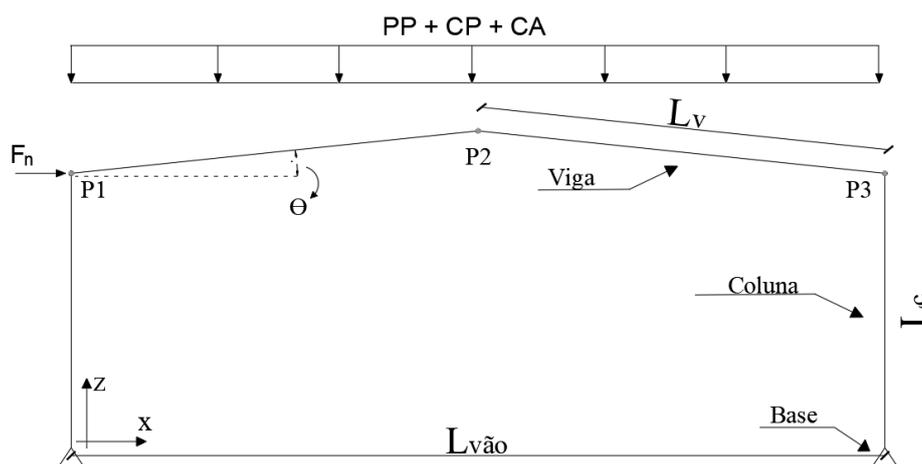
Figura 33 - Modelo de carregamento de vento



Fonte: Autor (2022)

Com o objetivo de introduzir os efeitos das imperfeições geométricas, uma força nocial (F_n) é calculada e aplicada na altura de beiral (ponto P1), provocando deslocamentos horizontais. Essa força F_n (kN) é utilizada na combinação normal de carregamento gravitacional (Figura 34) e determinada de acordo com a Equação (27). Onde P1 e P3 são os pontos da verificação dos deslocamentos laterais, enquanto P2 ao deslocamento vertical. L_v é o comprimento inclinado de uma viga, determinado a partir de $L_{v\tilde{a}o}$ e o ângulo θ .

Figura 34 - Modelo de carregamento gravitacional



Fonte: Autor (2022)

$$F_n = 0,003 * [2 * (e_p * L_v) * (PP + CP + CA)] \quad (30)$$

A partir de todos os carregamentos são elaboradas 3 tipos de combinações de carregamento normal (CN) para o Estado Limite Último (ELU) e frequente (CF) para o Estado Limite de Serviço (ELS), conforme Tabela 2. Observa-se que o peso próprio da estrutura (PP) é determinado pelo *software* SAP2000. E que CV pode assumir qualquer valor da combinação do ângulo de incidência do vento com os coeficientes de pressão interna (Cp_i) como ilustrado na Figura 33.

Tabela 2 Combinações dos carregamentos

CN	$1,25 (PP + CP) + 1,5 (CA) + 1,4 F_n$
	$1,25 (PP + CP) + 1,5 \times 0,8 (CA) + 1,40 (CV)$
	$1,0 (PP + CP) + 1,40 (CV)$
CF	$PP + CP + 0,70 (CA)$
	$PP + CP + 0,60 (CA) + 0,30 (CV)$
	$PP + CP + 0,30 (CV)$

Fonte: Autor (2021)

As propriedades do material aço são parâmetros a serem adotados e são descritas como: a resistência ao escoamento do aço (f_y), o módulo de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G), o coeficiente de Poisson (ν), a massa específica do aço (ρ). Por último, são parâmetros de projeto o tipo de vínculo dos apoios de base das colunas (flexível ou rígido) e os limites de deslocamento vertical ($d_{z\limite}$) e horizontal ($d_{x\limite}$).

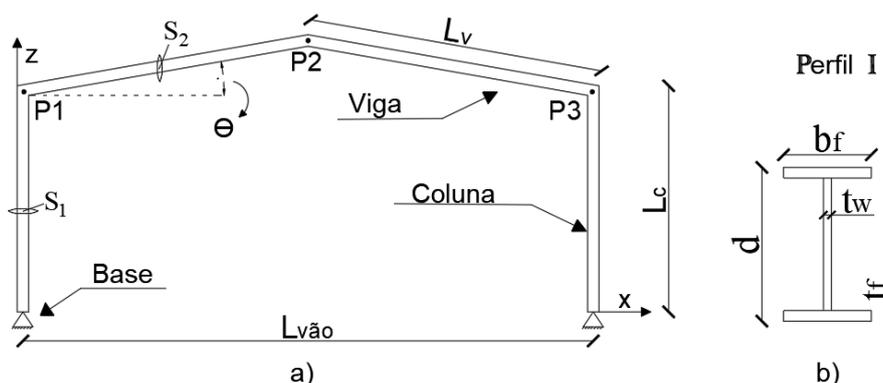
De acordo com *Analysis Reference Manual* (CSI, 2022), elementos de barras podem ser utilizados sem a necessidade da discretização em elementos menores, quando se tratar de estruturas simples. No entanto, quando do uso de análises P- Δ essa divisão dos elementos é recomendada. Assim, ressalta-se que a realização da análise linear do pórtico com cada viga e coluna discretizada em um único elemento é adequada. Mas, com o objetivo de obter a informação dos esforços internos em mais pontos para a verificação da flambagem lateral com torção (FLT), foi adotada a discretização de cada viga e coluna em 8 elementos para os pórticos com barras prismáticas. No caso dos pórticos com barras não-prismáticas, o número de elementos discretos é igual ao número de trechos destravados (L_b) para cada viga e coluna da estrutura.

O modelo de pórtico de aço considera uma análise linear estática dos carregamentos e combinações, não contemplando a não linearidade do material e efeitos de segunda ordem, exceto quando explicitamente informado. A verificação ao ELU da estrutura é feita para cada seção transversal definida em projeto. Os comprimentos de flambagem elástica (KL) de barras comprimidas são tomados iguais aos comprimentos reais das barras ($K = 1,0$).

4.1.1 Pórtico com barras prismáticas

Apresenta-se a formulação do problema de otimização para pórticos com elementos prismáticos, onde serão definidos as variáveis de projeto, função objetivo, restrições de projeto e função de penalidade. A Figura 35 a) apresenta o modelo do pórtico, onde S_1 e S_2 são as seções transversais das colunas e das vigas, respectivamente. E a Figura 35 b) apresenta as dimensões do perfil I.

Figura 35 a) Modelo Pórtico com barras prismáticas b) Seção transversal perfil I



Fonte: Autor (2022)

As variáveis de projeto são as 4 dimensões geométricas de cada seção (S_i) de perfil I, conforme Figura 35. Já a Tabela 3 apresenta a definição de cada variável de projeto, determinando o tipo de variável e seus valores possíveis de serem escolhidos. O conjunto de valores dos limites das variáveis foram definidos de acordo com as dimensões comerciais de perfis soldados CVS.

Tabela 3 Variáveis de projeto de cada seção

Variáveis	Nome	Tipo	Intervalo de valores permitidos (cm)
[d]	Altura do perfil	Contínua	[15; 100]
[b_f]	Largura da mesa	Contínua	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6; 1,9; 2,24; 2,5}
[t_w]	Espessura da alma	Discreta	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6; 1,9; 2,24; 2,5}
[t_f]	Espessura da mesa	Discreta	[10; 70]

Fonte: Autor (2022)

Como o pórtico é simétrico, mas as colunas e vigas podem assumir dimensões diferentes, admite-se uma seção transversal para cada (S_1 e S_2), totalizando 8 variáveis de projeto. Dessa forma, no presente trabalho, o subíndice c e v serão designados sempre aos elementos de coluna e viga, respectivamente. Assim, as variáveis de projeto são: $X = \{d_c, d_v, t_{wc}, t_{wv}, b_{fc}, b_{fv}, t_{fc}, t_{fv}\}$. O objetivo do problema de otimização do presente trabalho é minimizar a massa total do pórtico (kg), sendo a função objetivo definida de acordo com a Equação (31).

$$f(x) = 2\rho(L_c A_c + L_v A_v) \quad , \quad (31)$$

onde A_c , A_v , L_c , L_v na Equação (31), são as áreas da seção transversal (cm^2) e os comprimentos de barra (cm) da coluna e viga, respectivamente. A massa específica do aço (ρ) é igual a 7.850×10^{-6} kg/cm³. A área da seção transversal de um perfil I soldado simétrico pode ser definida pela Equação (32), que é totalmente dependente das variáveis de projeto.

$$A = 2b_f t_f + t_f (d - 2t_f) \quad , \quad (32)$$

Neste trabalho as restrições de projeto são definidas pelos requisitos de segurança dados pelas funções g_1 , g_2 e g_6 referentes ao ELU. A restrição g_1 se refere à verificação quanto ao esforço de cisalhamento (V), a restrição g_2 à verificação do esforço normal de compressão (N_c) combinado com o esforço de flexão (M). As restrições g_1 e g_2 são verificadas para cada

seção de cada viga e coluna em cada combinação normal última de projeto. Os subíndices Sd e Rd se referem às solicitações e resistências de cálculo, respectivamente.

$$g_1 = \frac{V_{sd}}{V_{Rd}} - 1,0 \leq 0, \quad (33)$$

$$g_2 = 0,50 \left(\frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} \right) + \frac{M_{sdx}}{M_{Rdx}} - 1 \leq 0, \text{ para } \frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} \leq 0,20, \quad (34)$$

$$g_2 = \frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sdx}}{M_{Rdx}} \right) - 1 \leq 0, \text{ para } \frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} > 0,20,$$

Os requisitos de funcionalidade referentes ao ELS são definidos pelas restrições de projeto g_3 e g_4 . Essas restrições são avaliadas pelo valor máximo encontrado entre todas as combinações frequentes de serviço. A restrição g_3 refere-se à verificação quanto ao deslocamento lateral (d_x) limite avaliada nos pontos P1 e P3, conforme Figura 35. A restrição g_4 está relacionada ao deslocamento vertical (d_z) limite avaliada no ponto de cumeeira (P2). Os valores limites para essas restrições ($d_{x_{limte}}$ e $d_{z_{limte}}$) são parâmetros definidos a cada projeto.

$$g_3 = \frac{d_x}{d_{x_{limte}}} - 1,0 \leq 0, \quad (35)$$

$$g_4 = \frac{d_z}{d_{z_{limte}}} - 1,0 \leq 0, \quad (36)$$

A restrição g_5 é introduzida como mecanismo de manter uma adequada execução na conexão coluna-viga, onde a largura da mesa da viga deve ser no máximo a largura da mesa da coluna. Essa restrição é avaliada apenas uma única vez, pois depende apenas dos valores das variáveis de projeto. A restrição g_6 é a verificação ao limite de esbeltez da alma dos perfis para que o dimensionamento dos elementos ao ELU esteja no domínio de perfis de alma não esbelta, de acordo com o anexo G da NBR 8800 (ABNT, 2008).

$$g_5 = \frac{b_{fv}}{b_{fc}} - 1,0 \leq 0, \quad (37)$$

$$g_6 = \frac{(d - 2t_f)}{t_w} - \left(5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) - 1,0 \leq 0, \quad (38)$$

O presente trabalho adotou a aplicação de valores de penalidade quando as restrições não são atendidas. Assim, ao invés do algoritmo receber apenas o valor da função objetivo, Equação (31), ele recebe a função penalidade $F_p(x)$. Essa função é igual ao valor da função objetivo mais o somatório da penalidade aplicada para cada restrição de projeto. Onde W_{max} representa a massa do pórtico (kg) máxima possível de ser obtida considerando os valores máximos das variáveis de projeto no cálculo da área da seção transversal (A_{max}). O índice r representa o número total de restrições de projeto g_i , neste caso 6. Os subíndices c e v das equações referem-se aos elementos de coluna e viga, respectivamente.

$$F_p(x) = f(x) + \sum_{i=1}^r (G_i * W_{max}), \quad (39)$$

$$W_{max} = 2\rho(L_v A_{v_{max}} + L_c A_{c_{max}}), \quad (40)$$

O termo G_i refere-se aos valores máximos obtidos entre os resultados das restrições g_i e 0, avaliados de acordo com as Equações (41), (42) e (43). Dessa forma, quando uma restrição é atendida, o valor de G_i é igual a 0, não resultando em um valor de penalidade. O índice n^{ELU} representa o número total de combinações normais do ELU de projeto. Por último, o índice j representa o número de elementos de vigas e colunas, neste caso são 2 vigas e 2 colunas.

$$G_i = \sum_{n=1}^{n_{ELU}} (\max(0, g_i^{v,j}) + \max(0, g_i^{c,j})), \quad i = \{1, 2\}, \quad (41)$$

$$G_i = \max(0, g_i), \quad \text{para } i = \{3, 4, 5\}, \quad (42)$$

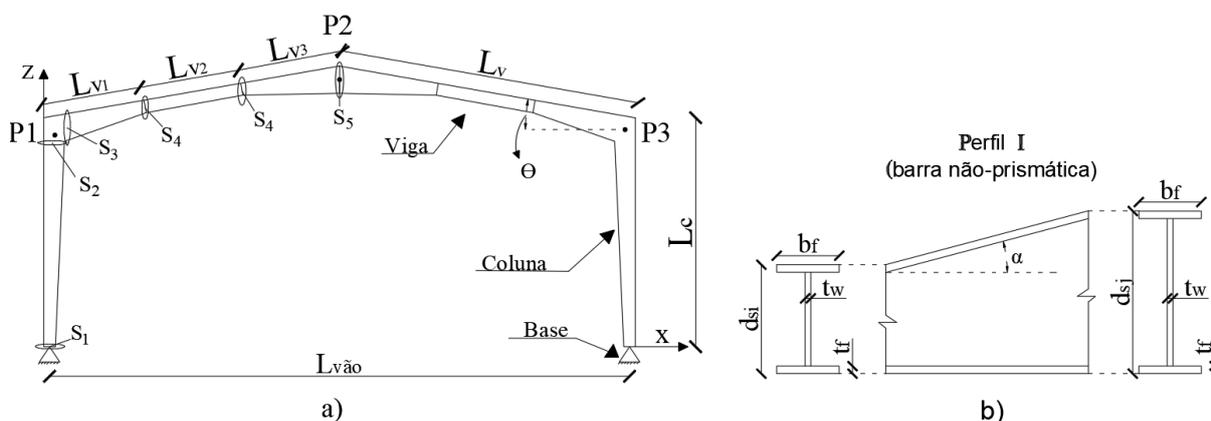
$$G_i = \max(0, g_i^v) + \max(0, g_i^c), \quad \text{para } i = \{6\}, \quad (43)$$

4.1.2 Pórtico com barras não-prismáticas

Os pórticos com barras não-prismáticas apresentam um número maior de seções transversais analisadas, possuindo 2 seções (S_1 e S_2) para as colunas e 3 seções para as vigas (S_3, S_4 e S_5). Por causa disso, as vigas são divididas em 3 trechos definidos pelos pontos das seções, onde

cada ponto de seção representa também um ponto que receberá contenção lateral, formando trechos de comprimentos destravados (L_b). Os 3 elementos de barra da viga (V_{e1}, V_{e2} e V_{e3}) possuem os comprimentos (L_{V1}, L_{V2} e L_{V3}) que serão definidos nos exemplos numéricos. A Figura 36 a) apresenta o modelo de pórtico de barras não-prismáticas, enquanto a Figura 36 b) apresenta o perfil I com altura de alma variada, onde d_{s_i} e d_{s_j} são a altura total do perfil inicial e final do trecho analisado, e α representa o ângulo de variação linear das alturas.

Figura 36 Modelo de pórtico e perfil I não prismático



Fonte: Autor (2022)

As variáveis de projeto seguem a mesma tendência do modelo de pórtico com perfis prismáticos, onde as larguras das mesas (b_f) e espessuras das chapas da alma e das mesas (t_w e t_f) são diferentes para as colunas e vigas. Entretanto, cada seção (S_i) definida na Figura 36 representa uma possibilidade de altura do perfil (d_s). Dessa forma, totalizam-se 11 variáveis de projeto, que podem ser definidas como: $X = \{d_{s_1}, d_{s_2}, d_{s_3}, d_{s_4}, d_{s_5}, b_{f_c}, t_{f_c}, t_{w_c}, b_{f_v}, t_{f_v}, t_{w_v}\}$. A Tabela 4 define as variáveis de projeto de forma genérica para cada seção analisada.

Tabela 4 Definição das variáveis de projeto

Variáveis	Nome	Tipo	Intervalo de valores permitidos (cm)
d_{s_i}	Altura da seção	Contínua	[15; 100]
b_f	Largura da mesa	Contínua	[10; 70]
t_w	Espessura da alma	Discreta	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6; 1,9; 2,24; 2,5}
t_f	Espessura da mesa	Discreta	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6; 1,9; 2,24; 2,5}

Fonte: Autor (2022)

A função objetivo é dada pela massa total do pórtico, que deve ser minimizada, e pode ser definida de acordo com a Equação (44).

$$f(x) = 2\rho \left(L_c \frac{A_{s_1} + A_{s_2}}{2} + L_{V_1} \frac{A_{s_3} + A_{s_4}}{2} + L_{V_2} A_{s_4} + L_{V_3} \frac{A_{s_4} + A_{s_5}}{2} \right) \quad (44)$$

Aqui os requisitos de projeto estão em acordo com as recomendações da *Design Guide 25* (AISC, 2011). As restrições g_1 a g_5 são iguais as apresentadas para barras prismáticas. Onde g_1 e g_2 são referentes aos requisitos de segurança do ELU, g_3 e g_4 aos requisitos de funcionalidade do ELS, e g_5 ao requisito geométrico das conexões coluna-viga.

$$g_1 = \frac{V_{sd}}{V_{Rd}} - 1,0 \leq 0, \quad (45)$$

$$g_2 = 0,50 \left(\frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} \right) + \left(\frac{M_{sd_x}}{M_{Rd_x}} \right) - 1 \leq 0, \text{ para } \frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} \leq 0,20, \quad (46)$$

$$g_2 = \frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{sd_x}}{M_{Rd_x}} \right) - 1 \leq 0, \text{ para } \frac{N_{c_{sd}}}{N_{c_{Rd}}} > 0,20,$$

$$g_3 = \frac{\delta_x}{\delta_{x\text{limite}}} - 1,0 \leq 0, \quad (47)$$

$$g_4 = \frac{\delta_z}{\delta_{z\text{limite}}} - 1,0 \leq 0, \quad (48)$$

$$g_5 = \frac{b_{fv}}{b_{fc}} - 1,0 \leq 0 \quad (49)$$

As novas restrições de projeto introduzidas para os elementos não-prismáticos (g_6 até g_{10}) são requisitos de segurança referentes ao ELU, mas são avaliadas uma única vez para cada elemento, pois só dependem das propriedades geométricas. A restrição g_6 define o ângulo de inclinação máximo permitido formado pela variação linear da altura da alma em um trecho qualquer, identificado como α na Figura 36 b). Onde $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$.

$$g_6 = \frac{\arctg \left(\frac{|d_i - d_j|}{L} \right)}{\alpha_{\text{limite}}} - 1,0 \leq 0 \quad (50)$$

As restrições g_7 e g_8 referem-se aos limites de esbeltez da alma e da mesa dos perfis, onde h_w é a altura da alma da maior seção no elemento avaliado. A restrição g_9 trata-se de uma

relação entre a largura da mesa e altura da alma do perfil, todas essas recomendadas pelo *Design Guide 25* (AISC, 2011).

$$g_7 = \frac{\left(\frac{h_w}{t_w}\right)}{\left(\frac{0,40E}{f_y}\right)} - 1,0 \leq 0, \quad (51)$$

$$g_8 = \frac{\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)}{18} - 1,0 \leq 0, \quad (52)$$

$$g_9 = \frac{h_w}{7b_f} - 1,0 \leq 0 \quad (53)$$

Por último, o limite de esbeltez indicado pela NBR 8800 (ABNT, 2008) para barras comprimidas é aplicado pela restrição g_{10} . Onde, $kL_x, kL_y, e r_x, r_y$ são os comprimentos de flambagem e os raios de giração na direção de maior e menor momento de inércia do perfil, respectivamente, calculada para a seção equivalente do elemento não-prismático.

$$g_{10} = \frac{\max\left(\frac{kL_x}{r_x}, \frac{kL_y}{r_y}\right)}{200} - 1,0 \leq 0, \quad (54)$$

A função de penalidade $F_p(x)$ é definida de acordo com as Equações (39) e (40) já apresentadas para barras prismáticas, mas agora considerando um intervalo de restrições (g_i) de $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ e $10\}$. O termo G_i para o pórtico com barras não-prismáticas é definido de acordo com cada restrição de projeto, conforme apresentado nas Equações (55), (56), (57), (58). Onde o índice L_V representa cada trecho de comprimento destravado conforme apresentado na Figura 36 a), com $k = \{1, 2, 3\}$.

$$G_i = \sum_{n=1}^{n_{ELU}} \left[\max\left(0, g_i^{L_{v_k^j}}\right) + \max\left(0, g_i^{c_j}\right) \right], \quad i = \{1, 2\} \quad (55)$$

$$G_i = \max\left(0, g_i\right), \quad \text{para } i = \{3, 4, 5\} \quad (56)$$

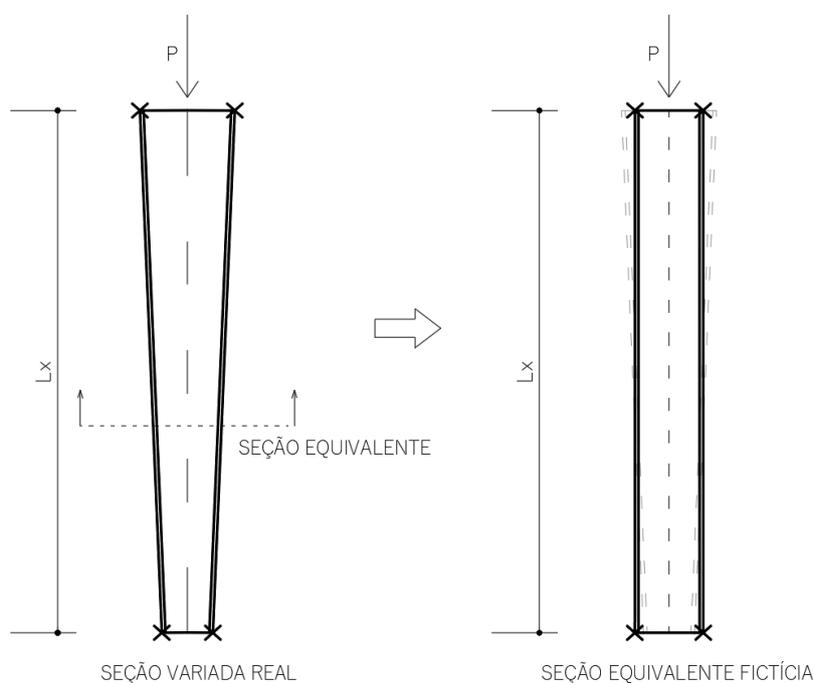
$$G_i = \max\left(0, g_i^c\right) + \max\left(0, g_i^{L_{v_1}}\right) + \max\left(0, g_i^{L_{v_2}}\right) + \max\left(0, g_i^{L_{v_3}}\right), \quad i = \{6, 7, 9, 10\} \quad (57)$$

$$G_8 = \max\left(0, g_8^c\right) + \max\left(0, g_8^v\right) \quad (58)$$

Análise da carga crítica de flambagem elástica (N_{e_x})

Conforme foi descrito no referencial teórico, item 3.3, a análise da carga crítica de flambagem pode ser avaliada para uma barra não-prismática com variação linear considerando uma seção que equivale a um elemento de seção constante para fins de estabilidade da barra na direção de maior momento de inércia. A Figura 37 ilustra essa relação aproximada.

Figura 37 Verificação da estabilidade pela seção equivalente



Fonte: Autor (2022)

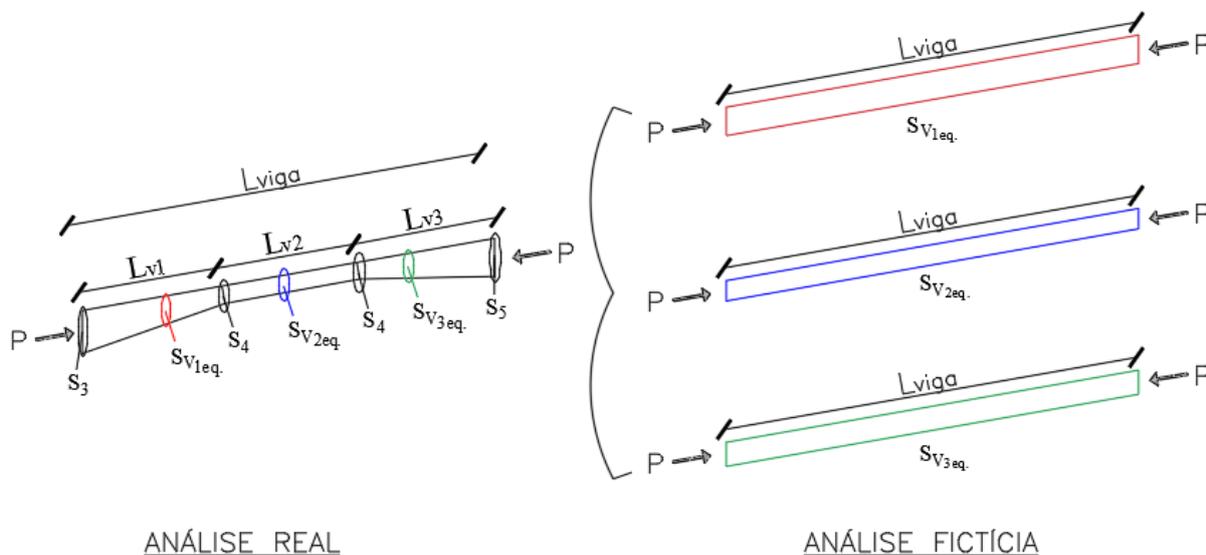
De acordo com o *Design Guide 25* (AISC, 2011), é recomendado que o cálculo da carga crítica de flambagem elástica pela formulação aproximada seja feita apenas no domínio de elementos com seção variando linearmente dentro de um comprimento destravado. Para elementos com variações não lineares ou com duas ou mais variações ao longo de seu comprimento é recomendado que seja utilizado um dos dois métodos computacionais, o método por resolução do problema por autovalores e autovetores para determinação do fator de carga crítica de flambagem por meio de elementos finitos ou o método de sucessivas aproximações apresentado por Timonshenko e Gere (1961) apud *Design Guide 25* (AISC, 2011).

No presente modelo de pórticos com elementos não-prismáticos (Figura 36) foram adotados 3 trechos de barras com variação linear da altura da alma para compor o elemento de viga. A

separação de cada trecho é definida por pontos de contenção lateral no elemento. Assim, o comprimento total do elemento de viga possui 3 variações distintas criadas para cada trecho L_{V_1} , L_{V_2} e L_{V_3} . Nesse sentido, é recomendado que a determinação da carga crítica de flambagem para o comprimento total da viga seja realizado por um método mais preciso, do que o de seção equivalente.

Como o objetivo do trabalho é a otimização de pórticos rígidos de aço, foi proposta a adoção do cálculo da carga crítica de flambagem pela seção transversal mais crítica entre as seções equivalentes determinadas para cada trecho L_{V_1} , L_{V_2} e L_{V_3} . A Figura 38 ilustra esse procedimento, enquanto a Equação (59) apresenta a formulação considerada de acordo com as Equações (8) e (9) definidas no presente trabalho.

Figura 38 Análise N_{ex} adotada no presente trabalho



Fonte: Autor (2022)

$$N_{ex} = \text{menor} \left\{ \frac{\pi^2 EI'_{S_{v1eq}}}{KL_V^2}; \frac{\pi^2 EI'_{S_{v2eq}}}{KL_V^2}; \frac{\pi^2 EI'_{S_{v3eq}}}{KL_V^2} \right\} \quad (59)$$

De acordo com o *Design Guide 25* (AISC, 2011) essa abordagem da consideração da menor seção para a avaliação da carga crítica de flambagem elástica era considerada na antiga *AISC Specification for Structural Steel Buildings* de 1989. A verificação das colunas do pórtico seguem o procedimento padrão do cálculo de seção equivalente com boa precisão de resultados, visto que se trata de um único elemento com variação linear da altura da alma. Como os resultados obtidos para os pórticos com elementos prismáticos constataram que os

esforços de compressão são muito menores que as resistências dos perfis, esse procedimento de análise aproximada para as vigas não produz perdas significativas nos resultados da combinação dos esforços de compressão e flexão, e está a favor da segurança.

A verificação dos elementos não-prismáticos foi realizada com auxílio do código desenvolvido por Silva (2021) em linguagem Python 3, o qual foi integrado ao programa desenvolvido no presente trabalho. Alguns exemplos disponíveis no *Design Guide 25* (AISC, 2011) foram reproduzidos como forma de validar os resultados obtidos pelo programa e estão apresentados no Apêndice A.

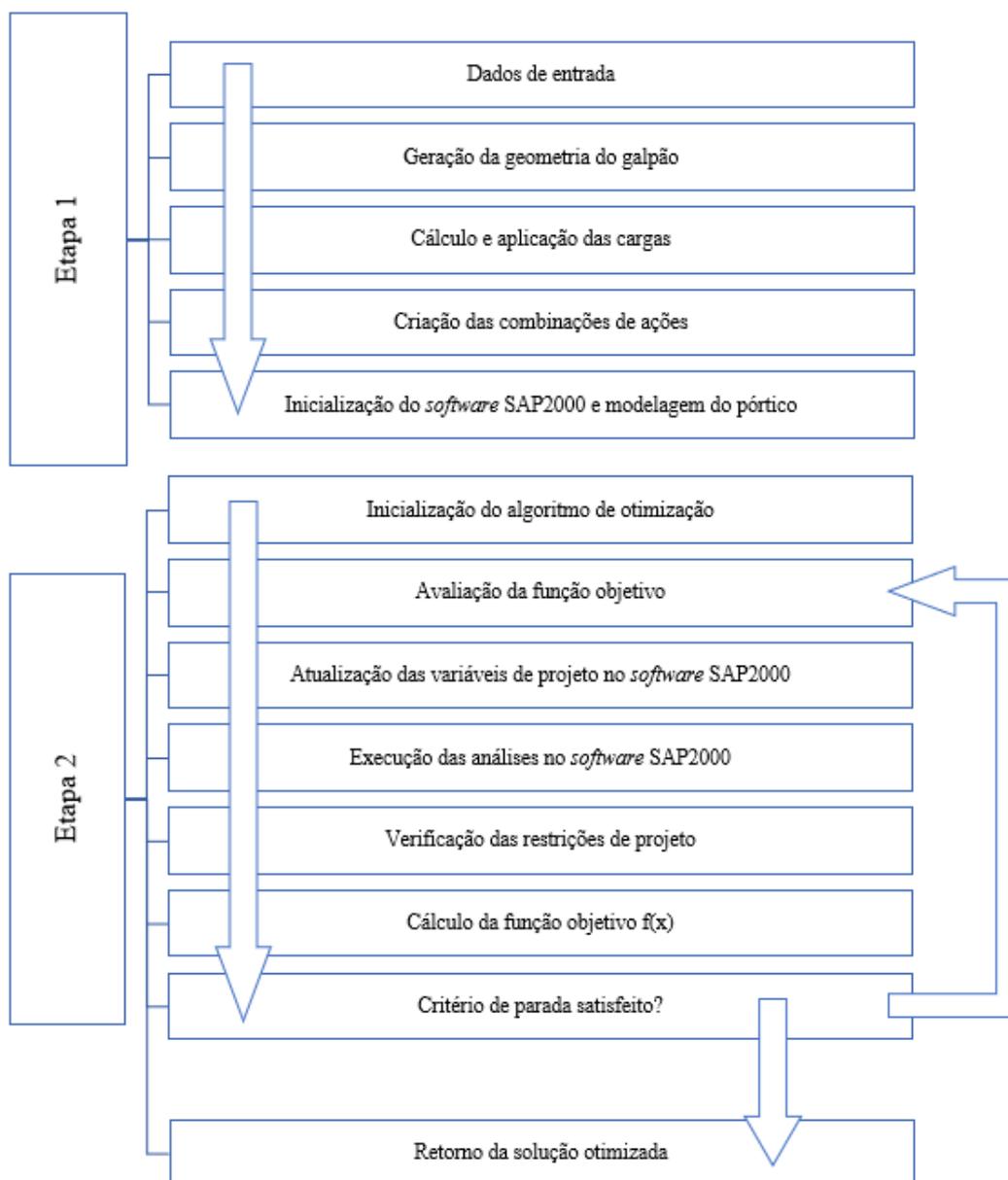
4.2 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DOS PÓRTICOS DE AÇO

O processo de otimização da estrutura (Figura 39) pode ser dividido em duas grandes etapas. A primeira inicia com os dados de entrada fornecidos pelo usuário, gerando as dimensões do galpão industrial, o cálculo e aplicação das cargas, criação das combinações de ações e encerrando com a modelagem da estrutura de pórtico no *software* SAP2000. Na segunda etapa, o algoritmo de otimização é chamado iniciando o processo de avaliação da função objetivo $f(x)$ para cada iteração. Durante a avaliação de $f(x)$ ocorre a atualização das variáveis de projeto no *software* SAP2000 que executa as análises da estrutura e envia para o programa os valores dos esforços internos de cada viga e coluna, e os deslocamentos dos nós da estrutura (P1, P2 e P3). A partir desses valores é possível verificar para cada seção transversal (S_i) as restrições de projeto, calculando conforme o caso os valores das penalidades para a determinação da função objetivo. O ciclo do número de iterações dos algoritmos de otimização inicia na avaliação de $f(x)$ e se encerra quando o critério de parada do algoritmo for satisfeito, retornando à solução otimizada. No presente trabalho, o critério de parada foi definido como o número de iterações adotado nos parâmetros do algoritmo.

Na etapa 2 (Figura 37) as variáveis de projeto são definidas como discretas ou contínuas. A primeira é caracterizada como *Link-Discrete Variable* (LinkDV), em que recebe uma lista de valores definidos pelo usuário, por exemplo: $x_1 = \{0,3; 5; 10; 20,32; 50\}$. Assim, o algoritmo só pode escolher valores existentes nessa lista durante o processo de otimização. Porém, o algoritmo heurístico não utiliza esses valores ao longo de sua formulação, ao invés disso, utiliza a respectiva posição de cada valor dentro da lista, por exemplo: o valor 0 da lista de x_1 é representado pela posição 0, o valor 5 pela posição 1, o valor 10 pela posição 2 etc. Dessa forma, é possível programar a variável para que assumam apenas valores inteiros entre o

intervalo de 0 até o número total de valores dentro da lista (n_{x_1}). Salienta-se que é necessário que a lista esteja em ordem crescente. Ao final do processo heurístico do algoritmo esse valor de posição é convertido para o respectivo valor da lista. A segunda, chamada de variável contínua, deve receber seus valores de contorno, definidos pelo valor mínimo e máximo. Por exemplo: $x_2 = \{-10, 10\}$. Nesse caso, o algoritmo entende que pode gerar qualquer valor dentro desse intervalo, incluindo números decimais, por exemplo: $x_2 = 5,23512$. Ao final do processo, o algoritmo retorna o próprio valor, não necessitando de nenhuma conversão.

Figura 39 Fluxograma do processo de otimização



Fonte: Autor (2022)

4.3 ALGORÍTMOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS AO PROJETO DE PÓRTICOS

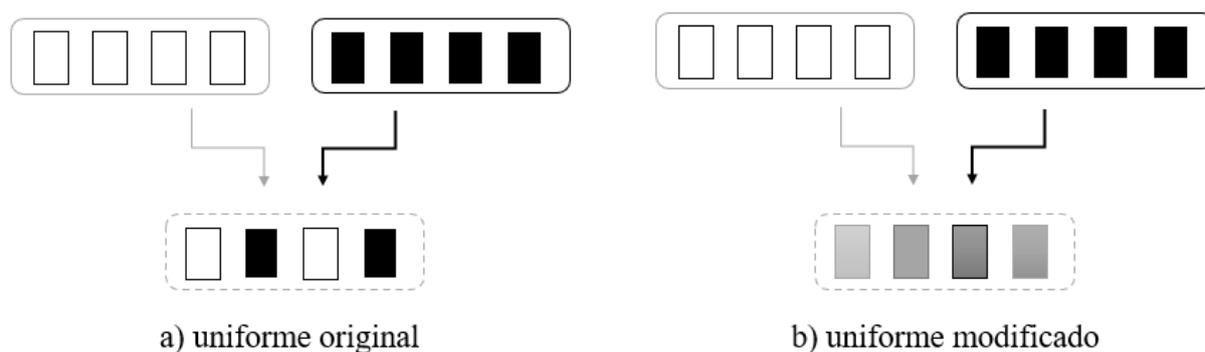
Essa seção apresenta os algoritmos metaheurísticos considerados para os estudos sobre o dimensionamento estrutural otimizado apresentados nesse trabalho. Observa-se que esses algoritmos não foram implementados no presente trabalho e são de autoria de terceiros. Os pseudocódigos aqui apresentados ilustram o funcionamento dos códigos escritos.

4.3.1 Algoritmo GA

O algoritmo GA utilizado no presente trabalho foi implementado por Solgi (2020). Esse algoritmo está baseado no modelo tradicional que utiliza os três operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação. Além disso, dispõe como opção a inclusão de indivíduos de elite. Como peculiaridade do algoritmo implementado por Solgi (2020), a produção de novos indivíduos a cada iteração é igual a porção de pais definida pelo usuário. Por exemplo, para uma população de pais igual a 16 indivíduos e uma porção de pais igual a 50%, o algoritmo irá gerar 8 novos indivíduos a cada iteração.

Essa implementação tem como opção de cruzamento os três tipos tradicionais, cruzamento por um ponto, dois pontos e uniforme. No presente trabalho foi escolhido trabalhar com o cruzamento uniforme. Porém, com o objetivo de melhorar a diversificação de novos indivíduos, a formulação do cruzamento uniforme foi modificada. De acordo com a implementação original, um novo indivíduo sempre possuirá genes iguais a um dos pais, conforme Figura 40 a). A modificação no código realizada permite uma mistura entre genes dos pais para a formação de um novo indivíduo, conforme Figura 40 b).

Figura 40 Cruzamento uniforme do algoritmo GA



Fonte: Autor (2022)

Um pseudocódigo do algoritmo implementado por Solgi (2020) é apresentado na Figura 41, onde N_I representa o número total de indivíduos de uma população, n_x o número total de variáveis de projeto, $u()$ é uma função que retorna um valor aleatório com mesma probabilidade de ocorrência para todos os sorteados, D_i é o intervalo de valores viáveis para cada variável de projeto (x_i). Os indivíduos de elite (I_{elite}) são àqueles que possuem os menores valores de $f(x)$, e estes são selecionados para o cruzamento. O número de “pais” (N_{pais}) restante é selecionado pelo método da roleta, onde todos os demais indivíduos da população possuem uma probabilidade (I_{prob}^j) de serem escolhidos, com uma maior chance para àqueles com uma melhor solução (menor valor de $f(x)$), conforme Equação (60).

$$I_{prob}^j \leftarrow 1 - \left(\frac{f(I^j)}{\sum_{j=1}^{N_I} f(I^j)} \right) \quad (60)$$

Existe uma probabilidade igual a C_{prob} para que ocorra o cruzamento entre dois indivíduos (P_a, P_b) da população de “pais” $\{P^1, P^2, \dots, P^{N_{pais}}\}$, com a mesma probabilidade de escolha entre todos. Dois novos indivíduos são formados (F_1 e F_2) para cada cruzamento uniforme que ocorra, onde todos os valores das variáveis de projeto poderão ser diferentes dos valores de cada “pai”, conforme esquema apresentado na Figura 40 b).

Cada indivíduo “filho” formado possui uma probabilidade de ocorrência do operador de mutação (M_{prob}). Observa-se que o algoritmo implementado por Solgi (2020) aplica uma mutação para F_1 e outra mutação para F_2 , conforme apresentado no pseudocódigo da Figura 41. A primeira mutação altera o valor de uma variável de projeto (x_i) para um valor qualquer pertencente ao seu intervalo (D_i), possibilitando a criação de um novo indivíduo com características diferentes da população atual. A segunda mutação altera essa variável para um valor aleatório dentro do intervalo formado pelos valores dos indivíduos “pais”, possibilitando a adoção de valores intermediários entre aqueles já existentes na população. Após a formação dos novos indivíduos, é calculado o valor de $f(x)$ para a organização em ordem crescente. Em que o indivíduo número 1 é o que possui o menor valor de $f(x)$. No final da iteração, são descartados os indivíduos menos aptos da população de modo a manter sempre a quantidade da população inicial.

Figura 41 Pseudocódigo: GA

Inicialização do algoritmo GA

$N_{pais} = \text{int}(t_{x_{pais}} * T_{pop})$; adota o resultado como valor inteiro

$N_{elite} = \text{int}(t_{x_{elite}} * T_{pop})$; adota o resultado como valor inteiro

Para cada j em N_I / Criação de N_I indivíduos para formação da população

Para cada variável i em n_x

$$x_i^j \leftarrow u(D_i)$$

Cálculo do valor de $f(x)$ de cada indivíduo $f(I^j)$ e **Ordenamento** dos indivíduos em ordem crescente

$$g_{ótimo} \leftarrow I^1$$

Enquanto o critério de parada não for satisfeito

Para cada e em N_{elite}

$$I_{elite}^e \leftarrow I^e$$

$$P^e \leftarrow I_{elite}^e$$

Seleção dos Pais

Para cada p em (N_{elite}, N_{pais})

$$P^p \leftarrow \text{Roleta}(\{I^j, I^{j+1}, I^{j+2}, \dots, I^{T_{pop}}\}); J = N_{elite} + 1 \leq T_{pop}$$

Se $C_{prob} \geq u([0,1])$

Para cada j em $\left(\frac{T_{pop} - N_{pais}}{2}\right)$

$$P_a, P_b \leftarrow u(\{P^1, P^2, \dots, P^{N_{pais}}\}), u(\{P^1, P^2, \dots, P^{N_{pais}}\})$$

 / cruzamento entre os dois “pais” de forma uniforme:

Para cada variável i em n_x

$$r_1 = u([0, 1])$$

$$x_i^{F1} \leftarrow x_i^{Pa} * r_1 + x_i^{Pb} * (1 - r_1)$$

$$x_i^{F2} \leftarrow x_i^{Pb} * r_1 + x_i^{Pa} * (1 - r_1)$$

Se a $M_{prob} \geq u([0, 1])$

$$x_i^{F1}, x_i^{F2} \leftarrow u(D_i), u([x_i^{Pa}, x_i^{Pb}])$$

Cálculo da aptidão e ordenamento de cada indivíduo ($f(I^j)$)

Se $N_I > T_{pop}$

 / Descarta os piores indivíduos para que $N_I = T_{pop}$

$$g_{ótimo} \leftarrow I^1$$

Critério de parada satisfeito

Retorna $g_{ótimo}$

Fonte: Autor (2022)

4.3.2 Algoritmos de otimização: PSO e HS

Os algoritmos metaheurísticos PSO e HS utilizados no presente trabalho foram implementados em um projeto interno com colaboração entre alunos e o professor orientador Felipe Schaedler de Almeida da faculdade de engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Dessa forma, esta é a primeira publicação de trabalho com o uso desses algoritmos implementados. A escolha desses algoritmos metaheurísticos se tornou conveniente, uma vez que de acordo com as referências bibliográficas são algoritmos clássicos com bom desempenho à solução de problemas de engenharia e possibilitou a consideração de um trabalho já desenvolvido.

O algoritmo PSO foi implementado com base nas referências Engelbrecht (2007) e Yang (2010). Ele dispõe da configuração de partículas formadas pelos vetores de posição (x_i) e velocidade (v_i), que são multiplicados pelos valores aleatórios (r_1) e (r_2). Entre os parâmetros possíveis de serem utilizados no algoritmo estão: o componente cognitivo (c_1), o componente social (c_2) e o momento de partícula (w). Todos esses parâmetros podem ser utilizados de forma estática ou dinâmica. Como parâmetro alternativo a ser utilizado, o algoritmo permite a consideração do coeficiente de constrição (χ) que permite balancear a exploração global e local do algoritmo. O algoritmo PSO implementado utiliza o sistema descrito por Engelbrecht (2007) como g_{best} PSO, onde a melhor solução encontrada em cada iteração é representativa de todo o enxame de partículas.

Um pseudocódigo é apresentado na Figura 42 e descreve as principais etapas do processo iterativo do algoritmo PSO implementado. Onde, um número total de partículas (n_p) se movem em um espaço de busca viável de projeto determinado pelos valores limitados (D_i) de cada variável de projeto (x_i) para encontrar a melhor solução possível. Cada partícula (j) é influenciada por sua melhor posição já assumida (\bar{p}^j) e pela melhor posição encontrada por todo o enxame de partículas ($g_{ótimo}$). Entende-se que o passo de tempo ($t+1$) pode representar em um algoritmo o número de iterações. No pseudocódigo é apresentado a função $u()$ que retorna um número aleatório considerando a mesma probabilidade de escolha entre todas as possibilidades. Os valores representados por x_i^j indicam o valor da variável (i) para a

partícula (j), sendo \bar{x}_i^j e \hat{x}_i os valores dessa variável para a melhor posição encontrada pela partícula (j) e por todo o enxame, respectivamente.

Figura 42 Pseudocódigo: PSO implementado

```

Inicialização do algoritmo
 $\phi \leftarrow \text{maior} (\{c_1 + c_2, 4\})$ 
 $\chi = \frac{2}{|2 - \phi - \sqrt{\phi(\phi - 4)}|}$ 
Para cada j em  $n_p$  partículas:
  Para cada i em  $n_x$  variáveis:
     $x_i^j \leftarrow u(D_i)$ 
     $p^j \leftarrow p^j + x_i^j$ 
  Cálculo de f(x) para a partícula  $p^j$ 
   $\bar{p}^j, v^j \leftarrow p^j, 0$ 
   $\bar{p}^j = \{\bar{x}_1^j, \bar{x}_2^j, \dots, \bar{x}_{n_x}^j\}$ 
 $g_{\text{ótimo}} \leftarrow \text{melhor} (\{\bar{p}^1, \bar{p}^2, \dots, \bar{p}^{n_p}\})$ 
 $g_{\text{ótimo}} = \{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n_x}\}$ 
Enquanto o critério de parada não é satisfeito:
   $t \leftarrow t + 1$  (contador)
  Para cada j em  $n_p$  partículas:
     $r_1, r_2 \leftarrow u([0, 1]), u([0, 1])$ 
    Para cada i em  $n_x$  variáveis:
       $v_i^j \leftarrow \chi[w v_i^j + c_1 r_1 (\bar{x}_i^j - x_i^j) + c_2 r_2 (\hat{x}_i - x_i^j)]$ 
       $x_i^j \leftarrow x_i^j + v_i^j$ 
    Cálculo de f(x) para a partícula  $p^j$ 
     $\bar{p}^j \leftarrow \text{melhor} (\{p^j, \bar{p}^j\})$ 
   $g_{\text{ótimo}} \leftarrow \text{melhor} (\{\bar{p}^1, \bar{p}^2, \dots, \bar{p}^{n_p}\})$ 
Critério de parada satisfeito
Retorna  $g_{\text{ótimo}}$ 

```

Fonte: Autor (2022)

O algoritmo HS foi implementado baseado no algoritmo tradicional desenvolvido por Geem e Kim (2001), que possui os parâmetros de memória harmônica (HM), taxa de consideração da memória harmônica (HMCR) e taxa de ajuste de nota (PAR). Como incremento ao algoritmo tradicional, foi considerado a introdução do parâmetro de largura de banda de nota (b_w) com uma probabilidade de ocorrência igual ao parâmetro PAR. Por último, baseado nos artigos de referência, como Degertekin (2012), o algoritmo HS implementado permite que os valores dos parâmetros variem ao longo das iterações.

O algoritmo implementado HS inicia com a formação da memória harmônica (HM), onde um número total de harmonias (HMS) é gerada de forma aleatória com os valores das variáveis de projeto pertencentes ao intervalo viável de projeto, $x_i \leftarrow u(D_i)$. Após a geração de todos os harmônicos aleatórios, o cálculo do valor da função objetivo é realizado, possibilitando identificar o maior valor (H_{pior}). O ciclo de iterações inicia formando novos harmônicos (H_{novo}), onde os parâmetros HMCR, PAR e b_w são avaliados. Um pseudocódigo é apresentado na Figura 43 ilustrando todo esse processo.

Figura 43 Pseudocódigo: HS implementado

```

Inicialização do algoritmo
Para cada j em HMS:
    Para cada i em  $n_x$ :
         $x_i^j \leftarrow u(D_i)$ 
    Cálculo de f(x) para cada harmonia formada
     $HM \leftarrow HM + x^j$ 
Identificação da pior harmonia formada  $H_{pior} \leftarrow \text{pior}\{HM\}$ 
Enquanto o critério de parada não é satisfeito:
    / Criação de um novo harmônico ( $H_{novo}$ )
    Para cada i em  $n_x$ :
        Se  $HMCR \geq u([0,1])$ 
             $x_i^{novo} \leftarrow u(HM)$ 
            Se  $PAR \geq u([0,1])$ 
                 $x_i^{novo} \leftarrow u(D_i \cap [x_i^{novo} - b_{w_i}, x_i^{novo} + b_{w_i}])$ 
            Se não
                 $x_i^{novo} \leftarrow u(D_i)$ 
     $H_{novo} \leftarrow \{x_1^{novo}, x_2^{novo}, \dots, x_{n_x}^{novo}\}$ 
    Cálculo de f(x) de  $H_{novo}$ 
    Se  $H_{novo} < H_{pior}$ 
         $HM \leftarrow \underline{HM} - H_{pior} + H_{novo}$ 
    Identificação da pior harmonia formada  $H_{pior} \leftarrow \text{pior}\{HM\}$ 
Critério de parada satisfeito
Retorna a melhor solução encontrada  $H_{ótimo} \leftarrow \text{melhor}\{HM\}$ 

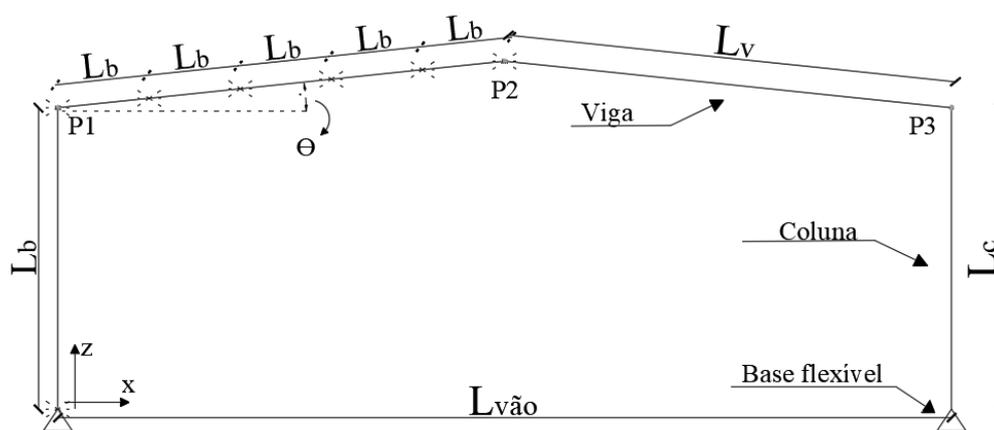
```

Fonte: Autor (2022)

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Os estudos apresentados a seguir têm como modelo de estrutura um pórtico simétrico de vão único, elaborado em perfis de aço fabricados em seção I soldada, comumente utilizados em galpões industriais. A estrutura apresenta ligações rígidas entre seus elementos, coluna-viga e viga-viga, onde existe a continuidade dos esforços de momento fletor. Já a conexão entre as colunas e a base de fundação é flexível. Admite-se a existência de estruturas de contraventamento que atuam como contenções nodais para a estabilidade à flambagem lateral. O modelo considera a divisão das vigas de cobertura em trechos iguais de comprimento destravado (L_b) limitados a 2,54 metros, enquanto as colunas possuem um único trecho destravado que é igual ao seu próprio comprimento ($L_b = L_c$). É importante salientar que as contenções são fornecidas em ambas as mesas do perfil. A Figura 44 ilustra o modelo de pórtico.

Figura 44 - Estrutura modelo de pórtico



Fonte: Autor (2022)

O galpão analisado possui as seguintes características geométricas: altura de beiral (L_c) igual a 6 metros, inclinação do telhado (θ) de 10 graus, comprimento total (L_g) de 54 metros e espaçamento entre pórticos (e_p) de 6 metros, totalizando $n_p = 10$ pórticos. Essas dimensões serão constantes ao longo de todo o trabalho. O vão dos pórticos poderão variar de acordo com cada exemplo numérico.

Os carregamentos utilizados (Tabela 5) nos modelos contemplam aqueles já descritos no presente trabalho: PP do pórtico determinado pelo *software* SAP2000, CP que contempla o peso próprio dos elementos secundários, estruturas complementares e vedações. O CA é

considerado de acordo com os requisitos mínimos da NBR 6120 (2019) para serviços de manutenção e limpeza, tomado para telhados de cobertura inclinada e sem presença de lajes de concreto. O carregamento de vento é calculado para os fatores $S1 = 0,95$ e $S3 = 1,0$.

Tabela 5 Cargas atuantes no galpão

Peso Próprio (PP)	Software SAP2000
Carga Permanente (CP)	0,25 kN/m ²
Carga Acidental (CA)	0,25 kN/m ² - NBR 6120 (ABNT, 2019)
Força Nocional (F_n)	Conforme Equação (27)
Carga de Vento (CV)	NBR 6123 (ABNT, 1988)

Fonte: Autor (2022)

Um total de 13 combinações normais últimas (CN) e 13 combinações frequentes de serviço (CF) são consideradas nas análises, apresentadas nas Tabela 6 Tabela 7, respectivamente. As combinações 1 e A contemplam apenas cargas gravitacionais, e a primeira inclui os efeitos das imperfeições geométricas (F_n) com um coeficiente de majoração igual a 1,40. As demais combinações possuem os carregamentos horizontais e verticais de vento que podem assumir qualquer combinação dos coeficientes de pressão externa (Cp_e) e pressão interna (Cp_i). Os valores de Cp_i foram tomados iguais a 0, +0,20 e -0,30. O primeiro valor representa um caso de instalação de janelas fixas consideradas estanques, enquanto os últimos dois valores representam uma estrutura com paredes permeáveis uniforme, sem predominância de aberturas, conforme os itens 6.2.6 e 6.2.5 da NBR 6123 (ABNT, 1988), respectivamente.

Tabela 6 Combinações normais últimas

Combinações normais últimas	PP	CP	CA	VENTO 90°			VENTO 0°		
				$Cp_i = 0,0$	$Cp_i = +0,20$	$Cp_i = -0,30$	$Cp_i = 0,0$	$Cp_i = +0,20$	$Cp_i = -0,30$
CN - 1	1,25	1,25	1,50						
CN - 2	1,25	1,25	1,50x0,80				1,40		
CN - 3	1,00	1,00					1,40		
CN - 4	1,25	1,25	1,50x0,80	1,40					
CN - 5	1,00	1,00		1,40					
CN - 6	1,25	1,25	1,50x0,80					1,40	
CN - 7	1,00	1,00						1,40	
CN - 8	1,25	1,25	1,50x0,80			1,40			
CN - 9	1,00	1,00				1,40			
CN - 10	1,25	1,25	1,50x0,80		1,40				
CN - 11	1,00	1,00			1,40				
CN - 12	1,25	1,25	1,50x0,80						1,40
CN - 13	1,00	1,00							1,40

Fonte: Autor (2022)

Tabela 7 Combinações frequentes de serviço

Combinações frequentes de serviço	PP	CP	CA	VENTO 90°			VENTO 0°		
				$Cp_i = 0,0$	$Cp_i = +0,20$	$Cp_i = -0,30$	$Cp_i = 0,0$	$Cp_i = +0,20$	$Cp_i = -0,30$
CF – 1	1,00	1,00	0,70						
CF – 2	1,00	1,00	0,60				0,30		
CF – 3	1,00	1,00					0,30		
CF – 4	1,00	1,00	0,60	0,30					
CF – 5	1,00	1,00		0,30					
CF – 6	1,00	1,00	0,60					0,30	
CF – 7	1,00	1,00						0,30	
CF – 8	1,00	1,00	0,60			0,30			
CF – 9	1,00	1,00				0,30			
CF – 10	1,00	1,00	0,60		0,30				
CF – 11	1,00	1,00			0,30				
CF – 12	1,00	1,00	0,60						0,30
CF – 13	1,00	1,00							0,30

Fonte: Autor (2022)

Por último, são definidas para todos os exemplos numéricos deste trabalho as propriedades do aço, que são apresentadas na Tabela 8. Os valores limite de deslocamento lateral e vertical são definidos conforme as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008), e são apresentados nas Equações (61) e (62).

Tabela 8 Propriedades do aço

módulo de elasticidade longitudinal (E)	20.000,00 kN/cm ²
módulo de elasticidade transversal (G)	7.692,30 kN/cm ²
coeficiente de Poisson (ν)	0,30
tensão de escoamento (f_y)	35,00 kN/cm ²
massa específica do aço (ρ)	7.850,00 kg

Fonte: Autor (2022)

$$d_{z\limite} = \frac{L_{v\tilde{a}o}}{250} \quad (61)$$

$$d_{x\limite} = \frac{L_c}{300} \quad (62)$$

As seções seguintes apresentam estudos para determinar a influência de alguns parâmetros na solução ótima para o projeto dos pórticos de aço de galpões industriais, ou para determinar a eficiência dos algoritmos metaheurísticos apresentados anteriormente na solução desses problemas.

Inicialmente, são elaborados estudos sobre a influência das condições de contenção lateral no projeto ótimo de pórticos de aço, e em seguida, uma comparação de desempenho dos algoritmos metaheurísticos é realizada. Um estudo parametrizado dos pórticos estuda a influência de alguns parâmetros e é estendida a análise com elementos não-prismáticos. Por último é avaliada a consideração dos efeitos de segunda ordem no projeto ótimo dos pórticos de aço.

5.1 OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONTENÇÃO LATERAL NAS VIGAS

O pórtico de aço estudado segue o modelo genérico apresentado na Figura 44. Os parâmetros de projeto são definidos como: comprimento total do vão $L_{\text{vão}} = 15$ m; altura da coluna $L_c = 6$ m; ângulo de inclinação das vigas $\theta = 10^\circ$; comprimento destravado das colunas $L_b = 6$ m; velocidade básica do vento $V_0 = 40$ m/s. O comprimento de uma viga (L_V) é determinado pela relação da metade do comprimento do vão do pórtico pelo ângulo de inclinação, sendo $L_V \cong 7,62$ m.

Os pórticos apresentados nessa seção foram otimizados pelo algoritmo GA e os seguintes parâmetros foram definidos: tamanho da população igual a 16; probabilidade de cruzamento igual a 85% do tipo uniforme; probabilidade de mutação igual a 10%; porção de pais igual a 50%; e taxa de elitismo igual a 10%. O número total de iterações será um parâmetro estudado.

Um estudo sobre a influência das condições de contenção lateral no projeto de pórticos de aço foi elaborado a partir de um comparativo entre dois modelos de estrutura. O Modelo 01 admite a existência de contenções laterais suficientes para impedir a ocorrência da flambagem lateral com torção nas vigas (FLT). O Modelo 02 considera a existência de contenções laterais com espaçamento equidistante igual a 2,54 metros. As variáveis de projeto, a função objetivo e as funções de restrição para ambos os modelos seguem o descrito no capítulo de metodologia para pórticos com barras prismáticas.

Esse modelo inicial de pórtico está baseado no exemplo apresentado por Pravia et. al. (2010), que se trata do dimensionamento de um galpão industrial formado por pórticos de vão único com conexões rígidas entre coluna-viga e bases rotuladas. A velocidade básica do vento está baseada na região de São Paulo (Brasil). O pórtico apresentado por Pravia et. al. (2010) se

diferencia por ser formado por perfis laminados do tipo I simétricos, utilizando o aço ASTM A572 G50, enquanto o presente trabalho utiliza perfis soldados.

5.1.1 Modelo 1: Viga totalmente contida lateralmente

O modelo 01 admite que haja contenções laterais suficientes para impedir a ocorrência da flambagem lateral com torção (FLT) nas vigas. Para isso, foi adotado a estratégia de calcular o espaçamento máximo entre contenções possível de existir para que não ocorresse a instabilidade por FLT. O pior caso, é quando o algoritmo adotar os valores mínimos das variáveis de projeto, formando o menor perfil possível. A partir deste perfil mínimo, calculou-se o raio de giração em torno do eixo Y (fora do plano), determinando o comprimento máximo entre contenções.

Os estudos realizados no presente modelo de pórtico, foram divididas em 3 testes, A, B e C, desempenhados pelo algoritmo GA. O teste A é o dito teste de referência que contou com um limite de 80 iterações, que proporciona um tempo médio de otimização de 40 minutos. Com o objetivo de verificar se as 80 iterações não estariam limitando o algoritmo, novos testes foram realizados com os mesmos parâmetros de referência, mas aumentando o limite de iterações para 160, nomeado teste B. Por último, o teste C que é similar ao teste A com a diferença de reduzir os limites superiores das variáveis de projeto, aplicando recomendações práticas de engenharia. Destaque-se a constatação de que o tempo de processamento das análises no software SAP2000 representou 99,7% do tempo total do processo de otimização dos pórticos.

De acordo com Bellei (1998), é recomendado como medidas de pré-dimensionamento para galpões, colunas que não recebam vigas rolantes uma altura de perfil d com valores entre $L_c/30$ e $L_c/20$, onde L_c é altura de beiral. E para as vigas, uma altura de perfil d com valores entre $L_{vão}/70$ e $L_{vão}/50$, onde $L_{vão}$ é igual ao vão do pórtico. Com base em experiências anteriores, é sabido que perfis mais esbeltos proporcionam maiores economias de material, e que a espessura da alma t_w costuma ser menor que a espessura da mesa t_f , assim, as maiores medidas de espessura de chapa comercial foram removidas da lista de possíveis valores das respectivas variáveis de projeto. Por último, a largura da mesa b_f teve seu limite superior limitado igual a altura total do perfil. Com o cuidado de não limitar demasiadamente os valores das variáveis de projeto, estendeu-se os limites inferiores e superiores dos intervalos

recomendados por Bellei (1998). A Tabela 9 apresenta os valores limites de cada variável de projeto para cada teste analisado.

Tabela 9. Limites das variáveis de projeto

Variáveis de Projeto	Teste A e B – Limites (cm)	Teste C - Limites (cm)	Tipo
d	[15; 100]	[15; 40]	Contínua
t_w	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6; 1,9; 2,24; 2,5}	{0,475; 0,63; 0,8}	Discreta
t_f	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6; 1,9; 2,24; 2,5}	{0,475; 0,63; 0,8; 0,95; 1,25; 1,6}	Discreta
b_f	[10; 70]	[10; 40]	Contínua

Fonte: Autor (2022)

Em cada teste foram realizadas 10 otimizações independentes. Em cada uma das otimizações foram coletadas informações, incluindo os valores das variáveis de projeto, da função objetivo, a combinação de carregamento crítica de projeto, valor das funções de restrição e tempo de processamento. Desta forma, uma base de dados foi elaborada, possibilitando uma adequada análise das soluções otimizadas. É importante notar que em todas as otimizações o GA foi capaz de encontrar uma solução viável (que respeita todas as restrições).

Em todos os testes analisados a restrição crítica de segurança dos elementos foi a de flexocompressão, considerada através da função g_2 . Em análise as configurações otimizadas, se observou que o momento fletor foi o esforço preponderante na verificação de segurança à flexocompressão, atingindo intensidades que correspondem a aproximadamente 90% da capacidade resistente do perfil.

A melhor solução obtida foi encontrada pelo teste B com uma função objetivo igual a 729,65 kg. Essa solução de projeto é apresentada na Tabela 10, enquanto informações sobre os critérios de verificação de projeto último e de serviço são apresentados na Tabela 11. A coluna de “Limitação” indica qual verificação à flexão simples (FLA, FLM e FLT) limitou o momento resistente (M_{Rd}) do elemento de viga e coluna. Quando indicado M_{pl} , entende-se que o elemento conseguiu atingir o momento de plastificação. Os subíndices c e v referem-se a coluna e viga, respectivamente.

Tabela 10 Melhor solução do modelo 01: variáveis de projeto

d_c (cm)	t_{w_c} (cm)	t_{f_c} (cm)	b_{f_c} (cm)	d_v (cm)	t_{w_v} (cm)	t_{f_v} (cm)	b_{f_v} (cm)	$f(x)$
50,33	0,475	0,475	20,58	29,64	0,475	0,63	10,84	729,65

Fonte: Autor (2022)

Tabela 11. Melhor solução do modelo 01: restrições de projeto

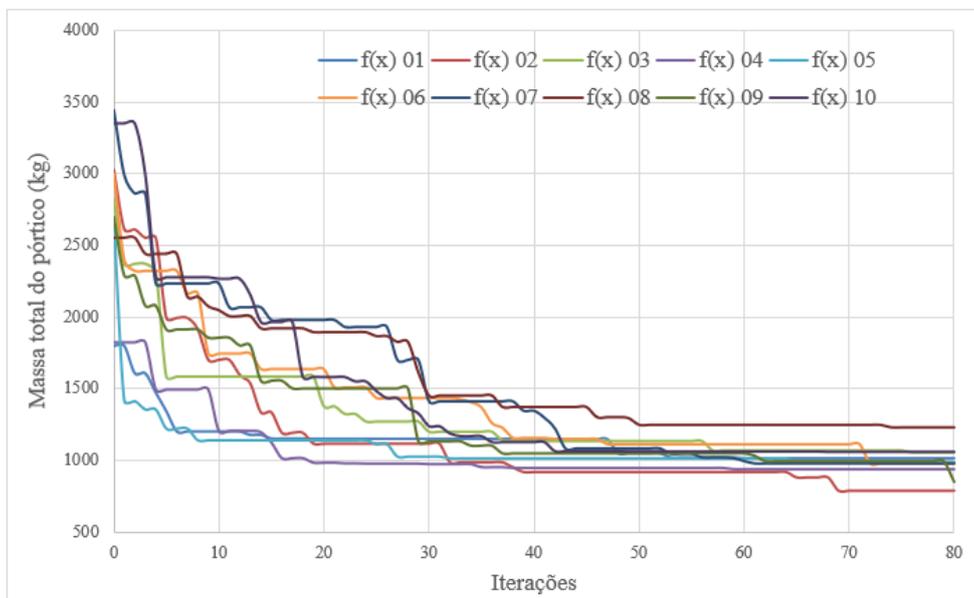
Elemento	Combinação	Limitação	Critério	Combinação	Critério
Viga	CN – 11	Mpl	$1 + g_2 = 0,98$	CF – 1	$1 + g_4 = 0,82$
Coluna	CN – 11	FLM	$1 + g_2 = 1,00$	CF – 8	$1 + g_3 = 0,99$

Fonte: Autor (2022)

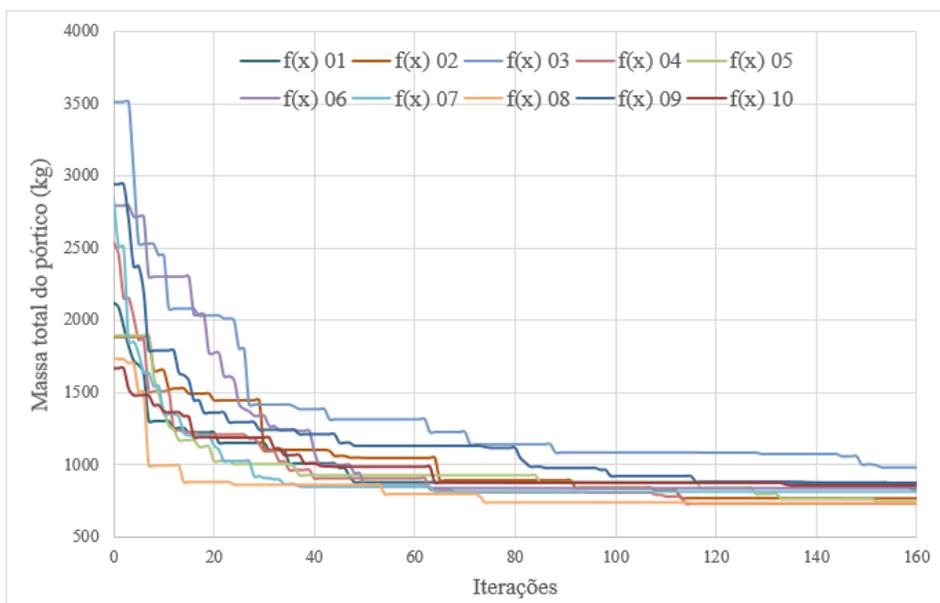
Os resultados mostram que o dimensionamento da estrutura é dominado pelas restrições quanto ao deslocamento horizontal do pórtico (considerado na restrição g_3), cuja combinação crítica ocorre sob a combinação frequente de serviço CF-8 (ver Tabela 7). Além disso, as restrições de segurança associadas à combinação de força normal e momento fletor (restrição g_2) também se encontram próximas a ativação na solução ótima, com condição crítica obtida na combinação última CN-11 (ver Tabela 6).

A partir dos dados coletados para cada teste foi possível verificar qual estado limite obteve um maior número de restrições ativas de projeto. Constatou-se que entre todas as soluções obtidas, em 57% predominou o ELS. Com uma investigação sobre as combinações de ações que geraram restrições ativas, observou-se que em todas elas existia o carregamento de vento. Isso pode ser observado pelos resultados apresentados à melhor solução (Tabela 11) em que as restrições ativas foram obtidas a partir das combinações CN-11 e CF-8.

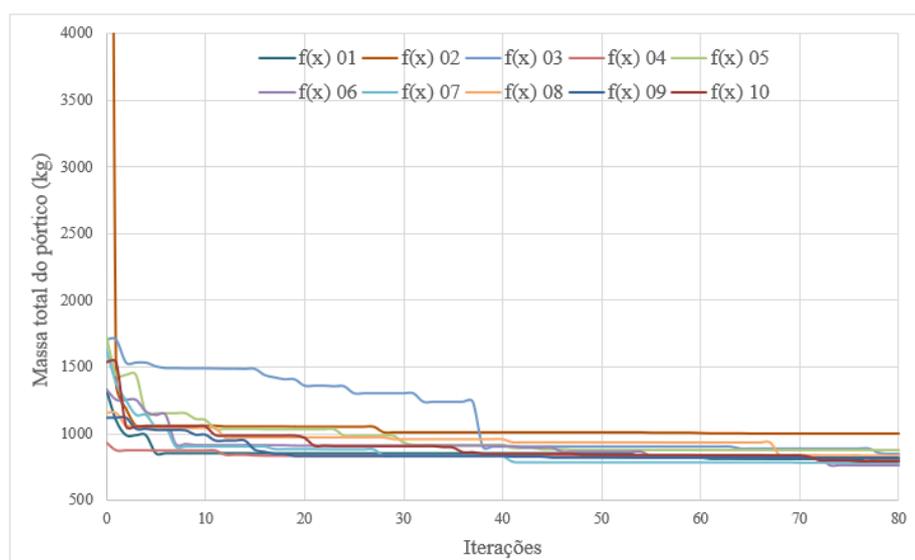
Os gráficos das Figura 45, Figura 46 e Figura 47 apresentam a convergência da função objetivo ao longo das iterações para as 10 otimizações independentes de cada teste realizado. É possível observar que, conforme o esperado, existe melhoria nos resultados ao dobrar o número de iterações de 80 para 160. Não apenas é possível obter uma menor massa de pórtico, mas também uma redução na variabilidade das soluções. Além disso, como a redução dos limites dos valores das variáveis de projeto causa a diminuição do número total de combinações possíveis, o teste C consegue obter resultados similares ao teste B.

Figura 45 - Convergência de $f(x)$ - Teste A

Fonte: Autor (2022)

Figura 46 - Convergência de $f(x)$ - Teste B

Fonte: Autor (2022)

Figura 47 - Convergência de $f(x)$ - Teste C

Fonte: Autor (2022)

Com o objetivo de comparar os testes realizados são apresentadas as Tabela 12 que contém parâmetros estatísticos sobre a função objetivo, e a Tabela 13 que contém os intervalos de confiança para os quais exista uma probabilidade de 95% em uma otimização independente a solução encontrada pertencer a esse intervalo. Além disso, é possível comparar a solução encontrada no exemplo apresentado por Pravia et. al. (2010), que utiliza o mesmo perfil de aço para viga e coluna, com uma massa de perfil igual a 38,7 kg/m, o que resulta em aproximadamente uma massa total de pórtico de 1048 kg.

Tabela 12. Dados gerais dos testes A, B e C

Parâmetros estatísticos de $f(x)$	Teste A	Teste B	Teste C
Pior solução	1231,14 kg	984,87 kg	1000,33 kg
Melhor solução	788,33 kg	729,65 kg	768,64 kg
Solução média	988,05 kg	819,83 kg	833,59 kg
Desvio Padrão	120,41 kg	78,61 kg	67,25 kg
Coeficiente de Variação	12,20 %	9,60 %	8,10 %

Fonte: Autor (2022)

Tabela 13. Intervalo de confiança dos testes A, B e C

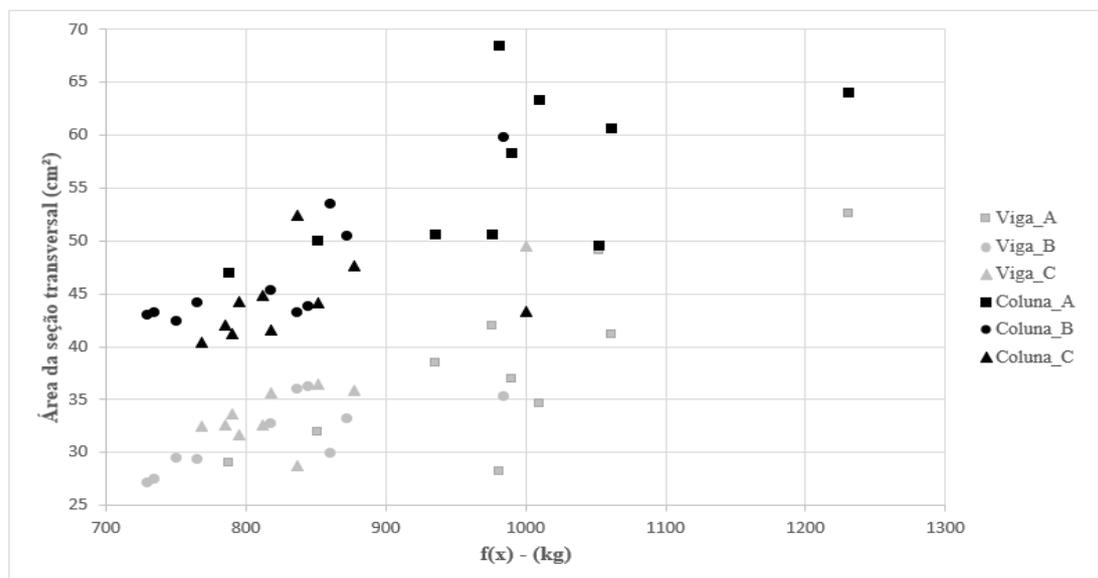
Testes	Intervalo de confiança de 95%	
A	901,93	1074,18
B	763,60	876,07
C	785,49	881,70

Fonte: Autor (2022)

De acordo com os resultados, o teste A tem uma tendência em achar resultados similares ou piores do que soluções não otimizadas. Logo, o teste A não é adequado, e para o algoritmo GA resolver esse problema de otimização é necessário mais tempo de processamento ou um espaço de busca reduzido. O teste C apresenta bons resultados e possui um tempo de processamento computacional reduzido quando comparado ao teste B. No entanto, de acordo com a solução apresentada na Tabela 10, não é possível o teste C encontrar a melhor solução de projeto do teste B, devido a sua limitação dos valores das variáveis de projeto. Por fim, o teste B é aquele que se destaca como a melhor opção para o dimensionamento ótimo de pórticos de aço por ter obtido a melhor solução de projeto, um intervalo de confiança de menor variabilidade e por não depender de critérios de pré-dimensionamento baseados em experiências anteriores.

As análises estruturais realizadas no *software* SAP2000 representam 99,7% de todo o tempo de otimização. Como última avaliação, o presente trabalho comparou os tamanhos das áreas de seção transversal entre vigas e colunas. O gráfico apresentado na Figura 48 mostra a área da seção transversal da viga e da coluna referente à solução ótima obtida em cada execução do algoritmo de otimização em relação aos valores da função objetivo. Os índices A, B e C correspondem aos casos testes.

Figura 48 - Viga e Coluna: área da seção transversal (cm²)



Fonte: Autor (2022)

É possível notar que as colunas possuem predominantemente uma área de seção transversal maior. Isso pode ser explicado por dois fatores principais. O primeiro é que as colunas

possuem um comprimento menor que as vigas, o que torna mais atrativo, em termos de redução da massa total do pórtico, os algoritmos reduzirem a área da seção transversal das vigas (reduzindo sua rigidez) e aumentarem a área das colunas (aumentando a rigidez). Em segundo, os elementos de coluna não possuem contenções laterais ao longo do comprimento, necessitando de uma maior inércia fora do plano. Essa maior inércia pode ser obtida ao aumentar a largura das mesas dos perfis I, o que aumenta a área da seção transversal.

5.1.2 Modelo 2: Viga sujeita à flambagem lateral com torção (FLT)

O modelo 2 se distingue do modelo 1 apenas pela condição de suporte lateral nas vigas, que passa a ser tomado de forma localizada em pontos com espaçamentos equidistantes de 2,54 m. Como efeito, a instabilidade da viga por FLT passa a ser um aspecto importante no dimensionamento da estrutura. Nesse exemplo aplicado, manteve-se a otimização assistida pelo algoritmo GA.

Como a configuração de parâmetros utilizada no teste A se mostrou inadequada para o problema tratado nesta seção, os estudos sobre o modelo 2 se limitaram as configurações definidas nos testes B e C descritos anteriormente. Em cada teste foram realizadas 10 otimizações independentes para a avaliação de dados estatísticos sobre o desempenho do algoritmo.

Muitas informações obtidas no modelo 1 foram iguais ou similares ao modelo 2, a média de tempo de processamento do teste B e C foram de 80 e 40 minutos, respectivamente. A combinação normal de carregamento do ELU dominante foi a 11 para as vigas e colunas e a combinação frequente de carregamento do ELS dominante foi a 8 para o deslocamento lateral do pórtico. Em todas as otimizações, a solução obtida pelo GA foi capaz satisfazer todas as restrições.

Diferente do modelo 1 em que a melhor solução foi encontrada no teste B (com 160 iterações) no presente modelo 2, a melhor solução foi obtida no teste C (com o espaço de busca viável reduzido). As Tabela 14 e Tabela 15 apresentam as variáveis de projeto e os valores das principais restrições de projeto obtidas na melhor solução encontrada de 789,66 kg.

Tabela 14 Melhor solução do modelo 2: variáveis de projeto

d_c (cm)	t_{w_c} (cm)	t_{f_c} (cm)	b_{f_c} (cm)	d_v (cm)	t_{w_v} (cm)	t_{f_v} (cm)	b_{f_v} (cm)	$F(x)$ (kg)
35,02	0,475	0,63	22,33	31,17	0,475	0,80	10,75	789,66

Fonte: Autor (2022)

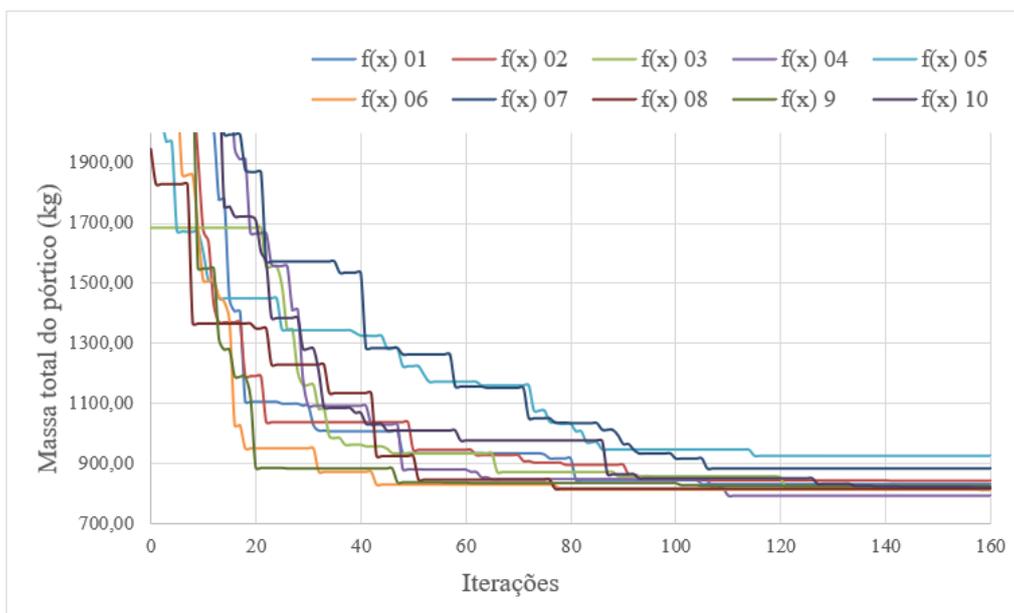
Tabela 15. Melhor solução do modelo 2: restrições de projeto

Elemento	Combinação	Limitação	critério	Combinação	critério
Viga	CN - 11	FLT	$1+g_2 = 0,77$	CF - 1	$1+g_4 = 0,77$
Coluna	CN - 11	FLT	$1+g_2 = 0,71$	CF - 8	$1+g_3 = 0,99$

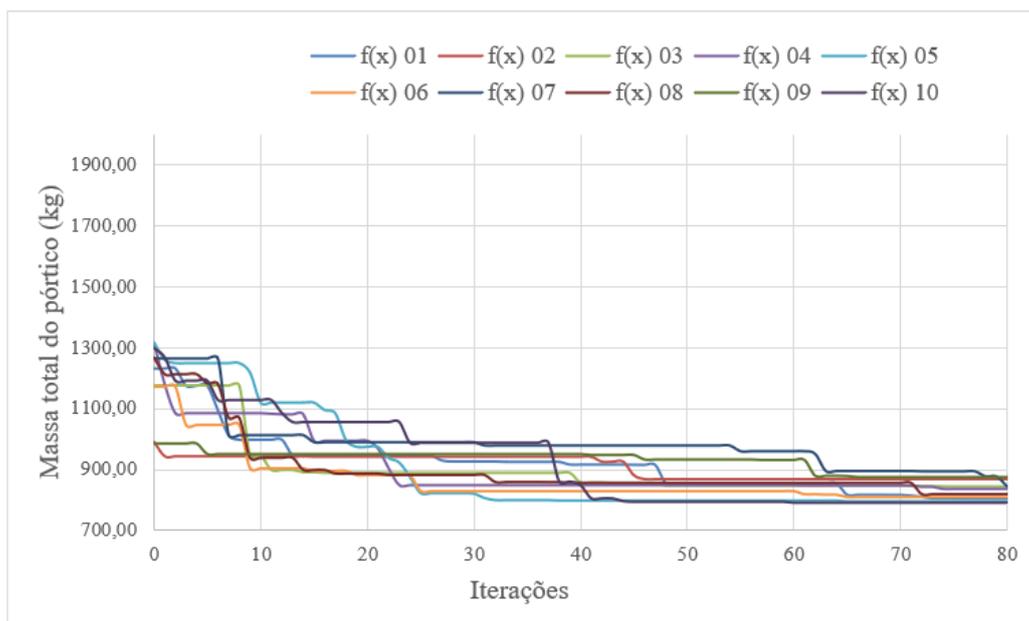
Fonte: Autor (2022)

De acordo com os valores das restrições apresentados na Tabela 15, pode-se questionar se a melhor solução obtida representa um ótimo global ou apenas um ótimo local, pois apresenta apenas uma única restrição ativa. Outro ponto importante a ser observado, é que agora com a consideração de um comprimento destravado (L_b) igual a 2,54 metros, a ocorrência da flambagem lateral com torção (FLT) limitou a resistência última da viga na verificação da flexão simples. A restrição quanto ao deslocamento lateral (g_4) foi a mais crítica de projeto e foi proporcionada pela combinação de carregamento frequente de serviço CF-8, a qual possui carregamentos de vento.

O histórico de convergência da função objetivo ao longo das iterações de cada otimização é ilustrado nas Figura 49 e Figura 50 para o teste B e C, respectivamente. É nítido perceber que a redução dos limites das variáveis (teste C) permite uma rápida convergência de resultados. O grau de dificuldade do problema de otimização aumentou com a consideração da análise FLT para as vigas, o que poderia explicar a dificuldade do teste B em obter uma solução melhor que a solução encontrada no teste C. No entanto, a redução dos limites das variáveis pode ocasionar na perda da solução ótima global, como ocasionado nos testes realizados no Modelo 1, anteriormente apresentado.

Figura 49 - Convergência de $f(x)$ - Teste B

Fonte: Autor (2022)

Figura 50 - Convergência de $f(x)$ - Teste C

Fonte: Autor (2022)

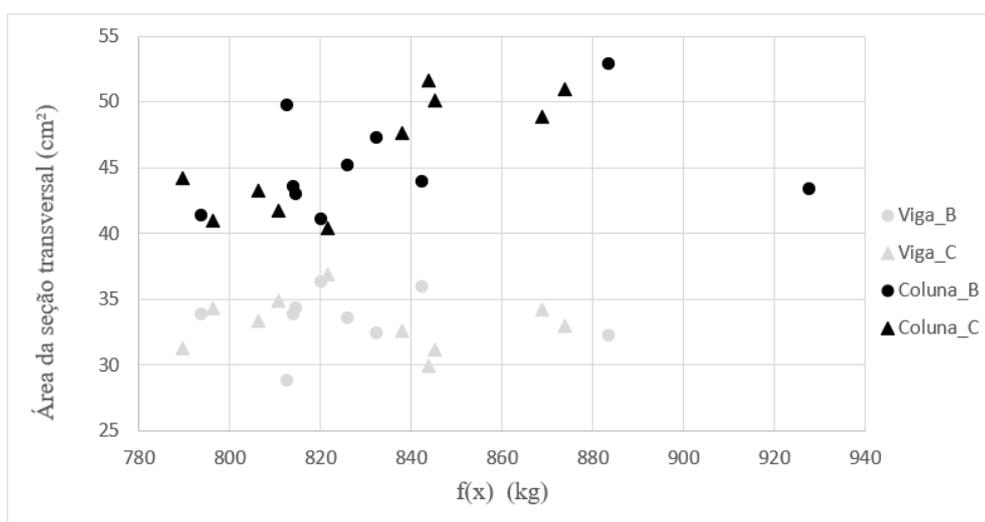
Com o objetivo de averiguar a qualidade dos testes e compreender que valores podem ser esperados em uma nova execução independente, algumas características estatísticas foram calculadas e são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16. Dados estatísticos de $f(x)$ para a solução ótima do modelo 2

Teste	Menor Valor	Maior Valor	Média \bar{f}	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Intervalo de Confiança para 95%
B	793,83	927,61	836,76	39,88	4,77%	808,23 – 865,29
C	789,66	873,81	829,39	29,20	3,52%	808,50 – 850,28

Fonte: Autor (2022)

De modo similar ao apresentado no modelo 1, as soluções determinadas pelo algoritmo de otimização possuem áreas de seções transversais para colunas maiores do que para vigas. A Figura 51 apresenta essa relação entre colunas e vigas para cada solução otimizada de cada teste.

Figura 51 – Viga e Coluna: área da seção transversal (cm²)

Fonte: Autor (2022)

Por último, é apresentada a média de redução do consumo de aço agregado ao processo de otimização em comparação com o consumo estimado de 1048 kg do exemplo apresentado por Pravia et. al. (2010), conforme Tabela 17. Os dados são referentes tanto ao modelo 1 quanto ao modelo 2.

Tabela 17 Média da redução do consumo de aço: referência 1048 kg

Modelos	Teste A	Teste B	Teste C
Modelo 01	5,72 %	21,77 %	20,45 %
Modelo 02	-	20,15 %	20,85 %

Fonte: Autor (2022)

É perceptível que a possibilidade de ocorrência da FLT nas vigas (modelo 2) em média não afetou o consumo de aço do pórtico. A redução do consumo de aço obtida pelas soluções otimizadas devem ser tomadas com cautela, pois o problema de otimização não foi formulado tomando estritamente as condições de projeto adotadas na solução de referência (Pravia et. al., 2010). Alguns aspectos como o tipo de perfil empregado ou a forma de consideração das cargas podem ter impacto relevante no dimensionamento, sendo responsáveis por parte da diferença do consumo de aço reportado na Tabela 17.

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS NA OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS DE GALPÕES INDUSTRIAIS

Esta seção apresenta uma análise comparativa entre três algoritmos de otimização metaheurísticos: *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Harmony Search* (HS). A comparação é feita em termos da qualidade da solução e da confiabilidade do algoritmo, avaliados considerando um esforço computacional semelhante em todos os casos. Enquanto o número de avaliações da função objetivo é mantido constante para todos os casos.

O número total de avaliações da função objetivo foi definido igual a 1296, adotado por ser o valor resultante da combinação de 16 indivíduos com 160 iterações do algoritmo GA já desempenhado no teste B dos modelos anteriores. Assim, foi proposta uma análise comparativa entre os algoritmos GA, PSO e HS com configurações que proporcionem essa mesma quantidade de avaliações da função objetivo. O pórtico estudado mantém as características e parâmetros adotados para o modelo 2 da seção anterior.

Duas configurações de tamanho de população e número total de iterações foram definidas. A primeira configuração é definida pelo número total de indivíduos igual ao número de variáveis de projeto (8 no total). E a segunda é definida pelo número total de indivíduos igual ao dobro do número de variáveis de projeto, 16 no total. Dessa forma, o número total de iterações de cada algoritmo foi calculado para que as otimizações tivessem as 1296 avaliações da função objetivo. Entende-se como indivíduos, para os algoritmos PSO e HS, o número total de partículas e o tamanho da memória harmônica, respectivamente.

O algoritmo GA possui a peculiaridade que quando definida uma população igual a 16 com uma porção de pais igual a 0,50 (utilizada neste trabalho), o algoritmo gera apenas 8 novos indivíduos a cada iteração. Por essa razão, o GA foi otimizado considerando uma população

total de 32 indivíduos para que 16 novos indivíduos fossem gerados a cada iteração, sendo essa a segunda configuração. A primeira configuração considerando a população igual ao número de variáveis não foi otimizada, visto que é a mesma apresentada no modelo 2 deste trabalho.

A Tabela 18 apresenta os tamanhos de população, o número total de iterações e o número total de análises da função objetivo para cada algoritmo. Enquanto a Figura 52 apresenta 3 tabelas que inclui os parâmetros de cada algoritmo, GA, PSO e HS, respectivamente.

Tabela 18 Configurações de cada algoritmo

Parâmetros	GA_{01}	GA_{02}	PSO_{01}	PSO_{02}	HS_{01}	HS_{02}
Tamanho Pop.	16	32	8	16	8	16
Nº Iterações	160	79	162	81	1288	1280
Nº Análises $f(x)$	1296	1296	1296	1296	1296	1296

Fonte: Autor (2022)

Figura 52 Parâmetros dos algoritmos: GA, PSO e HS.

Algoritmo GA	
Parâmetros	Valores
probabilidade de cruzamento	0,85
probabilidade de mutação	0,10
taxa de elitismo	0,10
porção de pais	0,50
tipo de cruzamento	uniforme

Algoritmo PSO	
Parâmetros	Valores
componente cognitivo (c_1)	2,00
componente social (c_2)	2,00
momento de partícula (w)	0.875 - 0.30

Algoritmo HS	
Parâmetros	Valores
taxa de memória harmônica (HMCR)	0,90
taxa de ajuste (PAR)	0,10
largura de ajuste (b_w)	-

Fonte: Autor (2022)

Os valores adotados estão baseados nos reportados em trabalhos relacionados ao tema de otimização de estruturas de aço. Todos os valores dos parâmetros dos algoritmos são constantes a cada iteração, com uma única exceção do momento de partícula (w) do algoritmo PSO que varia linearmente ao longo das iterações. Essa variação dinâmica permite uma busca mais global de soluções no início da otimização, e uma melhor convergência de resultados no final.

O parâmetro de largura de ajuste (b_w) do algoritmo HS é determinado para cada variável de projeto de acordo com as Equações (63) e (64), onde distinguem-se as variáveis contínuas e discretas, respectivamente. A constante de 0,10 foi adotada como forma de considerar uma mesma proporção entre as variáveis de projeto. Como o algoritmo HS implementado deve receber apenas números inteiros, o valor mínimo de $b_w = 1,0$ foi definido e um arredondamento é aplicado quando necessário. O conjunto $[x_i^L, x_i^U]$ representa os valores limites mínimos e máximos das variáveis contínuas. Enquanto, m_i representa o número total de valores admissíveis para as variáveis discretas.

$$b_w = 0,10 * (x_i^U - x_i^L) \quad (63)$$

$$b_w = 0,10 * m_i \quad (64)$$

Em cada configuração adotada para cada algoritmo metaheurístico foi realizado a otimização do modelo de pórtico 10 vezes de forma independente. Os resultados gerais da melhor solução, solução média e pior solução encontrada para cada algoritmo são apresentados na Tabela 19. A massa total do pórtico (w) de cada solução apresentada foi comparada com a solução ótima global (w_g) determinada pelo algoritmo PSO_{01} , permitindo mensurar a variação existente entre as soluções obtidas. O gráfico mostrado na Figura 53 apresenta os coeficientes de variação das 10 otimizações de cada algoritmo.

Tabela 19 Resultados gerais da solução $f(x)$

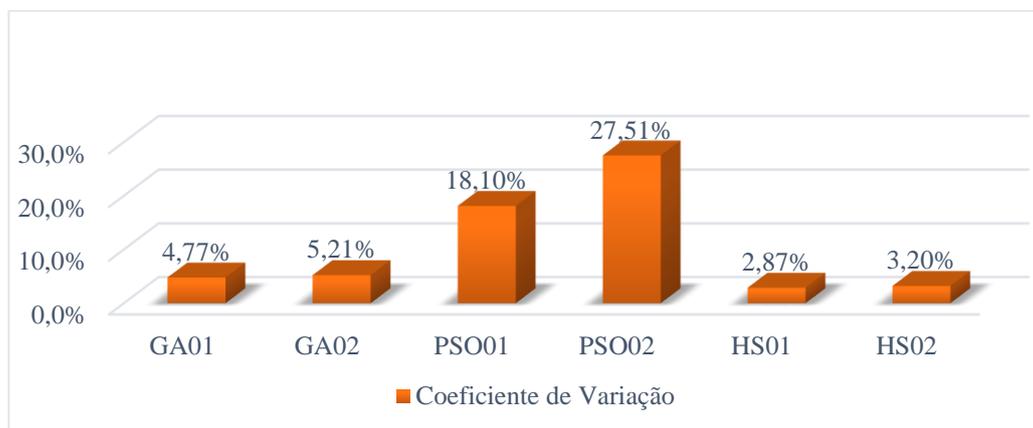
Testes	Mínimo	Média	Máximo
	kg (w/w_g)	kg (w/w_g)	kg (w/w_g)
GA₀₁	793,83 (1,080)	836,76 (1,139)	927,61 (1,262)
GA₀₂	746,75 (1,016)	825,01 (1,123)	887,37 (1,208)
PSO₀₁	734,79 (1,00)	886,71 (1,207)	1208,88 (1,645)
PSO₀₂	736,34 (1,002)	931,26 (1,267)	1601,88 (2,180)
HS₀₁	735,31 (1,001)	770,27 (1,048)	804,93 (1,095)
HS₀₂	738,27 (1,005)	767,99 (1,045)	812,36 (1,106)

Fonte: Autor (2022)

A melhor solução encontrada, considerada aqui como solução ótima, é a de 734,79 kg de aço pertencente ao algoritmo PSO_{01} que possui o número de partículas igual ao número de variáveis de projeto, 8. Considerando como soluções quase-ótimas aquelas que apresentam o valor da função objetivo até 0,50% superior à solução ótima, identifica-se que o algoritmo GA foi o único que não foi capaz de obter essas soluções. O algoritmo PSO_{01} e PSO_{02} possui

as maiores variações de solução dentro de uma amostragem de 10 otimizações, incluindo as duas piores soluções encontradas entre todas as otimizações.

Figura 53 Coeficiente de variação dos algoritmos



Fonte: Autor (2022)

Logo, para os limites de tamanho de população e número de iteração e para os parâmetros adotados, os algoritmos GA e PSO apresentaram os piores desempenhos para a resolução do problema, por baixa acurácia e precisão. Por outro lado, o algoritmo HS conseguiu determinar soluções quase-ótimas (735,31 e 738,37 kg), e conforme apresentado no gráfico da Figura 53, possui os menores coeficientes de variação. Assim, o HS é considerado adequado para resolução do problema de pórtico de aço, e o HS₀₁ como a melhor opção. Por fim, o HS demonstrou possuir pouca influência pela alteração do tamanho da memória harmônica.

A Tabela 20 apresenta os valores das variáveis de projeto da melhor solução encontrada por cada algoritmo e a Tabela 21 apresenta os valores e as combinações de carregamento críticas de cada restrição de projeto do ELU e ELS.

Tabela 20 Variáveis de projeto para a solução obtida por cada algoritmo

Algoritmo	d_V	t_{wV}	t_{fV}	b_{fV}	d_C	t_{wC}	t_{fC}	b_{fC}
GA ₀₁	32,86	0,48	0,63	14,90	32,35	0,48	0,63	21,12
GA ₀₂	34,694	0,475	0,475	13,294	37,227	0,475	0,630	20,487
PSO ₀₁	38,886	0,475	0,475	11,957	31,580	0,475	0,630	20,882
PSO ₀₂	35,020	0,475	0,475	13,758	47,170	0,475	0,475	20,087
HS ₀₁	39,137	0,475	0,475	12,259	32,004	0,475	0,630	20,356
HS ₀₂	32,836	0,475	0,630	10,980	37,561	0,475	0,630	19,470

Fonte: Autor (2022)

Tabela 21 Resultado das restrições de projeto: ELU e ELS

Algoritmo	Viga		d_z		Coluna		d_x	
	Comb.	$1+g_2$	Comb.	$1+g_4$	Comb.	$1+g_2$	Comb.	$1+g_3$
GA ₀₁	11	0,71	1	0,73	11	0,86	8	0,99
GA ₀₂	11	0,996	1	0,726	11	0,864	8	0,935
PSO ₀₁	11	0,819	1	0,722	11	0,909	8	0,999
PSO ₀₂	11	1,000	1	0,645	11	0,995	8	0,806
HS ₀₁	11	0,812	1	0,707	11	0,962	8	0,981
HS ₀₂	11	0,877	1	0,771	11	0,991	8	0,987

Fonte: Autor (2022)

De acordo com as informações apresentadas é possível identificar que a restrição de projeto de requisito de segurança g_2 é crítica para a combinação CN-11 tanto para os elementos de coluna quanto de viga. A combinação CF-8 produz os maiores valores de deslocamento lateral do pórtico (g_3) e a combinação CF-1 os maiores valores de deslocamento vertical do cume (g_4).

Quanto às restrições ativas ou quase-ativas é evidente pelos resultados que o deslocamento lateral do pórtico (d_x) predomina na maior parte das soluções. No entanto, observa-se que os resultados apresentados pela solução do PSO₀₂ são diferentes da melhor solução encontrada PSO₀₁, mesmo que a diferença de massa deles seja quase imperceptível (0,21%). A solução encontrada pelo PSO₀₂ possui apenas restrições de segurança ativas.

De acordo com os valores das variáveis de projeto, observa-se que a solução do PSO₀₁ possui uma altura total de seção (d) semelhante entre as colunas e vigas, enquanto a solução do PSO₀₂ possui colunas com altura total de seção maiores. As características de cada uma das soluções refletem em diferenças significativas na rigidez dos elementos, modificando a distribuição dos esforços internos. Assim, entende-se que o problema de otimização de pórticos de galpões industriais tratado nesse trabalho pode apresentar múltiplos ótimos globais.

5.3 OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS COM BARRAS PRISMÁTICAS

Nesta seção serão apresentados os estudos parametrizados do pórtico de aço considerado na análise comparativa entre os algoritmos. O estudo é desenvolvido considerando a variação do comprimento do vão do pórtico $L_{vão} = \{15, 25, 35 \text{ e } 45\}$ metros e a velocidade básica do vento $V_0 = \{35, 40 \text{ e } 45\}$ m/s. Assim, um total de 12 casos de projeto foram analisados, cada

um deles com 3 otimizações independentes. O objetivo é determinar a influência do vão e do carregamento do vento na massa total do pórtico e nas restrições ativas de projeto. Essas variações permitem um estudo parametrizado de pórticos de galpões industriais, identificando características e tendências de comportamento estrutural.

Após as análises comparativa entre os algoritmos metaheurísticos, foi determinado que o HS é mais adequado para resolução do problema de pórtico de aço para os limites de esforço computacional admitidos para o processo de otimização nesse trabalho. Dessa forma, os parâmetros adotados para o algoritmo HS são os definidos pelo HS₀₁ apresentado na seção anterior.

A presente seção considerou as análises de segunda ordem local (efeito $P-\delta$) de acordo com os procedimentos simplificados da NBR 8800 (ABNT, 2008), por meio do cálculo do coeficiente de majoração dos esforços de momento fletor $B1$. O cálculo desse coeficiente é realizado de acordo com a Equação (25) deste trabalho. Como se trata de análise de um pórtico submetido a cargas transversais, o valor de C_m é tomado igual a 1,0 de forma conservadora. N_{ex} é calculado de acordo com a Equação (27) e considera uma redução da rigidez do material, onde $E_{a_{red}} = 0,80 E_a$, para incluir a não linearidade do material.

Nesta seção, são usadas as nomenclaturas PXX para designar um pórtico, onde XX se refere ao vão do pórtico em metros. Os casos com diferentes carregamentos de vento são designados por PXX_VV, onde VV se refere à velocidade básica do vento em m/s. Dessa forma, P15 se refere ao pórtico com vão de 15m e P35_45 se refere ao caso do pórtico com vão de 35 m submetido a ação do vento com velocidade básica de 45 m/s.

Os resultados das variáveis de projeto para as melhores soluções são apresentados na Tabela 22 junto com a coluna da função objetivo. Salienta-se que o caso P15 com vento de 40 m/s é o único que apresenta resultados referentes a 10 otimizações independentes, que foram as obtidas no estudo comparativo apresentado na seção anterior.

Tabela 22 Elementos prismáticos: Variáveis de projeto

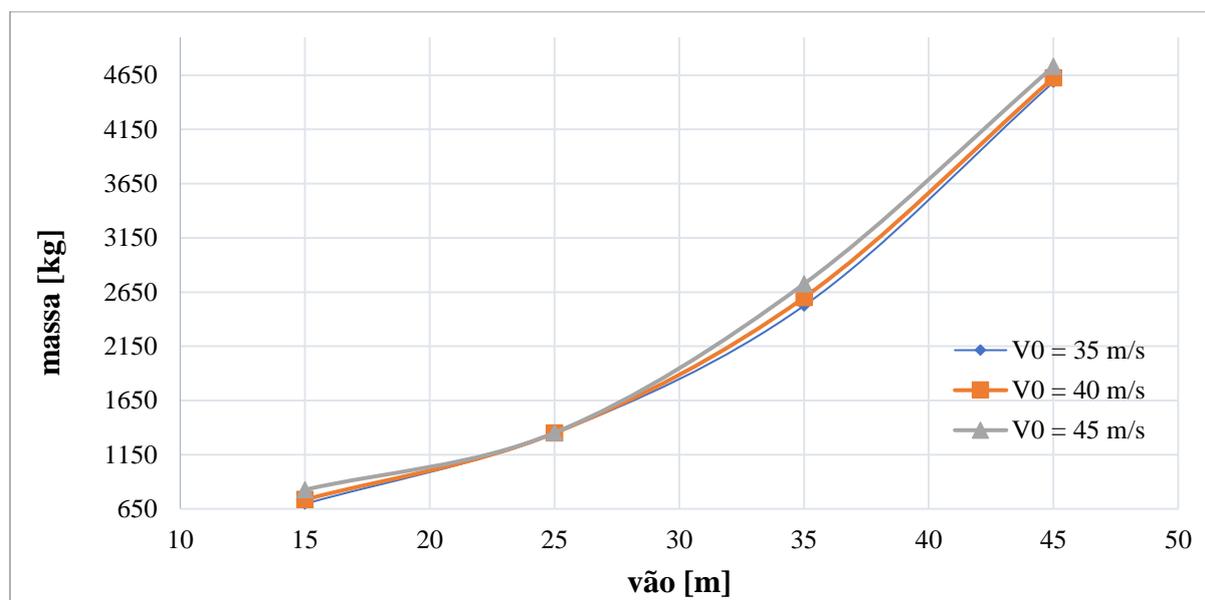
Caso de Projeto	d_v (cm)	t_{wv} (cm)	t_{fv} (cm)	b_{fv} (cm)	d_c (cm)	t_{wc} (cm)	t_{fc} (cm)	b_{fc} (cm)	$f(x)$ (kg)
P15_35	32,51	0,475	0,475	11,39	34,63	0,475	0,63	20,07	696,11
P15_40	39,14	0,475	0,475	12,26	32,00	0,475	0,63	20,36	735,31
P15_45	37,77	0,475	0,63	11,41	43,18	0,475	0,63	21,89	826,58
P25_35	57,12	0,475	0,80	11,79	42,18	0,475	0,80	26,93	1489,08

Caso de Projeto	d_v (cm)	t_{wv} (cm)	t_{fv} (cm)	b_{fv} (cm)	d_c (cm)	t_{wc} (cm)	t_{fc} (cm)	b_{fc} (cm)	$f(x)$ (kg)
P25_40	51,24	0,475	0,63	14,23	40,41	0,475	0,80	24,95	1379,99
P25_45	59,26	0,475	0,63	12,57	33,14	0,475	0,95	23,07	1417,28
P35_35	65,76	0,475	0,95	17,89	62,82	0,475	0,95	25,49	2523,52
P35_40	64,57	0,475	0,95	17,32	71,23	0,63	0,95	24,53	2599,09
P35_45	61,65	0,475	0,95	20,39	79,70	0,63	0,80	25,83	2725,22
P45_35	87,14	0,63	0,95	22,11	84,85	0,63	1,25	28,22	4586,44
P45_40	93,24	0,80	0,95	16,89	83,01	0,63	1,25	25,60	4853,15
P45_45	88,88	0,63	1,60	14,01	84,89	0,63	1,25	29,60	4730,32

Fonte: Autor (2022)

Os métodos heurísticos se baseiam em processos probabilísticos e aleatórios que tendem a apresentar soluções quase-ótimas, mas dificilmente convergem para soluções idênticas em problemas complexos e com número de iterações limitado. Dessa forma, entende-se que as soluções apresentadas na Tabela 23 são quase-ótimos de forma que a Figura 54 ilustram apenas a tendência da variação do projeto ótimo. A falta de convergência para uma solução otimizada é identificada para o caso do P45_40 (por exemplo) que possui massa superior à solução do caso P45_45. Como solução, um maior número de avaliações da função objetivo ou otimizações independentes poderiam ser adotados.

Figura 54 Estudos parametrizados: comportamento da função objetivo



Fonte: Autor (2022)

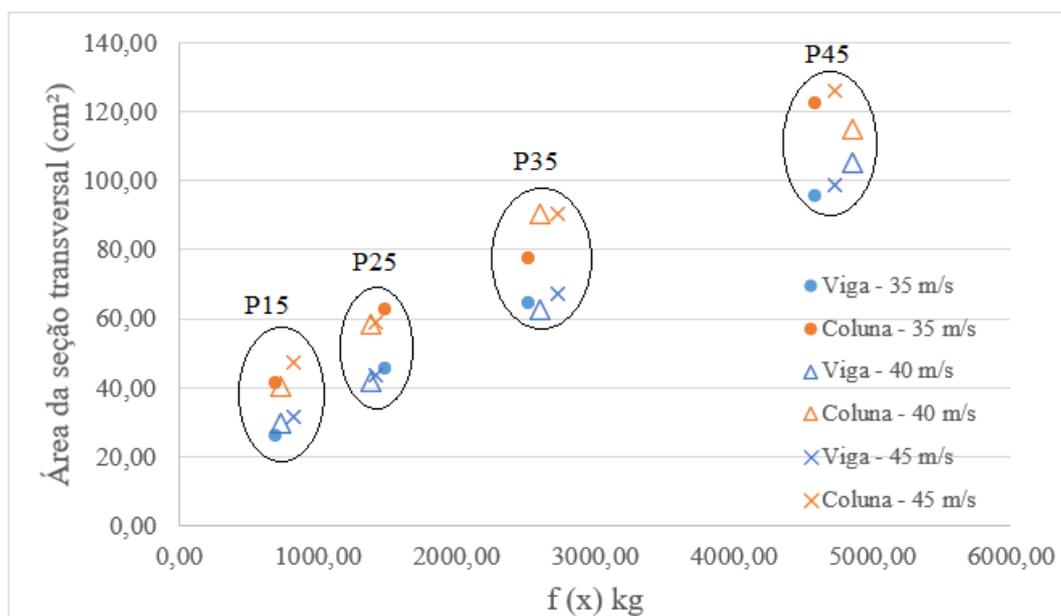
De acordo com a Figura 54 e os valores apresentados na Tabela 22, é possível verificar que a influência da variação da velocidade do vento é maior para os P15 do que para os demais vãos de pórticos. No entanto, essa influência torna-se pequena (quando comparada com o

aumento do vão) a ponto que o erro obtido nas soluções de otimização devido à variabilidade da solução ótima consegue se sobrepor.

É possível perceber que a altura da seção dos elementos (coluna e viga) possuem um comportamento crescente constante. A chapa da alma permanece com espessura mínima, de 0,475 cm, do P15 até o P35, o que pode indicar que a resistência da alma não é um limitante de projeto. Ao contrário, as chapas das mesas das seções transversais da viga e do pilar possuem alta variabilidade de espessuras, chegando a 1,60 cm. A largura das mesas acompanha o aumento da espessura, indicando que a resistência das mesas e a instabilidade dos elementos à instabilidade lateral podem ser limitantes de projeto.

Como era esperado pelos valores das variáveis de projeto, em nenhum caso a verificação da alma dos perfis foi um limitante de projeto, permitindo espessuras mínimas. De modo que as verificações de projeto (FLM e FLT) são críticas para esse tipo de projeto, e que por causa disso, em nenhuma das soluções foi permitido que os perfis atingissem seus momentos de plastificação (M_{pl}). Outra característica dos pórticos analisados é a predominância de colunas com seções transversais maiores do que vigas (Figura 55), independente do comprimento de vão do pórtico.

Figura 55 Elementos prismáticos: predominância da área de colunas sob vigas



Fonte: Autor (2022)

É apresentado na Tabela 23 os valores das restrições de projeto com suas respectivas combinações de carregamento. Os valores destacados em vermelho representam as restrições ativas de projeto, enquanto em laranja são valores iguais ou maiores que 94% de seu limite, sendo aqui, considerados como restrições quase-ativas. Esse formato é padrão ao longo de todo o trabalho.

Ao que refere os critérios de segurança, verificou-se que as soluções ótimas apresentam valores de restrição g_2 (segurança à flexocompressão) ativa ou próxima da ativação para vários casos estudados, conforme mostra a Tabela 23. A inspeção mais detalhada dessas soluções mostrou que em todos os casos durante a verificação à flexão simples a resistência de projeto foi limitada pela ocorrência da FLM ou da FLT.

Tabela 23 Elementos prismáticos: valores e combinações das restrições

CASOS DE PROJETO	VIGA				COLUNAS				d_x		d_z	
	CN	B_1	$1+g_2$	$1+g_6$	CN	B_1	$1+g_2$	$1+g_6$	CF	$1+g_3$	CF	$1+g_4$
P15_35	1	1,0160	0,934	0,49	1	1,009	0,974	0,52	8	1,00	1	0,91
P15_40	11	1,0000	0,812	0,59	11	1,000	0,962	0,48	8	0,98	1	0,71
P15_45	11	1,0000	0,944	0,57	11	1,000	0,957	0,65	8	0,79	1	0,54
P25_35	1	1,0190	0,890	0,86	1	1,007	0,872	0,63	1	0,68	1	0,80
P25_40	1	1,0260	0,980	0,77	1	1,008	0,914	0,60	1	0,86	1	1,00
P25_45	1	1,0190	0,844	0,90	11	1,000	0,883	0,48	1	0,85	1	0,98
P35_35	1	1,0350	0,854	0,99	1	1,004	0,889	0,94	8	0,97	1	0,80
P35_40	1	1,0378	0,896	0,97	1	1,003	0,998	0,81	8	1,00	1	0,77
P35_45	1	1,0374	0,936	0,92	1	1,002	0,944	0,91	8	1,00	1	0,74
P45_35	1	1,0395	0,908	0,99	1	1,002	0,646	0,96	8	0,98	1	0,61
P45_40	1	1,0370	0,884	0,84	1	1,002	0,691	0,94	8	1,00	1	0,61
P45_45	1	1,0370	0,896	1,00	1	1,002	0,643	0,96	8	0,99	1	0,58

Fonte: Autor (2022)

Os resultados mostraram que dimensionamento do pórtico é definido pelas CN-1 e CN-11 ou pelas CF-1 e CF-8. O carregamento do vento só se torna relevante para as restrições associadas ao ELU para o P15 com V_0 de 40 e 45 m/s e para o P25 com V_0 de 45 m/s. A CF-1 foi determinante para a restrição ao deslocamento vertical (g_4), sendo essa a condição crítica no projeto dos P25. Por último, a restrição associada ao limite de esbeltez da alma dos elementos (g_6) ficou ativa ou quase-ativa para os pórticos P35 e P45, não sendo relevante para os casos com vãos menores.

O maior valor obtido de B_1 representa um aumento dos momentos fletores igual a 0,90% e 3,95% para as colunas e para as vigas, respectivamente. Observa-se que em termos gerais as

vigas são mais suscetíveis aos esforços normais do que as colunas. A CN-11 produz esforços de tração nas barras ($B_1=1,0$), enquanto a CN-1 produz esforços de compressão nas barras ($B_1>1,0$).

O P25-35 é o único caso de projeto em que não existiu em sua melhor solução encontrada ao menos uma restrição ativa. Isso pode ser explicado por se tratar de uma solução quase-ótima. Nota-se que os pórticos P25-35 e P25-40 não apresentam nenhuma combinação de ação crítica que inclui forças devido a velocidade básica do vento. Assim, se as forças do vento não predominam o seu dimensionamento, ambos os casos de projeto deveriam possuir a mesma massa total de pórtico.

O P25-45 de modo muito similar, apresentou uma solução que indica que apenas uma combinação de ação que inclui a força do vento poderia ser crítica para a avaliação do ELU das colunas. No entanto, a restrição de flexocompressão (g_2) está longe de ser uma restrição ativa ($0,883 < 1,0$). Logo, uma nova otimização foi realizada para o P25-35 e para o P25-45 (Tabela 24) incrementando o número de avaliações de $f(x)$ de 1296 para 2000, com o objetivo avaliar a possibilidade de se obter soluções melhores.

Tabela 24 Otimização assistida pelo algoritmo HS com um total de 2000 avaliações de $f(x)$

CASOS DE PROJETO	$f(x)$ (kg)	VIGA			COLUNA			d_x		d_z	
		CN	$1+g_2$	g_6	CN	$1+g_2$	$1+g_6$	CF	$1+g_3$	CF.	$1+g_4$
P25-35	1346,19	1	0,99	0,79	1	0,90	0,62	1	0,86	1	1,00
P25-45	1351,86	11	0,96	0,81	11	0,98	0,58	1	0,86	1	1,00

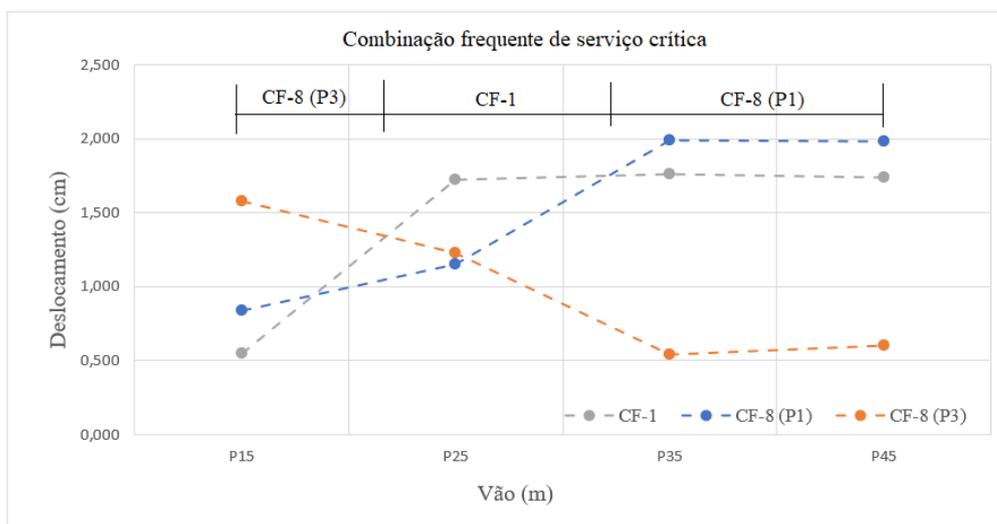
Fonte: Autor (2022)

Observa-se que agora, com um incremento do número de avaliações da função objetivo foi possível obter soluções com restrições ativas para os pórticos P25-35 e P25-45. Nota-se que as combinações predominantes se mantiveram as mesmas, e que a massa total dos pórticos são muito similares entre si. Isso indica que para os pórticos com vãos de 25 metros, a velocidade básica do vento (considerando os aspectos de projeto tratados neste trabalho) tem pouca influência no dimensionamento ótimo.

Os P25 são os únicos que não apresentam o deslocamento lateral (d_x) como restrição ativa. Além disso, este é o único vão de pórtico em que a pior combinação para o deslocamento lateral foi a CF-1, que possui apenas carregamentos gravitacionais, e não a CF-8, que também inclui o carregamento de vento a 90 graus em sua composição. Essa peculiaridade pode ser entendida através da observação dos deslocamentos laterais para os vários vãos estudados,

conforme apresentado para as combinações CF-1 e CF-8 na Figura 56. Como os pórticos e o carregamento da CF-1 são simétricos, os deslocamentos obtidos nos beirais são idênticos em módulo, mas com sentidos opostos. Por isso, o gráfico apresenta apenas uma curva para a CF-1 e duas curvas para a CF-8, que não é simétrica, onde P1 e P3 se referem aos pontos de verificação apresentados na Figura 35.

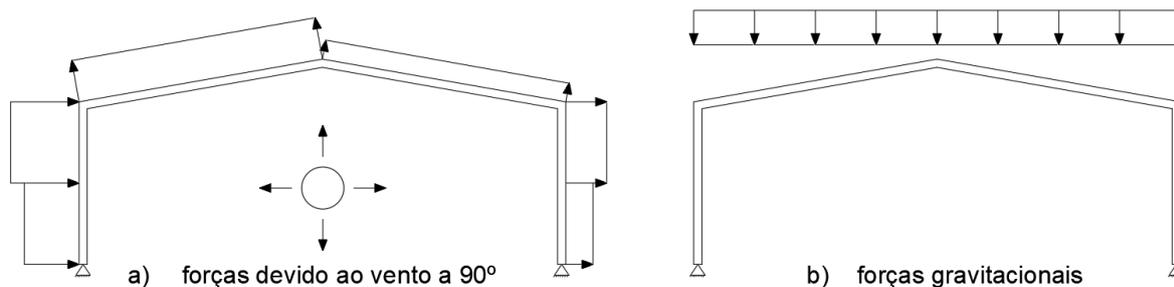
Figura 56 Deslocamentos laterais para vento de 45 m/s



Fonte: Autor (2022)

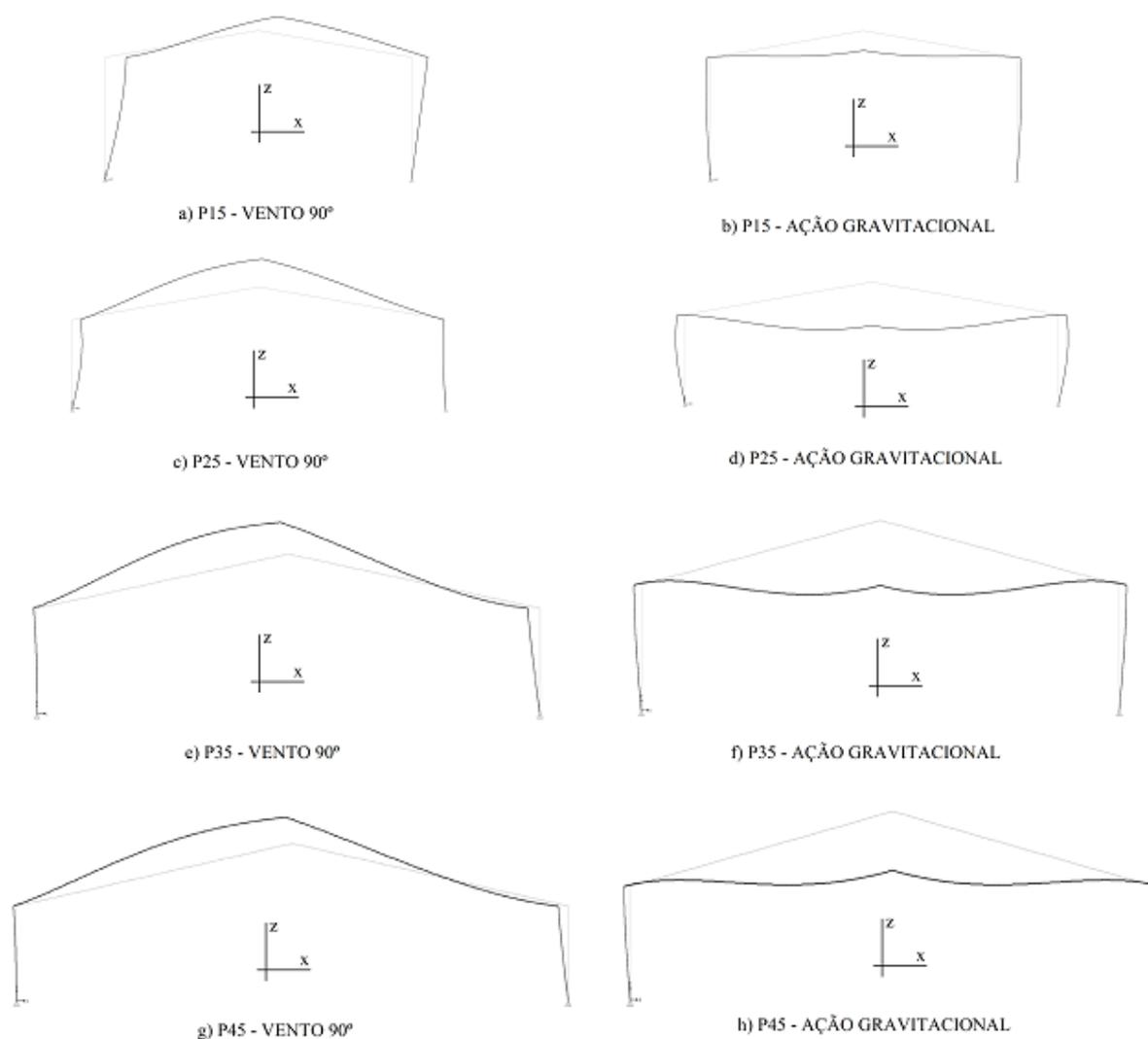
De acordo com a Figura 56, identificam-se 3 intervalos de vãos de pórticos que possuem diferentes combinações críticas de projeto. Com o objetivo de compreender esse comportamento da estrutura frente aos esforços de vento é apresentado na Figura 57 o modelo de carregamento das ações de vento a 90° utilizado para a combinação 8 e das ações gravitacionais. A Figura 58 apresenta a forma deformada dos pórticos submetidos a essas ações apresentadas na Figura 57.

Figura 57 Modelo de carregamento das ações de vento e gravitacionais



Fonte: Autor (2022)

Figura 58 Deformada dos pórticos



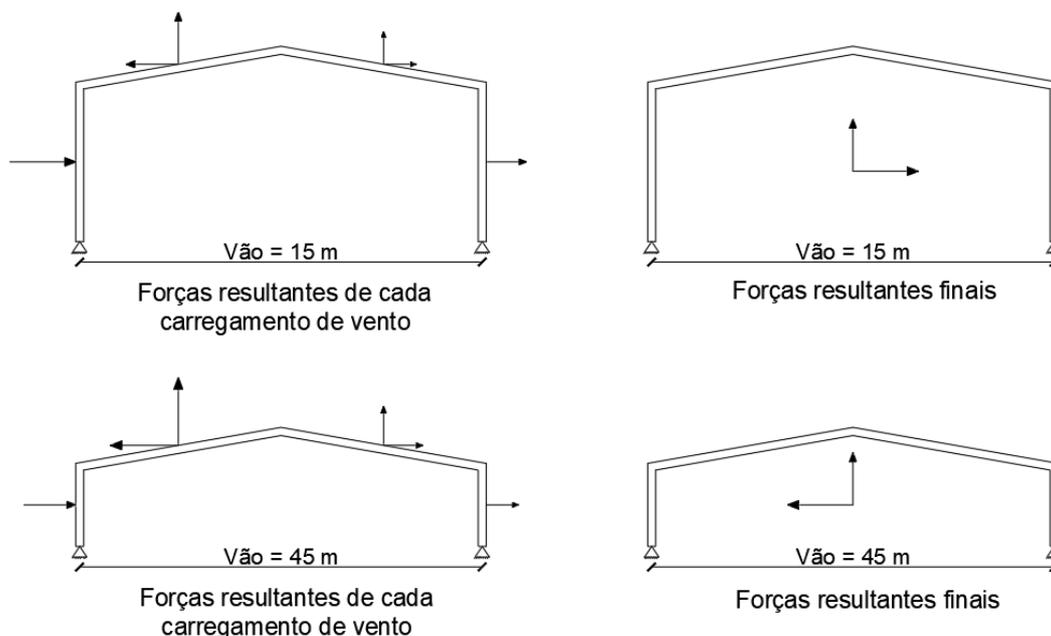
Fonte: Autor (2022)

Para o carregamento gravitacional de peso próprio os pórticos se deslocam de forma similar, com deslocamento para baixo da cumeeira e deslocamento simétrico para fora no topo das colunas. O padrão de deformação dos pórticos devido à ação do vento muda com a amplitude do vão. Os deslocamentos laterais do topo dos pilares alteram do sentido positivo para o sentido negativo na direção do eixo x.

Analisando os carregamentos de vento de cobertura, apresentados na Figura 57, observa-se que ele atua de forma perpendicular as vigas. Como as vigas são inclinadas, a força resultante atuante em cada uma delas tem o componente vertical atuando para cima e os componentes horizontal no sentido da cumeeira para os beirais. Como se trata de um carregamento distribuído sobre as vigas, quanto maior o comprimento delas, maior a força resultante de

cobertura. A Figura 59 exemplifica os vetores resultantes das forças de vento representados para os P15 e P45.

Figura 59 Vetores de força dos carregamentos de vento



Fonte: Autor (2022)

Assim, existe uma transição do sentido dos deslocamentos laterais do pórtico de 15 metros até o pórtico de 45 metros. Para um determinado comprimento de vão de pórtico, os deslocamentos laterais causados pelo vento a 90 graus tornam-se nulos pelo equilíbrio das forças horizontais apresentadas na Figura 59. Por outro lado, os deslocamentos causados pelas cargas gravitacionais são crescentes conforme o vão do pórtico aumenta. Em função disto, existe um intervalo de vãos de pórtico para o qual os deslocamentos verticais causados pelas forças gravitacionais são mais críticos do que os deslocamentos laterais causados pelas forças do vento, conforme apresentado na Figura 57.

5.4 OTIMIZAÇÃO DE PÓRTICOS COM BARRAS NÃO-PRISMÁTICAS

Esta seção apresenta um estudo sobre a otimização de pórticos de aço com elementos não-prismáticos, onde a altura da alma varia linearmente ao longo do comprimento de cada elemento, enquanto a largura da mesa e as espessuras de chapas são mantidas constantes. As mesmas condições de projeto definidas nos casos do estudo paramétrico apresentado na seção anterior foram adotadas no dimensionamento otimizado da estrutura com elementos não-prismáticos, permitindo uma análise comparativa entre as duas soluções.

A configuração dos pórticos segue o apresentado na Figura 36, onde é possível ver que as vigas de cobertura foram divididas em 3 trechos de comprimentos destravados (L_{V_1} , L_{V_2} e L_{V_3}) enquanto as colunas mantêm-se como um único elemento. Conforme os resultados obtidos por Kaveh and Ghafari (2019), os trechos com variação da altura do perfil nas extremidades da viga (L_{V_1} e L_{V_3}) são mais longos, a ponto do comprimento do trecho interno (L_{V_2}), onde não existe variação da altura da seção, ser aproximadamente 20% do comprimento total da viga. Essa lógica foi adotada para definir os comprimentos dos trechos da viga para cada pórtico estudado, conforme mostra a Tabela 25. Os comprimentos L_{V_i} também foram tomados como múltiplos de 2,5 m, pois admite-se que existam pontos de travamento lateral com esse espaçamento. Com isso, os comprimentos livres onde a FLT pode se desenvolver são similares aos adotados para a otimização dos pórticos formados por elementos prismáticos, apresentada na seção anterior, tornando mais significativa a comparação entre os resultados ótimos obtidos para essas soluções estruturais.

Tabela 25 Comprimentos dos elementos de viga (m)

Pórticos	L_{V_1}	L_{V_2}	L_{V_3}
P15	2,50	2,50	2,50
P25	5,0	2,50	5,0
P35	7,50	2,50	7,50
P45	10,0	2,50	10,0

Fonte: Autor (2022)

Todas as otimizações dos pórticos com elementos não-prismáticos foram realizadas com o algoritmo *Harmony Search* (HS). No entanto, o número de iterações totais e o tamanho da memória harmônica (HM) foram modificados em relação aos adotados nos estudos sobre otimização de pórticos com barras prismáticas, pois o número de variáveis de projeto aumentou de 8 para 11, e o limite máximo da altura de perfil (d) aumentou para os pórticos de 25, 35 e 45 metros de vão, conforme Tabela 26.

Tabela 26 Intervalo dos valores das variáveis de projeto (cm) para cada vão de pórtico

Altura da seção	P15	P25	P35	P45
d_{s_i}	{15, 100}	{15, 115}	{15, 135}	{15, 150}

Fonte: Autor (2022)

Em otimizações preliminares realizadas como testes, constatou-se que a altura de algumas seções nas soluções otimizadas para os pórticos de maiores vãos atingia o limite superior

definido para essa variável nos estudos sobre a otimização de pórticos com elementos prismáticos (ver Tabela 9). Por isso, o intervalo admissível para a altura da seção foi aumentado gradativamente para os pórticos P25, P35 e P45.

Os testes preliminares também indicaram a necessidade de um aumento do número de iterações em relação ao empregado na seção anterior, o que era esperado devido ao aumento do número de variáveis de projeto na otimização da estrutura com elementos não-prismáticos. Os estudos reportados nesta seção se baseiam em otimizações com 2000 iterações. Também foi estudado o aumento do tamanho de memória (HM) do HS de 8 para 11. Porém, essa alteração do tamanho de HM não foi adotada devido aos resultados apresentarem soluções com maiores valores da função objetivo. O que ocorreu de forma similar na seção 5.2 do presente trabalho, onde diferentes configurações para os algoritmos foram adotadas (Tabela 18). Quando se aumenta o tamanho de HM, incrementa-se o número de combinações possíveis de criação de um novo harmônico, o que necessitaria de um maior número de iterações para comportar esse incremento. Todos os demais parâmetros do algoritmo HS se mantiveram iguais aos utilizados nos pórticos com elementos prismáticos.

A partir do que foi descrito anteriormente, 5 otimizações independentes foram realizadas para cada um dos 12 casos. A Tabela 27 permite visualizar os resultados da massa total de pórtico obtidos para cada caso, mostrando a melhor, a pior e a solução média encontrada entre as otimizações independentes.

Tabela 27 Resultados de $f(x)$ e medições das otimizações

Pórticos	Melhor Solução (kg)	Solução Média (kg)	Pior Solução (kg)
P15_35	650,72	693,75 (+6,61%)	770,64 (+ 18,43%)
P15_40	662,94	708,35 (+6,85%)	783,73 (+ 18,22%)
P15_45	750,20	804,76 (+7,27%)	918,38 (+ 22,42%)
P25_35	1226,00	1334,44 (+8,85%)	1452,48 (+ 18,47%)
P25_40	1223,24	1306,15 (+6,78%)	1347,94 (+ 10,19%)
P25_45	1274,51	1298,57 (+1,89%)	1325,73 (+ 4,02%)
P35_35	2219,39	2382,79 (+7,36%)	2581,91 (+ 16,33%)
P35_40	2332,96	2480,86 (+6,34%)	2618,78 (+ 12,25%)
P35_45	2399,13	2499,07 (+4,17%)	2648,69 (+ 10,40%)
P45_35	3861,48	4175,23 (+8,13%)	4747,56 (+ 22,95%)
P45_40	4068,48	4231,68 (+4,01%)	4654,48 (+ 14,40%)
P45_45	4043,81	4183,82 (+3,46%)	4463,34 (+ 10,37%)

Fonte: Autor (2022)

De acordo com os resultados, percebe-se que apesar da adoção de 2000 iterações, os resultados das otimizações independentes de cada pórtico variaram em até 22,42%, entre a melhor e a pior solução encontrada. Isso demonstra a importância da realização de mais de uma única otimização independente para os algoritmos heurísticos, e que para os parâmetros adotados 5 otimizações independentes não são suficientes.

Em alguns casos, observou-se pequena variação de massa da solução ótima com o aumento da intensidade do vento, como entre P25_35 e P25_40 ou entre P45_40 e P45_45. Isso pode indicar, que a solução encontrada para os casos com menor intensidade do vento são subótimas, conforme constatado na seção anterior para pórticos com barras prismáticas. Os valores das variáveis de projeto referentes as melhores soluções da Tabela 42 são apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 Valores das variáveis de projeto (cm) das melhores soluções encontradas.

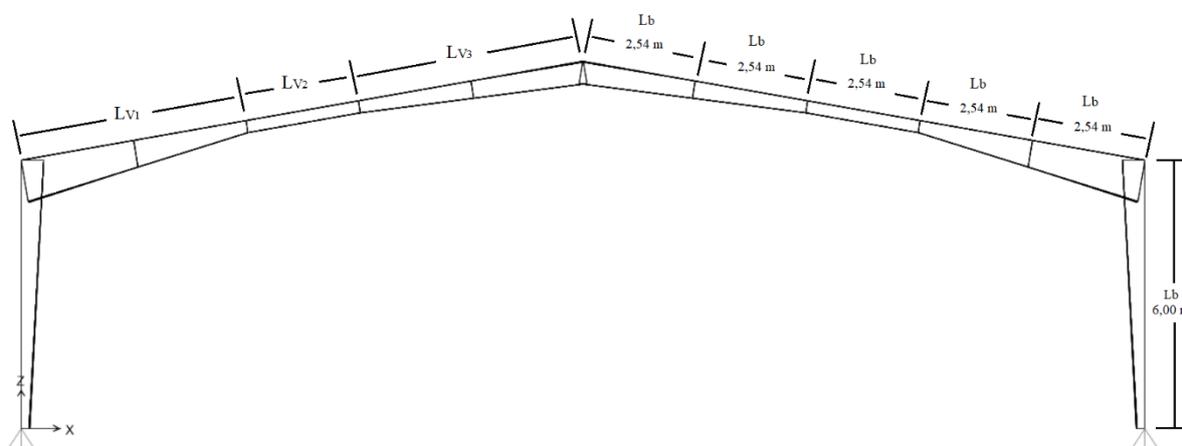
CASOS DE PROJETO	VIGA (cm)						COLUNA (cm)				
	d_{s_3}	d_{s_4}	d_{s_5}	t_{wv}	t_{fv}	b_{fv}	d_{s_1}	d_{s_2}	t_{wc}	t_{fc}	b_{fc}
P15_35	68,41	15,60	45,30	0,475	0,475	11,09	15,88	48,56	0,475	0,63	18,95
P15_40	69,27	21,24	24,14	0,475	0,475	10,99	15,00	45,90	0,475	0,63	20,56
P15_45	71,46	21,12	22,09	0,475	0,475	12,55	15,00	46,05	0,475	0,80	20,90
P25_35	93,31	27,78	56,44	0,475	0,475	15,05	17,74	48,94	0,475	0,80	24,34
P25_40	97,24	29,45	44,92	0,475	0,475	15,09	15,57	57,18	0,475	0,80	23,52
P25_45	82,08	26,71	59,62	0,475	0,630	14,32	15,00	55,70	0,475	0,80	23,61
P35_35	100,92	48,97	80,80	0,475	0,950	14,21	15,00	87,62	0,475	0,80	25,37
P35_40	93,58	59,17	65,27	0,475	0,800	17,99	17,14	76,86	0,475	0,95	25,16
P35_45	98,82	55,39	72,00	0,475	0,800	17,38	15,00	82,38	0,475	1,25	22,65
P45_35	133,98	69,98	73,38	0,63	0,80	18,97	16,93	130,06	0,63	0,95	25,95
P45_40	120,32	75,01	93,99	0,630	0,950	17,37	15,00	123,64	0,630	0,95	28,50
P45_45	130,99	77,80	88,16	0,630	0,800	19,51	23,57	121,87	0,630	0,95	25,87

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que os resultados obtidos são coerentes com o esperado, as alturas têm comportamento crescente conforme do P15 ao P45. A exceção está em d_{s_1} que tende a permanecer próximo ao valor mínimo de 15 cm, o que é coerente com o modelo de estrutura analisado, que considera a base das colunas rotuladas. As larguras das mesas mantiveram a tendência crescente devido ao aumento do momento fletor.

A grande diferença entre a abordagem de elementos prismáticos e elementos com a altura da alma variada, é que a última permite uma maior flexibilidade de configuração da estrutura, possuindo alturas maiores nas regiões de grandes solicitações internas. Assim, foi possível obter nas regiões de conexão coluna-viga e viga-viga alturas de seções maiores, e na região intermediária das vigas, alturas menores. Essa configuração de pórtico era a mais esperada, visto que se trata de um pórtico com conexões rígidas, mostrando que os resultados são coerentes com o que é apresentado em projetos correntes. A Figura 60 apresenta de forma genérica uma ilustração de uma solução obtida para o P25, onde é possível visualizar os pontos de contenção lateral ao longo das vigas, que formam os trechos destravados de comprimento L_b . Observa-se que os trechos de extremidade da viga (L_{V_1} e L_{V_3}) contam com contenções laterais nas extremidades e em um ponto intermediário.

Figura 60 Modelo de pórtico não prismático obtido nas otimizações



Fonte: Autor (2022)

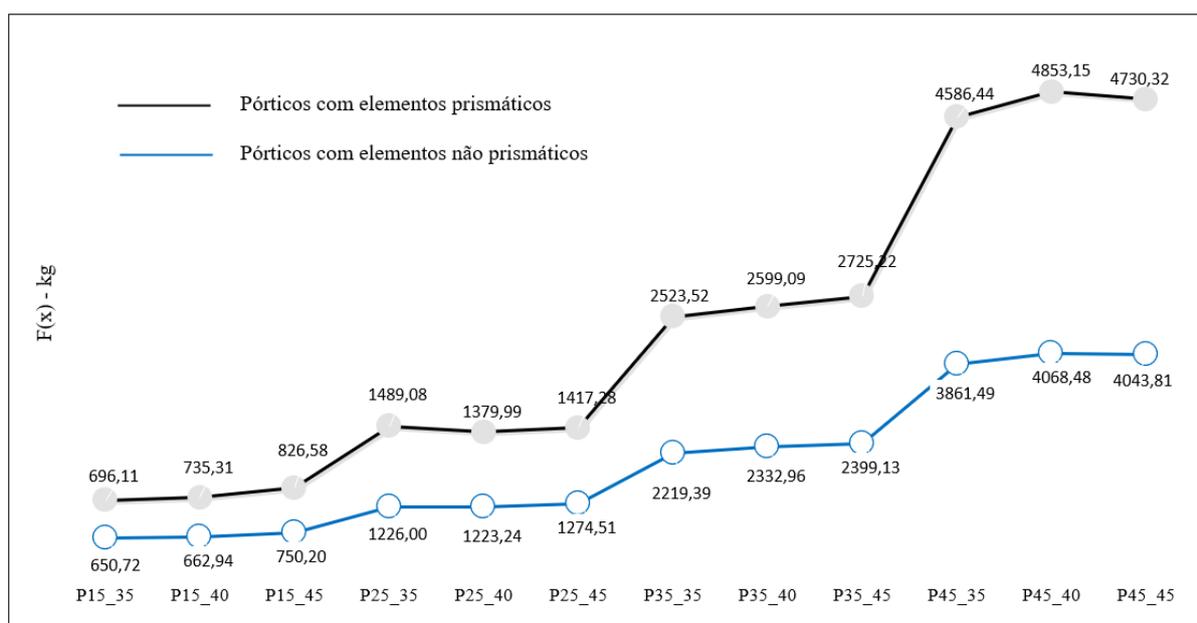
Comparando o valor das variáveis de projeto nas soluções obtidas nos casos com elementos prismáticos (dados na Tabela 22) com esses apresentados na Tabela 28, nota-se que existiu uma redução das espessuras das chapas, com a maioria convergindo para a espessura mínima de 4,75 mm. Isso foi possível pela adoção de critérios de segurança de elementos não-prismáticos que admitem seções de alma esbelta, conforme a restrição g_7 apresentada na Equação (51).

A Figura 61 mostra que a massa total do pórtico cresce com o tamanho do vão. Por outro lado, a velocidade básica do vento não influencia muito a massa total do pórtico, quando comparada com o aumento do comprimento do vão. A economia de material pelo uso de

elementos não-prismáticos é de aproximadamente 70 kg (-10%) para o P15 e de até 700 kg (-14%) para o P45.

Mas, a variação da velocidade do vento não influencia muito na massa total do pórtico, quando comparada com o aumento do comprimento do vão. Mesmo existindo diferenças entre as soluções, a economia pelo uso de elementos não-prismáticos é em média aproximadamente de 70 kg (-10%) de aço para o P15 e de até 700 kg (-14%) para o P45.

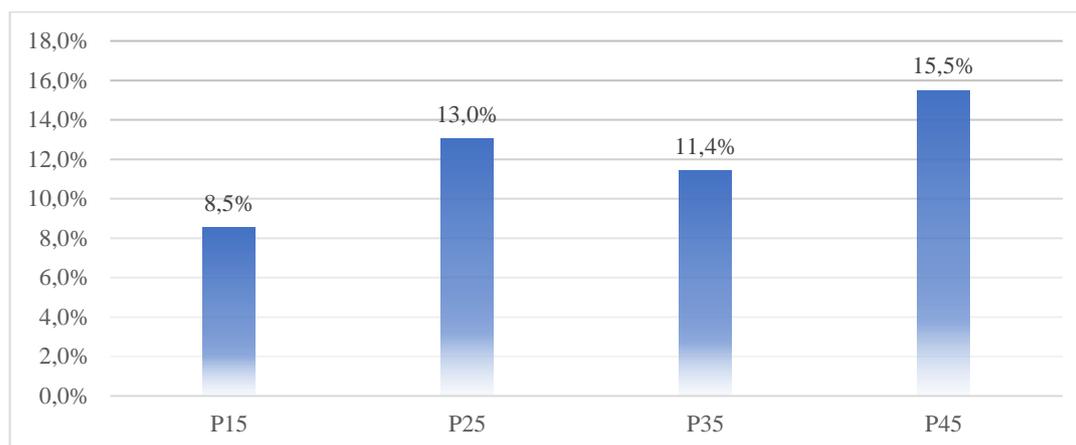
Figura 61 Resultados de $f(x)$ dos pórticos: elementos prismáticos x não-prismáticos



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que apesar da diferença absoluta ser bastante elevada (Figura 61) em termos relativo (Figura 62) as diferenças de economia do aço obtidas para o P15 e P45 são bem menores com uma variação de 8,5% a 15,5%. Uma quebra na tendência se observa na economia obtida para o P35, o que pode indicar a obtenção de uma solução subótima nesse caso.

Figura 62 Economia média do consumo de aço



Fonte: Autor (2022)

Os critérios de segurança e de serviço do projeto de pórticos (g_2 , g_3 e g_4) foram os mais relevantes e são apresentados na Tabela 29. Todas as demais restrições adotadas ao projeto de pórticos de galpões industriais foram atendidas com folga, exceto em alguns casos particulares. A verificação última ao cisalhamento teve sua restrição ativa ($g_1+1 = 1,0$) unicamente no P35_45, o que pode indicar tratar-se de uma solução subótima. A restrição do limite de esbeltez da alma ficou próxima do limite para o P45_40 ($g_7 + 1 = 0,97$), e a restrição do valor mínimo de largura da mesa (g_9) demonstrou-se uma verificação importante para as vigas dos P45.

Tabela 29 Restrições de Projeto dos pórticos com elementos não-prismáticos

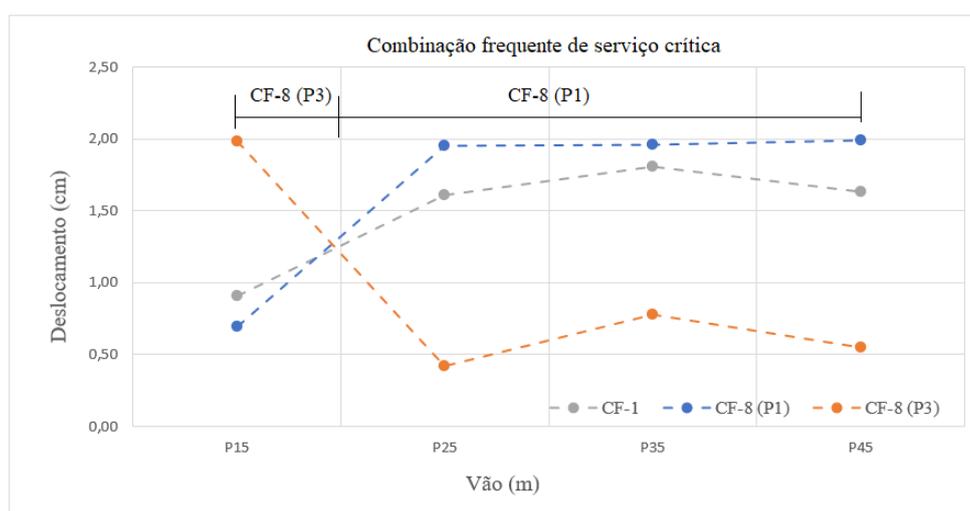
Casos de projeto	COLUNA		VIGA - L_{V_1}		VIGA - L_{V_2}		VIGA - L_{V_3}		d_x (CF-8)	d_z (CF-1)
	CN	$1+g_2$	CN	$1+g_2$	CN	$1+g_2$	CN	$1+g_2$	$1+g_3$	$1+g_4$
P15_35	1	0,96	1	0,91	1	0,69	1	0,88	0,97	0,81
P15_40	11	0,92	11	1,00	11	0,59	1	0,67	0,99	0,88
P15_45	11	0,92	11	0,96	11	0,79	11	0,56	0,99	0,80
P25_35	1	0,98	1	1,00	8	0,6	1	0,69	0,99	1,00
P25_40	1	0,93	1	0,98	11	0,68	11	0,69	0,97	0,94
P25_45	11	1,00	1	0,93	11	0,99	11	0,99	1,00	0,91
P35_35	1	0,94	1	0,99	1	0,44	1	0,53	0,97	0,73
P35_40	1	0,93	1	0,92	11	0,42	1	0,48	0,98	0,76
P35_45	1	0,91	1	0,93	11	0,6	11	0,63	1,00	0,68
P45_35	1	0,94	1	0,95	8	0,33	1	0,4	1,00	0,56
P45_40	1	0,72	1	0,96	11	0,37	11	0,38	1,00	0,55
P45_45	1	0,97	1	0,90	11	0,49	11	0,53	1,00	0,52

Fonte: Autor (2022)

Diferente do observado na seção anterior, os P25 com elementos não-prismáticos P25 também têm a CF-8 como crítica de projeto para o limite do deslocamento lateral (g_3). A Figura 63 apresenta a magnitude dos deslocamentos laterais obtidos para cada um dos pórticos submetido a uma ação do vento com $V_0 = 40$ m/s. É possível observar que ocorre um comportamento similar ao identificado para os pórticos com elementos prismáticos. Entretanto, a variação da altura da alma de acordo com a distribuição dos esforços dos elementos permitiu com que o deslocamento provocado pela CF-8 se mantivesse próximo ao limite de projeto de 2 cm.

As legendas de CF-8 (P1) e CF-8 (P3) referem-se ao deslocamento lateral obtido no beiral da coluna 1 e da coluna 2 (pontos P1 e P3 da Figura 36). Como as cargas gravitacionais são simétricas ao pórtico, a CF-1 possui os mesmos valores de deslocamento lateral para os pontos P1 e P3, mas sentidos opostos. Nota-se que os deslocamentos laterais devidos à CF-1 não foram críticos para qualquer um dos vãos estudados. Isso pode ser explicado pelo aumento da rigidez das vigas que proporciona uma redução dos deslocamentos verticais.

Figura 63 Avaliação dos deslocamentos laterais: barras não prismáticas



Fonte: Autor (2022)

A análise de segunda ordem local ($P - \delta$) com a redução da rigidez do material em 20% foi inserida ao longo de todas as otimizações, conforme procedimento apresentado para as barras prismáticas. As colunas não se demonstraram muito suscetíveis a esse efeito de segunda ordem, apresentando um intervalo de valores de B_1 entre 0,5% e 1,4%. Ao contrário, as vigas do pórtico atingiram valores B_1 de até 16%. Salienta-se que o cálculo de B_1 para as vigas está considerando (a favor da segurança) a carga crítica de flambagem para a menor seção

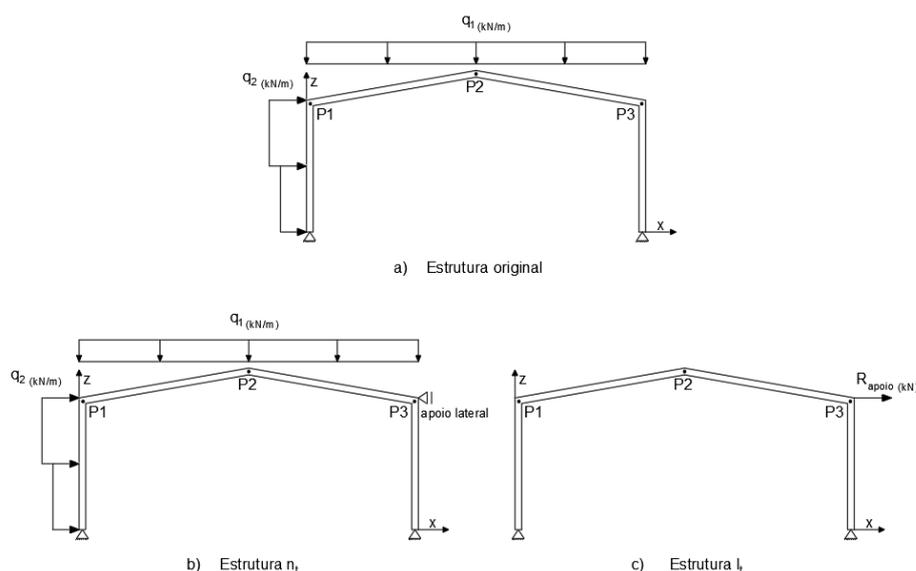
transversal equivalente, conforme explicado na Figura 38. O estudo dos 12 casos de projeto indicou que os efeitos $P - \delta$ são mais relevantes para os pórticos de menor vão e submetidos a uma menor velocidade básica de vento (35 m/s).

5.5 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS GLOBAIS DE SEGUNDA ORDEM

Na presente seção serão apresentados os resultados obtidos para todos os pórticos analisados neste trabalho sobre o aspecto de efeitos de segunda ordem. De acordo com o item 4.9.8 da NBR 8800 (ABNT, 2008) a determinação da resposta para o ELS pode ser feita sem a consideração das imperfeições geométricas iniciais e de material, e por meio de análise elástica linear, se, e somente se, a estrutura não apresentar grandes deslocabilidade.

A seção está organizado de forma a apresentar as análises para os pórticos compostos de barras prismáticas e posteriormente para os pórticos com barras não-prismáticas. Observa-se que nenhum processo de otimização foi realizado, apenas as soluções otimizadas de cada pórtico foram analisadas novamente. Os efeitos de segunda ordem global foram verificados por meio do Método de Amplificação dos Esforços – MAES e análise P-Delta ($P-\Delta$) de carregamento estático disponível no *software* SAP2000, conforme descritos no capítulo 3 do presente trabalho. Em todas as análises manteve-se a redução da rigidez do material em 20%.

Aqui são apresentados os resultados obtidos pelas análises MAES para os 12 casos de dimensionamento estudados neste trabalho. A estrutura recebe no ponto P3 (Figura 64b)) um vínculo de primeira ordem que impede o deslocamento lateral desse ponto. A partir dessa configuração a estrutura é analisada, obtendo a reação desse apoio. Em seguida, o vínculo é retirado (Figura 64c)) e o deslocamento lateral é obtido em uma análise que considera apenas uma força de mesma intensidade, mas sentido oposto à reação obtida no apoio introduzido na análise anterior. Esse processo se repete para cada uma das combinações normais de carregamento último. Observa-se que se trata de análises de primeira ordem. A Figura 64 apresenta um esquema geral desse procedimento.

Figura 64 Divisão da estrutura em duas subestruturas n_t e l_t 

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 30 apresenta os valores da função de restrição g_2 (relativa à segurança à flexocompressão) calculada com solicitações amplificadas pelo coeficiente B_2 definida pelo MAES. Nota-se que apesar do coeficiente B_2 ser único para todo o pórtico, ele possui diferentes valores para cada combinação normal última (CN) aplicada. A Tabela 31 apresenta a razão entre os deslocamentos obtido em análise de segunda ordem (d_{x_2}) e os obtidos em análise de primeira ordem (d_{x_1}), bem como o valor da função de restrição associada à flexocompressão (g_2) calculada com base nas solicitações obtidas na análise de segunda ordem pelo método P- Δ , disponível no *software* SAP2000.

Tabela 30 Amplificação dos esforços pelo coeficiente B_2

Pórtico	COLUNA			VIGA		
	CN	B_2	$1 + g_2$	CN	B_2	$1 + g_2$
P15_35	1	1,0758	0,980	1	1,0758	0,940
P15_40	11	1,0568	0,979	11	1,0568	0,827
P15_45	11	1,0427	0,968	11	1,0427	0,957
P25_35	1	1,0420	0,877	1	1,0420	0,896
P25_40	1	1,0540	0,920	1	1,0540	0,987
P25_45	11	1,0000	0,883	1	1,0523	0,851
P35_35	1	1,0340	0,894	1	1,0340	0,860
P35_40	1	1,0330	1,003	1	1,0330	0,900
P35_45	1	1,0320	0,948	1	1,0320	0,941
P45_35	1	1,0220	0,650	1	1,0220	0,912
P45_40	1	1,0210	0,693	1	1,0210	0,888
P45_45	1	1,0200	0,645	1	1,0200	0,899

Fonte: Autor (2022)

Tabela 31 Barras prismáticas: análise P- Δ

Casos de Projeto	COLUNA			VIGA		
	CN	$\frac{d_{x2}}{d_{x1}}$	$1+g_2$	CN	$\frac{d_{x2}}{d_{x1}}$	$1+g_2$
P15_35	1	1,0220	0,983	1	1,0220	0,943
P15_40	11	0,9510	0,939	11	0,9510	0,793
P15_45	11	0,9500	0,938	11	0,9500	0,893
P25_35	1	1,0180	0,881	1	1,0180	0,902
P25_40	1	1,0238	0,927	1	1,0238	0,995
P25_45	11	0,9530	0,866	1	1,0220	0,856
P35_35	1	1,0240	0,902	1	1,0240	0,868
P35_40	1	1,0240	1,010	1	1,0240	0,911
P35_45	1	1,0234	0,956	1	1,0234	0,950
P45_35	1	1,0228	0,654	1	1,0228	0,921
P45_40	1	1,0220	0,699	1	1,0220	0,864
P45_45	1	1,0215	0,650	1	1,0215	0,875

Fonte: Autor (2022)

De acordo com os resultados obtidos é possível perceber que os valores da restrição g_2 são muito semelhantes entre os dois métodos de avaliação dos efeitos de segunda ordem. De acordo com os valores de B_2 e a razão entre os deslocamentos laterais obtidos na análise de segunda ordem (d_{x2}) e na análise de primeira ordem (d_{x1}), indicam que os pórticos de galpões industriais estudados neste trabalho são classificados como estruturas de pequena deslocabilidade. Observa-se, ainda, que apenas o P35_40 para as duas análises realizadas é que violou a restrição de projeto (g_2) em 0,3% e 1,0% pelo MAES e pela análise P- Δ , respectivamente.

Conforme esperado de acordo com as referências bibliográficas apresentadas na seção 3.4 (Figura 30), os pórticos que possuem combinações de ações críticas que incluem forças de vento e causam esforços normais de tração nos elementos (CF-11) apresentam redução dos deslocamentos e momentos fletores totais quando avaliados sob a análise P- Δ .

As análises dos pórticos com elementos não-prismáticos foram realizadas diretamente pelo procedimento P- Δ disponível no *software* SAP2000 para a solução final de cada configuração de pórtico conforme realizado nos pórticos com elementos prismáticos. A Tabela 32 apresenta os valores da restrição g_2 para cada elemento obtidos na análise de segunda ordem.

Tabela 32 Barras não-prismáticas: análise P- Δ

Casos de Projeto	COLUNA		VIGA – L_{V_1}		VIGA – L_{V_2}		VIGA – L_{V_3}	
	CN	$1+g_2$	CN	$1+g_2$	CN	$1+g_2$	CN	$1+g_2$
P15_35	1	0,971	1	0,920	1	0,700	1	0,887
P15_40	11	0,901	11	0,974	11	0,575	1	0,682
P15_45	11	0,899	11	0,940	11	0,773	11	0,546
P25_35	1	0,994	1	1,018	8	0,596	1	0,706
P25_40	1	0,950	1	0,994	11	0,678	11	0,688
P25_45	11	0,989	1	0,941	11	0,985	11	0,985
P35_35	1	0,957	1	1,004	11	0,443	1	0,536
P35_40	1	0,941	1	0,935	11	0,419	1	0,485
P35_45	1	0,927	1	0,943	11	0,598	11	0,625
P45_35	1	0,951	1	0,963	8	0,330	1	0,403
P45_40	1	0,730	1	0,974	11	0,371	11	0,381
P45_45	1	0,981	1	0,912	11	0,489	11	0,526

Fonte: Autor (2022)

De acordo com os resultados apresentados, a restrição g_2 se manteve dentro de seu limite, com exceção do P35_35 que foi violada em 0,4%. Dessa forma, é constatado que os efeitos globais de segunda ordem não têm influência significativa na avaliação da segurança ou desempenho da estrutura. De acordo com a relação $\frac{d_{x_2}}{d_{x_1}}$ todos os pórticos estudados são classificados como de pequena deslocabilidade, com um valor máximo igual a 1,08 encontrado para o P15_35 na combinação gravitacional CN-1.

A Tabela 33 apresenta o incremento do valor da função de restrição relativa à flexocompressão (g_2) pela inclusão dos efeitos locais e globais de segunda-ordem. Com os valores positivos indicando o aumento dos esforços de flexocompressão e os valores negativos indicando a redução desses esforços, marcados na cor vermelha e verde respectivamente.

Tabela 33 Incremento médio da função de restrição g_2 pela inclusão dos efeitos de 2ª ordem.

CASOS DE PROJETO	BARRAS PRISMÁTICAS		BARRAS NÃO PRISMÁTICAS	
	2ª ordem local	2ª ordem global	2ª ordem local	2ª ordem global
P15_35	1,25%	0,96%	8,30%	1,20%
P15_40	0,00%	-2,38%	1,25%	-1,48%
P15_45	0,00%	-3,68%	0,00%	-2,53%
P25_35	1,31%	1,25%	10,47%	2,31%
P25_40	1,69%	1,64%	3,73%	0,81%
P25_45	0,95%	-0,21%	3,50%	-0,17%
P35_35	1,93%	1,55%	4,95%	1,36%
P35_40	2,02%	1,45%	2,74%	1,35%

CASOS DE PROJETO	BARRAS PRISMÁTICAS		BARRAS NÃO PRISMÁTICAS	
	2ª ordem local	2ª ordem global	2ª ordem local	2ª ordem global
P35_45	1,98%	1,38%	1,71%	0,63%
P45_35	2,07%	1,42%	5,90%	1,57%
P45_40	1,96%	-0,70%	1,88%	0,89%
P45_45	1,94%	-0,85%	1,77%	0,69%

Fonte: Autor (2022)

A partir dos dados apresentados, entende-se que para os casos de dimensionamento de pórticos estudados no presente trabalho os efeitos globais de segunda ordem apresentam baixa relevância nos requisitos de segurança, com valores menores que 2%. Os pórticos em que a verificação crítica ao ELU de projeto produziu esforços internos de tração nos elementos apresentaram redução da restrição g_2 . Essa situação ocorreu mais frequente para os pórticos com elementos prismáticos e velocidade básica do vento igual a 45 m/s. Os efeitos de segunda ordem local destacaram-se como os mais relevantes ao projeto de pórticos de galpão industrial, principalmente para os pórticos com elementos não-prismáticos.

6 CONCLUSÃO

A partir dos estudos e resultados apresentados no presente trabalho, os algoritmos metaheurísticos (GA, PSO e HS) demonstraram capacidade em resolver o problema não-linear de otimização de pórticos rígidos de aço restrito aos critérios de segurança e de serviço. Entre os 3 algoritmos avaliados, destaca-se que o GA não conseguiu obter soluções satisfatórias (quase-ótimas). O PSO foi capaz de determinar as melhores e as piores soluções, apresentando um alto coeficiente de variação da melhor função objetivo. O HS foi o algoritmo menos sensível à alteração do parâmetro de tamanho de memória, e apresentou a maior acurácia de respostas encontrando soluções quase-ótimas, sendo ele selecionado como a melhor opção de algoritmo aplicado à otimização dos pórticos.

De acordo com o comparativo inicial do trabalho entre o modelo 1 e o modelo 2 de pórtico, entende-se que o estado limite à flambagem lateral com torção (FLT) pode ser um limitante da resistência última de projeto das vigas. No entanto, a padronização de comprimentos destravados (L_b) com valores próximos a 2,55 m (que permitem a ocorrência de FLT) não apresentou aumento significativo na massa total do pórtico, quando comparado ao modelo 1.

O aumento do número de iterações do algoritmo melhora a convergência de resultados entre as otimizações independentes e a determinação de soluções quase-ótimas. O emprego de estratégias que permitam reduzir o espaço de busca viável dos valores das variáveis de projeto deve ser evitado, pois apesar de garantir uma convergência da solução mais acelerada, esse procedimento pode descartar soluções ótimas de projeto.

Para os casos de projeto ótimo de pórticos de aço de galpões industriais estudados nesse trabalho, as combinações normais de segurança CN-1 e CN-11, e as combinações frequentes de serviço CF-1 e CF-8 foram as principais responsáveis pela ativação das restrições de projeto, com destaque à restrição da verificação à flexocompressão (g_2) e à restrição de verificação ao deslocamento lateral do pórtico (g_3). Conclui-se que as principais ações na verificação ao ELU dos elementos de coluna e viga são as gravitacionais, enquanto para a verificação ao ELS são as ações do vento, na maioria dos casos. Como caso particular, de acordo com os deslocamentos laterais estudados para as CF-1 e CF-8, um intervalo de vãos de pórticos pode apresentar menor sensibilidade às forças de vento, tornando mais importante a verificação à combinação de serviço das ações gravitacionais (CF-1), como o caso do P25.

A velocidade básica do vento (V_0) não teve impacto significativo na massa total do pórtico quando comparada com o aumento do comprimento do vão ($L_{vão}$). O emprego de chapas mais finas, e conseqüentemente a adoção de perfis mais esbeltos, colabora para a redução do consumo de aço. E a necessidade de alturas e larguras de perfis maiores aumenta gradativamente conforme o aumento do vão. Assim, duas vantagens estão atreladas aos pórticos com elementos não-prismáticos: a flexibilidade da altura das seções conforme os esforços atuantes, e a permissão do uso de seções com alma esbelta conforme os critérios adotados pelo *Design Guide 25* (AISC, 2011). Dessa forma, uma economia média de material entre 8,5% para os P15 e 15,5% para os P45 foi identificada para os elementos não-prismáticos comparados aos elementos prismáticos.

O comparativo entre o Método de Amplificação dos Esforços – MAES e a análise P- Δ realizada no *software* SAP2000 concluiu que, os valores de B_2 calculados são coerentes e tendem a estar a favor da segurança. Quando existe a ocorrência de esforços internos de tração nos elementos, uma redução no momento fletor atuante é identificada pela análise P- Δ , o que não é possível de acontecer pelo método MAES devido ao coeficiente B_2 ter limite mínimo igual a 1,0. Ambas as análises concluíram que os pórticos estudados são classificados como de pequena deslocabilidade, e por isso podem ser analisados com a superposição dos carregamentos, o que torna a análise computacional mais rápida.

Apesar dos efeitos globais de segunda ordem não serem significativos ao projeto ótimo de pórticos, os efeitos de segunda ordem local (P- δ) demonstraram importância na análise dos elementos não-prismáticos, com valores de até 16% de aumento do esforço de momento fletor atuante nas vigas. No entanto, salienta-se que a verificação da carga crítica de flambagem (N_{e_x}) foi avaliada (a favor da segurança) pela menor seção transversal equivalente de cada barra. E um estudo mais avançado da determinação de N_{e_x} para elementos não-prismáticos, poderia permitir uma redução dos efeitos P- δ .

7 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho demonstrou os benefícios da tecnologia aplicada ao projeto de dimensionamento de estruturas. Foi desenvolvido um programa em linguagem Python 3 com integração ao *software* SAP2000 que utiliza algoritmos metaheurísticos tradicionais para o dimensionamento ótimo de pórticos de aço para galpões industriais.

Em primeiro, é notável a qualidade de resultados que os algoritmos conseguem proporcionar ao projeto por meio da função objetivo de redução do consumo de material da estrutura principal. Nesse aspecto, sugere-se a inclusão dos demais componentes estruturais como: terças de cobertura, tirantes e elementos de ligação. As ligações entre os elementos de coluna-viga e coluna-base foram consideradas como vínculos perfeitos, e poderiam ser tratados como ligações semirrígidas.

Sugere-se que para trabalho futuro, sejam consideradas a avaliação da frequência da estrutura e a aplicação de ações dinâmicas. Além das forças horizontais de vento, usualmente galpões industriais possuem ações devido a pontes rolantes, que possuem cargas móveis. Esses efeitos devem ser considerados em projeto.

O presente trabalho limitou-se a uma consideração simplificada da estabilidade à carga crítica de flambagem elástica dos elementos não-prismáticos. Como trabalho futuro, a utilização de métodos mais precisos é recomendável, uma vez que as simplificações aumentam o consumo de material para estar a favor da segurança.

Um ponto crítico encontrado na elaboração do trabalho é o tempo de processamento das análises no *software* SAP2000, que representou mais de 99% do tempo total de otimização da estrutura. Uma das alternativas é desenvolver um programa próprio em mesma linguagem de programação para executar as análises. No entanto, isso demandaria muito esforço e tempo, prejudicando a possibilidade de realizar análises mais complexas das estruturas. Como opção, uma pesquisa de desenvolvimento de um novo algoritmo de otimização, que permitisse um menor número de avaliações da função objetivo para determinação das soluções ótimas.

REFERÊNCIAS

ARORA, J. S. **Introduction to Optimum Design**. Elsevier Inc. 4^o edição, 2017.

ARZANI, H.; KAVEH, A.; KAMALINEJAD, M. **Optimal Design of Pitched Roof Rigid Frames with Non-Prismatic Members Using Quantum Evolutionary Algorithm**. Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 63(2), pp. 593–607, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cargas para cálculo de estruturas de edificações**. NBR 6120. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **Forças devidas ao vento em edificações**. NBR 6123. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. NBR 8800. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BALOGH, T. VIGH, L. G. **Optimal Fire Design of Steel Tapered Portal Frames**. Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 61, 2017.

BELLEI, I. **Edifícios Industriais em aço**. 5^a Edição. São Paulo, Editora Pini, 2006.

BRAUN, E. **Aplicação de métodos de otimização no dimensionamento de vigas de aço**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CHEN, Y.; HU, K. **Optimal design of steel portal frames based on genetic algorithms**. Higher Education Press and Springer-Verlag, 2008. DOI 10.1007/s11709-008-0055-1.

CHENG, YM.; LI, L.; LANSIVAARA, T.; CHI, SC.; SUN, YJ. **An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis**. Eng. Optimiz., 2008.

COMPUTERS & STRUCTURES, INC. **CSI API Documentation**. ETABS, 2018.

COMPUTERS & STRUCTURES, INC. **CSI Analysis Reference Manual**. ETABS, 2022.

DEGERTEKIN, S. O. **Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures**. Science Direct. Computers and Structures, 2012.

- DOBSON, R. **An Overview of P-Delta Analysis**. CSC(UK) Ltd, 2002.
- DOGAN, E.; SAKA, M.P. **Optimum design of unbraced steel frames to LRFD–AISC using particle swarm optimization**. *Advances in Engineering Software* 46, (2012).
- ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence**. An Introduction. University of Pretoria. John Wiley & Sons, Ltd. Second Edition. South Africa, 2007.
- EUROCODE 3: **Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. EN 1993-1-1:2005.
- FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. Editora Pearson, 2017.
- FU, J. Y.; WUA, J. R.; DONGA, C. C.; PI, Y.-L. **Optimization design of large span portal-rigid steel frame with tapered sections under wind-induced drift constraint**. *ScienceDirect. Engineering Structures*, Vol. 194, 2019.
- HAYALIOGLUT, M. S.; SAKA, M. P. **Optimum design of geometrically nonlinear elastic-plastic steel frames with tapered members**. *Computers and Structures*, Vol. 44, 1992.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- KAEHLER, R.; WHITE, D.; KIM, Y. **AISC Steel Design Guide 25 – Frame Design Using Web-Tapered Members**, 2011.
- KAVEH, A.; GHAFARI, M. H. **Geometry and Sizing Optimization of Steel Pitched Roof Frames with Tapered Members Using Nine Metaheuristics**. *Iran J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0132-1>.
- KAVEH, A.; KABIR, M.Z.; BOHLOOL, M. **Optimum design of three-dimensional steel frames with prismatic and non-prismatic elements**. *Engineering with Computers* 36, 2020.
- KAVEH, A.; KAMALINEJAD, M.; ARZANI, H.; BARZINPOUR, F. **New enhanced colliding body optimization algorithm based on a novel strategy for exploration**. *ScienceDirect. Journal of Building Engineering*, Vol. 43, 2021.

KIMURA, A. *Informática Aplicada em Estruturas de Concreto Armado: Cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais*. Editora PINI, 2007.

KRAVANJA, S.; ZULA, T. “**Cost optimizations of industrial steel buildings structures**”. ScienceDirect. *Advances in engineering software*, 2010.

LOPES, A. P.; SANTOS, G. O.; SOUZA, A. L. A. C. **Estudo sobre diferentes métodos de análise P-Delta**. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n-7, p. 9-19, setembro, 2005.

MAHDAVI, M.; FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E. **An improved harmony search algorithm for solving optimization problems**. *Appl. Math. Comput.*, 2007.

MCKINSTRAY, 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, 2015.

MCKINSTRAY, 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, 2016.

MURREN, P.; KHANDELWAL, K. **Design-driven harmony search (DDHS) in steel frame optimization**. *Journal of Engineering Structures* 59, 2014.

OLIVEIRA, P. C. G. P.; FALCÓN, G. A. S. **Dimensionamento ótimo de pórtico de aço considerando ligações semirrígidas e análise não linear geométrica**. Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA). *Revista da Estrutura de Aço (REA)*, 2020.

OZBASARAN, H.; YILMAZ, T. **Shape optimization of tapered I-beams with lateral-torsional buckling, deflection and stress constraints**. ScienceDirect. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 143, 2018.

PEREZ, R. E.; BEHDINAN, K. **Particle swarm approach for structural design optimization**. ScienceDirect, *Computers and Structures* 85 (2007).

PHAN, D. T.; LIM, J. B. P.; TANYIMBOH, T. T.; LAWSON, R. M.; XU, Y.; MARTIN, S.; SHA, W. **Effect of serviceability limits on optimal design of steel portal frames**. *Journal of Constructional Steel Research* 86, 2013.

PRAVIA, Z. M. C.; DREHMER, G. A.; JÚNIOR, E. M. **Galpões para usos gerais**. Instituto Aço Brasil. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.

SALTER, P. R.; MALIK, A. S.; KING, C. M. **Design of Single-Span Steel Portal Frames to BS 5950-1:2000**. SCI Publication P252. The Steel Construction Institute, 2004.

SAKA, M. P. **Optimum design of steel frames with tapered members**. Computers and Structures, Vol. 63, 1997.

SAKA, M. P.; GEEM, Z. W. **Mathematical and Metaheuristic Applications in Design Optimization of Steel Frame Structures: An Extensive Review**. Hindawi Publishing Corporation, 2013.

SILVA, L. J. L. **Aplicação de métodos heurísticos no dimensionamento otimizado de uma estrutura de aço aporticada com perfis de seção variável**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SOLGI, R. M. **geneticalgorithm · PyPI**, 2020.

TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.M. **Theory of Elastic Stability**. McGraw-Hill, New York, NY, pp. 541, 1961.

THE STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE (SCI). **Best Practice in Steel Construction Industrial Buildings Guidance for Architects, Designers and Constructors**. 2008.

YANG, X. S. “**Harmony Search as a Metaheuristic Algorithm**”, in: Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications (Editor Z. W. Geem), Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin, vol. 191, pp. 1-14 (2009).

YANG, X. S. Engineering Optimization. **An Introduction with Metaheuristic Applications**. University of Cambridge. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2010.

APÊNDICE A - VALIDAÇÃO DA VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DOS ELEMENTOS NÃO-PRISMÁTICOS

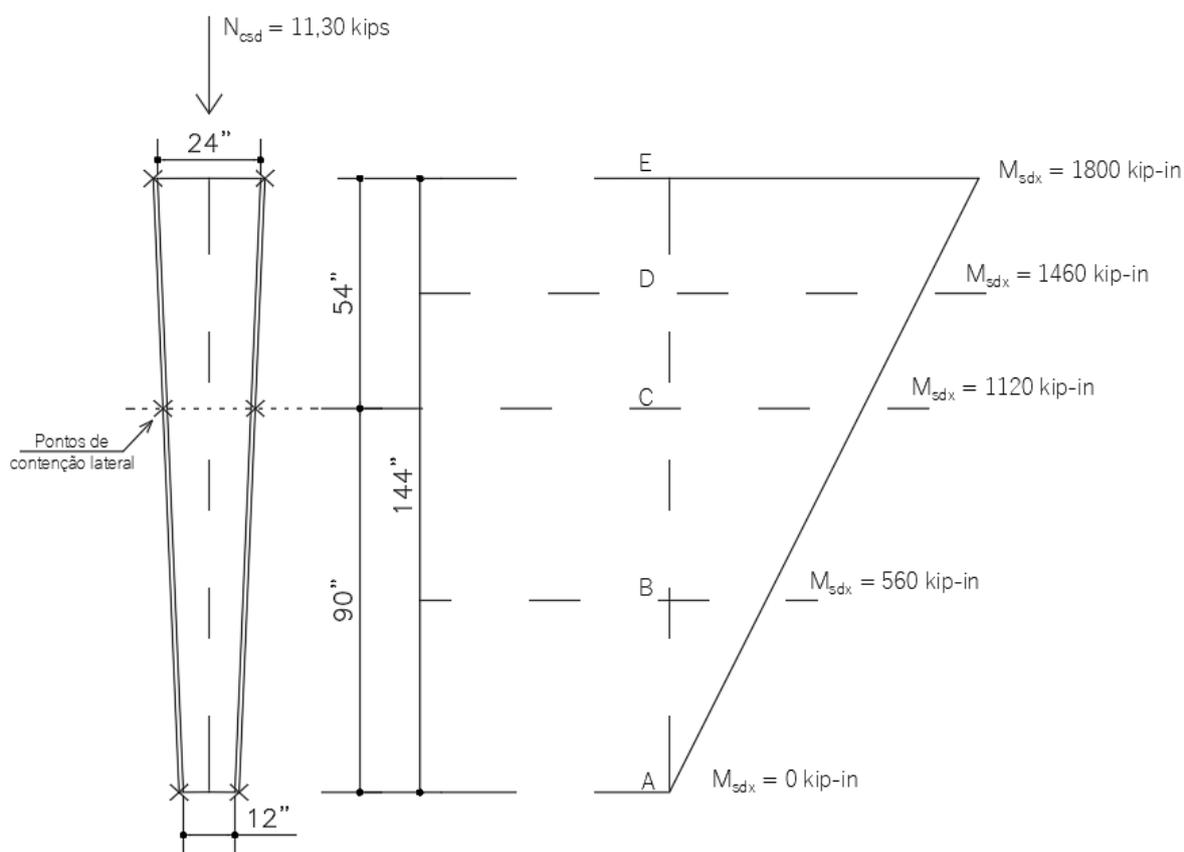
Os critérios de verificação de segurança dos elementos não-prismáticos adotados neste trabalho estão em acordo com as recomendações e procedimentos de cálculo estipulados pelo *Design Guide 25* (AISC, 2011), conforme seção 2.3.2 deste documento. O código escrito em linguagem Python 3 para a determinação da capacidade resistente à compressão, flexão e cisalhamento, e o cálculo das respectivas propriedades geométricas de cada seção analisada é de autoria de Silva (2021).

O *Design Guide 25* (AISC, 2011) fornece exemplos de verificação de elementos com a altura da alma variando ao longo do comprimento. Esses exemplos foram replicados com o objetivo de validar o código escrito e reduzir eventuais erros na base de dados de entrada e saída devido a adequação do código ao programa desenvolvido neste trabalho.

A seguir é apresentada na Figura 65 o exemplo de uma barra não-prismática com a altura da alma variada ao longo do comprimento, baseada nos exemplos 5.2 e 5.3 do *Design Guide 25* (AISC, 2011), que tratam de uma barra axialmente comprimida e submetida a flexão simples, respectivamente. N_{csd} é o esforço normal de compressão de cálculo sobre o elemento, M_{sd_x} é o momento fletor de cálculo atuante na barra sobre o eixo de maior momento de inércia. Por se tratar de um manual americano, as medidas se encontram em polegadas (in) para as dimensões, quilo libra (kips) para a força e quilo libra polegada (kip-in) para o momento fletor.

O elemento analisado pode ser considerado como um elemento de coluna, que possui sua base rotulada e está recebendo um momento fletor e uma reação normal de uma viga no topo. Observa-se que tanto a base como o topo do elemento são travados, enquanto ao longo de seu comprimento recebe uma contenção lateral em ambas as mesas do perfil. As propriedades do elemento são: aço com resistência ao escoamento (f_y) igual a 55 ksi, módulo de Young igual a 29000 ksi, comprimentos de flambagem $L_x = 144''$ e $L_y = \{90'', 54''\}$. Já as dimensões do perfil são: $d_{base} = 12,5 \text{ in}$, $d_{topo} = 24,5 \text{ in}$, $t_w = 0,125 \text{ in}$, $b_f = 6 \text{ in}$ e $t_f = 0,25 \text{ in}$.

Figura 65 Exemplo de barra submetida ao esforço normal de compressão e a flexão simples



Fonte: Adaptado do *Design Guide 25* (AISC, 2011)

Onde *ksi* é quilo libra por polegada quadrada. L_x e L_y são, respectivamente, os comprimentos de flambagem da barra na direção de maior e menor momento de inércia. O coeficiente de ajuste de comprimento de flambagem (K) foi tomado igual a 1,0.

Tabela 34 Validação dos resultados à compressão e flexão simples

Critérios avaliados	Design Guide 25 (AISC, 2011)			Autor (2022)		
	$L_x = 144''$	$L_y = 90''$	$L_y = 54''$	$L_x = 144''$	$L_y = 90''$	$L_y = 54''$
Ne	3990	318	883	3970,782	318,111	883,737
$\frac{N_{csd}}{N_{crd}}$	0,0747	0,0903	0,0795	0,07483	0,09028	0,07945
FLT: $\frac{M_{sd_x}}{M_{rd_{FLT}}}$	-	0,629	0,816	-	0,6266	0,8168
FLM: $\frac{M_{sd_x}}{M_{rd_{FLM}}}$	Base	-	0	-	0	0,7347
	Meio	-	0,458	0,854	-	0,4579
	Topo	-	0,736	0,957	-	0,7347

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela 34 entende-se como N_{crd} a resistência de cálculo a compressão. Como “Base, Meio e Topo” a região no trecho destravado em que foi realizada a verificação, considerando a seção transversal do perfil e o momento fletor atuante nesse ponto. Observa-se que os resultados obtidos são muito próximos dos resultados apresentados pelo *Design Guide 25* (AISC, 2011), as pequenas diferenças encontradas são devido a alguns arredondamentos ao longo do processo de cálculo realizado pelo *Design Guide 25* (AISC, 2011). A combinação dos esforços de compressão e flexão simples são verificadas, no presente trabalho, adotando o pior resultado da verificação de compressão e flexão para cada trecho, e assim, a pior combinação entre eles.

A verificação quanto a resistência ao corte dos elementos não-prismáticos é apresentada de acordo com o exemplo 5.5 do *Design Guide 25* (AISC, 2011). Trata-se da avaliação do trecho C-D-E com comprimento igual a 54” do elemento apresentado na Figura 65. A Tabela 35 apresenta os resultados de resistência ao corte, em kips, sem enrijecedor de alma do exemplo.

Tabela 35 Validação da resistência ao corte: exemplo 5.5 do *Design Guide 25* (AISC, 2011)

Ponto avaliado	<i>Design Guide 25</i> (AISC, 2011)	Autor (2022)
C	13,1 kips	13,18 kips
D	Não avaliado	11,25 kips
E	9,81 kips	9,82 kips

Fonte: Autor (2022)