

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ESCOLA DE ENGENHARIA**

LEONARDO JOSÉ LOPES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS HEURÍSTICOS NO DIMENSIONAMENTO
OTIMIZADO DE UMA ESTRUTURA DE AÇO APORTICADA
COM PERFIS DE SEÇÃO VARIÁVEL**

Porto Alegre

Maio de 2021

LEONARDO JOSÉ LOPES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS HEURÍSTICOS NO DIMENSIONAMENTO
OTIMIZADO DE UMA ESTRUTURA DE AÇO APORTICADA
COM PERFIS DE SEÇÃO VARIÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Felipe Schaedler de Almeida

Porto Alegre

Maio de 2021

LEONARDO JOSÉ LOPES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS HEURÍSTICOS NO DIMENSIONAMENTO
OTIMIZADO DE UMA ESTRUTURA DE AÇO APORTICADA
COM PERFIS DE SEÇÃO VARIÁVEL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2021

Prof. Felipe Schaedler de Almeida

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Enio Carlos Mesacasa Júnior (UFRGS)

Dr. pela Universidade de São Paulo, USP

Prof. Felipe Schaedler de Almeida (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

Prof. Herbert Martins Gomes (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais José e Celia pela criação, carinho e todos os valores e ensinamentos transmitidos ao longo das etapas da minha vida. Obrigado por sempre torcerem por mim e estarem ao meu lado.

Agradeço à minha irmã Lisiane pelo convívio, carinho e pelo apoio excepcional em muitas decisões e etapas importantes da minha vida.

Agradeço ao professor Felipe Schaedler de Almeida pela orientação deste trabalho, pela paciência em esclarecer todas as dúvidas e por todos os conhecimentos transmitidos durante as discussões ao longo desta trajetória.

Agradeço ao Eng. Matheus Henrique Sabadin, amigo e colega de trabalho, pelo companheirismo e todos os ensinamentos e discussões sobre a área de engenharia de estruturas.

Agradeço a todos os amigos da faculdade pelo companheirismo, por tornar a experiência da faculdade mais tranquila e menos estressante e pela motivação a continuar me dedicando para chegar ao fim desta jornada.

Agradeço a todos que não foram mencionados, mas que auxiliaram de alguma forma na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho trata da formulação e estudo de um problema de otimização da estrutura metálica de um dos pórticos principais de um galpão industrial. O pórtico é formado por perfis I soldados com inércia variável e com geometria definida de forma parametrizada. Desse modo, todos os carregamentos são dependentes de algumas variáveis que se relacionam à geometria do galpão e pórtico, permitindo, assim, maior flexibilidade de análise. São descritos todos os elementos necessários para a formulação do problema de otimização. As dimensões das seções transversais de extremidade dos pilares e vigas do pórtico foram tomadas como variáveis de projeto de caráter contínuo. A função objetivo reflete o volume total de aço utilizado na construção do pórtico, que deve ser minimizada no processo de otimização. Foram consideradas restrições associadas aos critérios de segurança e desempenho da estrutura, estabelecidos pelas normas ABNT NBR8800, NBR6123, NBR6120 e pelo manual técnico AISC 25. A solução do problema de otimização foi obtida através do algoritmo heurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO). Para o desenvolvimento do estudo, foram elaboradas funções na linguagem de programação Python para o cálculo das funções de restrição e da função objetivo. Essas funções integram-se a um módulo preexistente do algoritmo PSO e ao programa de análise estrutural SAP2000. Realizaram-se dois estudos de otimização, nos quais se buscou o pórtico mais leve que atendesse às restrições impostas. Além disso, estudou-se a influência dos parâmetros referentes ao tamanho da população inicial (*swarmsize*) e ao número máximo de iterações (*maxiter*) do método PSO sobre a qualidade das soluções obtidas. Para vãos entre pilares de 20 m, encontraram-se pórticos com 1,56t limitados, principalmente, pela deformação na cumeeira e pelas solicitações de flexo-compressão.

Palavras-chave: estrutura metálica, otimização, Particle Swarm Optimization, seção variável.

ABSTRACT

This work deals with the formulation and study of a structural optimization problem involving the structure of one of the portal frames of an industrial building. The frame uses web-tapered members and its structural analysis is constructed in a parameterized way. Therefore, all loads are dependent on variables that relate to the geometry of the building and frames, thus allowing greater analysis flexibility. Continuous design variables were adopted for the thickness and depth of the steel plates of the frame beams and columns. The objective function is the volume of steel used to build the frame, which must be minimized in the optimization process. Constraints associated with the structure's safety and performance criteria, established by the ABNT NBR8800, NBR6123, NBR6120 standards and the AISC 25 specification, were considered. The solution of the optimization problem was obtained using the Particle Swarm Optimization (PSO) heuristic algorithm. To develop the study, functions were elaborated in the Python programming language to calculate the constraints and objective function. These functions integrate with a pre-existing module of the PSO algorithm and the structural analysis program SAP2000. Two optimization studies were carried out, in which the lightest frame that met the imposed restrictions was sought. In addition, the quality of the solutions was evaluated through the study of the influence of parameters referring to the size of the initial population (swarmsize) and the maximum number of iterations (maxiter) of the PSO method. For 20m spans between columns, frames with 1.56 tonnes were found, mainly limited due to deflection limits and the combined flexural and compression stresses.

Keywords: Structural optimization, web-tapered section, Particle Swarm Optimization, steel frame.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria do galpão industrial – Vista superior	17
Figura 2 - Pórtico principal do galpão	18
Figura 3 - Intervalos recomendados para o uso de seções com inércia variável	18
Figura 4 – Sistema de contraventamento das vigas de cobertura	19
Figura 5 – Sistema de contraventamento dos pilares	20
Figura 6 – Exemplo de locação do pórtico de interesse em um galpão com 5 pórticos.	21
Figura 7 – Modelo de aplicação da carga dos elementos do telhado	23
Figura 8 - Cotas para cálculo do fator S2	24
Figura 9 - Distribuição de pressão externa nas paredes - Vento 0°	25
Figura 10 – Distribuição de pressões internas com $C_{pi} = -0,3$	26
Figura 11 - Seções de interesse para cálculo das pressões externas	26
Figura 12 - Seções de cálculo para pressões externas - Vento 0°.....	27
Figura 13 - Modelo de aplicação das cargas do vento - Vento 0°	27
Figura 14 - Distribuição de pressão externa nas paredes - Vento 90°	29
Figura 15 - Seção de cálculo para pressões externas – Vento 90°.....	30
Figura 16 - Modelo de aplicação das cargas do vento - Vento 90°	30
Figura 17 - Casos I e II associados ao vento incidente à 0°.....	31
Figura 18 - Casos III e IV associados ao vento incidente à 90°	31
Figura 19 – Modelo de aplicação da sobrecarga na cobertura	33
Figura 20 - Fluxograma simplificado do funcionamento do PSO.....	40
Figura 21 - Método PSO – Enxame inicial com 30 partículas	40
Figura 22 - Localização das seções de interesse para a otimização	41
Figura 23 - Variáveis de projeto – Seções dos pilares e vigas	42
Figura 24 - Seções transversais para cálculo das restrições de resistência.....	44
Figura 25 - Identificação dos nós do pórtico	49
Figura 26 - Ângulo de inclinação de elementos com seção variável.....	51
Figura 27 - Fluxograma de funcionamento da otimização	53
Figura 28 - Comparativo entre eixos de um pilar ideal e um pilar real.....	54
Figura 29 - Configuração indeformada com pilares de eixo vertical	55
Figura 30 - Configuração indeformada com pilares com eixos inclinados	55
Figura 31 - Geometria do galpão industrial.....	57

Figura 32 - Geometria dos pórticos principais	58
Figura 33 - Coeficientes de pressão das hipóteses I e III de vento.....	59
Figura 34 - Carregamentos atuantes sobre o pórtico	60
Figura 35 - Resultado das otimizações - Combinação de parâmetros.....	61
Figura 36 - Otimizações para 2000 e 500 avaliações máximas.....	63
Figura 37 - Pórtico otimizado.....	64
Figura 38 - Deslocamento máximo no nó 3 no caso 8 do ELS (cm).....	65
Figura 39 - Configuração deformada no caso 3 de ELU – Análise linear (cm)	66
Figura 40 - Configuração deformada no caso 3 de ELU – Análise não-linear (cm).....	66
Figura 41 - Diagrama de momento fletor - Caso 5 do ELU (kN.cm).....	67
Figura 42 - Diagrama de esforço normal - Caso 5 do ELU (kN)	67
Figura 43 – Vista frontal – Geometria do pórtico principal	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de ponderação das cargas permanentes	34
Tabela 2 - Coeficientes de ponderação das cargas variáveis.....	34
Tabela 3 - Combinações de carga.....	35
Tabela 4 - Diferenças percentuais nas solicitações	56
Tabela 5 - Propriedades do aço	58
Tabela 6 - Limites superiores e inferiores das variáveis de projeto	58
Tabela 7 - Pressões dinâmicas nas cotas Z_1 e Z_2	59
Tabela 8 – Parâmetros estatísticos – Comparação entre combinações.....	62
Tabela 9 - Parâmetros estatísticos – Comparação entre o número de avaliações.....	63
Tabela 10 - Variáveis de projeto na solução ótima	64
Tabela 11 - Valores das restrições na solução ótima.....	68
Tabela 12 - Resultados das otimizações - Estudo de variação de N_p	70
Tabela 13 - Estudo de variação de N_p	70
Tabela 14 - Variáveis de projeto - Estudo de variação de N_p	70

LISTA DE SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FLA	Flambagem Local da Alma
FLM	Flambagem Local da Mesa
FLT	Flambagem Lateral com Torção
NBR	Norma Brasileira
PSO	Particle Swarm Optimization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. DIRETRIZES DO TRABALHO	14
2.1 Objetivo Principal	14
2.2 Objetivo Secundário	14
2.3 Delimitações	14
2.4 Delineamento	15
3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	16
3.1 Geometria da Estrutura	16
3.2 Carregamentos	21
3.2.1 Carregamentos Permanentes	22
3.2.2 Carregamentos Variáveis	23
3.3 Combinações de Carga	34
4. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	36
4.1 Elementos para Formulação de Problemas de Otimização.....	37
4.1.1 Variáveis de Projeto	37
4.1.2 Função Objetivo	38
4.1.3 Restrições	38
4.2 Método de Otimização Particle Swarm (PSO)	38
4.3 Formulação do Problema de Otimização Estrutural	41
4.3.1 Variáveis de Projeto	41
4.3.2 Função Objetivo	42
4.3.3 Restrições	43
4.4 Integração com Software de Análise Estrutural.....	53
5. APLICAÇÕES	57
5.1 Exemplo de Aplicação - Problema de Validação	57
5.1.1 Estudo dos Parâmetros Swarmsize e Maxiter	60
5.1.2 Solução Ótima.....	64
5.2 Exemplo de Aplicação – Variação do Número de Pórticos.....	69
6. CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a agilidade, qualidade e economia são os principais pilares que regem o mercado de trabalho da engenharia de estruturas. Dentro deste meio, os engenheiros estruturais são constantemente sujeitos a estreitos prazos de entrega e à exigências no dimensionamento de estruturas mais leves, o que caracteriza o principal desafio dentro desta área. O cálculo estrutural é, usualmente, auxiliado por softwares, que permitem agilizar o processo de dimensionamento. Apesar disso, é comum observar boa parte do tempo de um projeto estrutural ser investido na otimização da estrutura. No entanto, essa atividade, normalmente, exige novo cálculo e modelagem da estrutura, o que pode demandar uma quantidade significativa de tempo.

À luz desse pensamento, o uso de métodos de otimização no âmbito da engenharia de estruturas pode servir como uma ferramenta poderosa, uma vez que existem muitos problemas com grande repetição e de fácil parametrização, como, por exemplo, a estrutura de edifícios populares e a construção de torres para transmissão de energia elétrica, que, geralmente, são estruturas que se estendem por centenas de quilômetros e estão sujeitas a carregamentos extremamente similares.

Este trabalho buscou construir um problema de otimização com respeito ao dimensionamento da estrutura de um dos pórticos principais de um galpão industrial. É proposta uma metodologia para parametrizar todos os carregamentos e características geométricas necessários para a análise estrutural do pórtico e formular um problema de otimização, identificando as variáveis de projeto, função objetivo e restrições pertinentes.

A otimização de estruturas aporricadas de aço é um objeto de estudo recorrente. SHA (2015) realizou otimizações voltadas para pórticos com grandes vãos formados por vigas metálicas soldadas. LIM (2013) avaliou os efeitos das limitações de serviço no dimensionamento otimizado de pórticos metálicos. A escolha desse tipo de estrutura se deve ao fato de que ela apresenta elevada flexibilidade em sua concepção, o que gera grande possibilidade de economia em seu dimensionamento.

Quanto ao método de otimização, utilizou-se o método PSO que é considerado um método moderno de otimização, inspirado no comportamento de cardume de peixes, bandos de pássaros ou enxames de insetos. PEREZ (2007) aplicou o método PSO na resolução de problemas de otimização de estruturas treliçadas e apontou que, por sua simplicidade de implementação juntamente com a baixa necessidade de ajuste de parâmetros, o método é ideal para atividades de otimização estrutural. Essas características motivaram a escolha do PSO como método de solução do problema estudado nesse trabalho.

A elaboração do algoritmo para a solução do problema de otimização, nesse trabalho, é feita a partir do desenvolvimento de rotinas em linguagem Python, que se integram ao algoritmo PSO no módulo Pyswarm, e acessam funcionalidades do software de análise estrutural SAP2000. Este tipo de integração não é algo recorrente dentro do cotidiano de um engenheiro estrutural, mas pode ser uma ferramenta de grande versatilidade, conforme pretende-se ressaltar nesse trabalho.

2. DIRETRIZES DO TRABALHO

2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é formular um problema de otimização parametrizado relacionado ao dimensionamento da estrutura de um dos pórticos principais de um galpão industrial, no qual busca-se a configuração dos elementos estruturais que resulte no menor peso da estrutura, respeitando os critérios construtivos, de segurança e desempenho adequados.

2.2 Objetivo Secundário

De forma secundária, um dos desafios e objetivos desse trabalho envolve o desenvolvimento de rotinas em Python que permitem o uso da biblioteca Pyswarm, na qual encontra-se o algoritmo do método PSO, e que acessam o software SAP2000, de forma automática, para a análise da estrutura. Além disso, deseja-se salientar a rapidez e flexibilidade que ferramentas ou processos de otimização podem trazer quando integrados a projetos estruturais, possibilitando a análise paramétrica da estrutura e a busca por soluções econômicas.

2.3 Delimitações

Este trabalho está delimitado ao estudo de otimização da estrutura de apenas um dos pórticos principais de um galpão industrial. Logo, questões como a estabilidade global do galpão, dimensionamento das ligações, detalhamento e dimensionamento das estruturas auxiliares não estão compreendidos no escopo deste trabalho.

2.4 Delineamento

O trabalho está organizado de acordo com as etapas a seguir:

- 1) Apresentação da estrutura e carregamentos;
- 2) Caracterização do problema de otimização;
- 3) Integração entre software de análise estrutural e algoritmo de otimização;
- 4) Aplicações;
- 5) Conclusões e considerações finais.

A primeira etapa é tratada na seção 3 desse trabalho e consiste na caracterização da estrutura a ser analisada, assim como de todos os carregamentos e parâmetros relevantes para parametrizar a análise estrutural da mesma. A segunda e terceira etapas estão descritas na seção 4 e tratam da formulação do problema de otimização da estrutura proposta na seção 3. São tratados aspectos do problema de otimização como: função objetivo, variáveis de projeto, restrições, assim como a integração feita entre o software de análise estrutural e o algoritmo de otimização. A quarta etapa é exposta na seção 5 e mostra exemplos de aplicação da metodologia de otimização, detalhada na seção 4, a problemas com diferentes configurações geométricas de galpões industriais. Além disso, são apresentados estudos dos parâmetros *swarmsize* e *maxiter* referentes, respectivamente, ao tamanho da população inicial e ao número máximo de iterações do algoritmo PSO para avaliação do desempenho do método em qualidade e confiabilidade/robustez da solução. Por fim, apresentam-se as conclusões e discussões finais do trabalho.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este tópico traz a descrição de elementos importantes para a definição da estrutura de interesse e dos carregamentos atuantes sobre a mesma, os quais são necessários para construção do problema de análise estrutural e otimização desse trabalho.

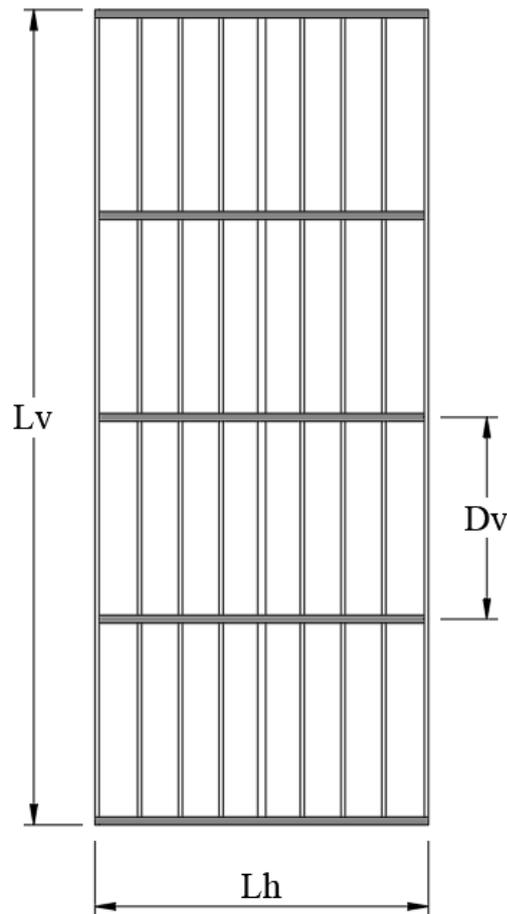
A seção 3.1 trata da definição da geometria da estrutura, a qual é feita de forma parametrizada, pois permite aplicar a metodologia de otimização, que será desenvolvida na seção 4, para qualquer configuração do galpão que seja definida por um caso particular das variáveis paramétricas detalhadas nesta seção. Destaca-se que essa parametrização influencia diretamente no cálculo dos carregamentos atuantes sobre a estrutura, conforme será exposto na seção 3.2.

3.1 Geometria da Estrutura

A estrutura de estudo trata-se de um galpão industrial de um pavimento. A cobertura é formada por um telhado de duas meias-águas e o tapamento lateral é composto por alvenaria e chapas zincadas. Para simplificar a configuração geométrica do galpão, não se considerou a existência de estruturas de apoio para pontes rolantes como vigas de rolamento e consoles, além de detalhes construtivos como aberturas nas laterais e na cumeeira para ventilação natural do galpão, apesar do reconhecimento de que estes aspectos são comuns nesse tipo de estrutura.

A Figura 1 apresenta a configuração básica do galpão, na qual os elementos longitudinais retratam as terças de cobertura e os elementos transversais, hachurados em cinza, representam os pórticos principais de suporte do galpão. As dimensões L_v , L_h e D_v representam, respectivamente, os comprimentos vertical e horizontal, em planta, do galpão e a distância entre o eixo dos pórticos principais de suporte do mesmo.

Figura 1 - Geometria do galpão industrial – Vista superior

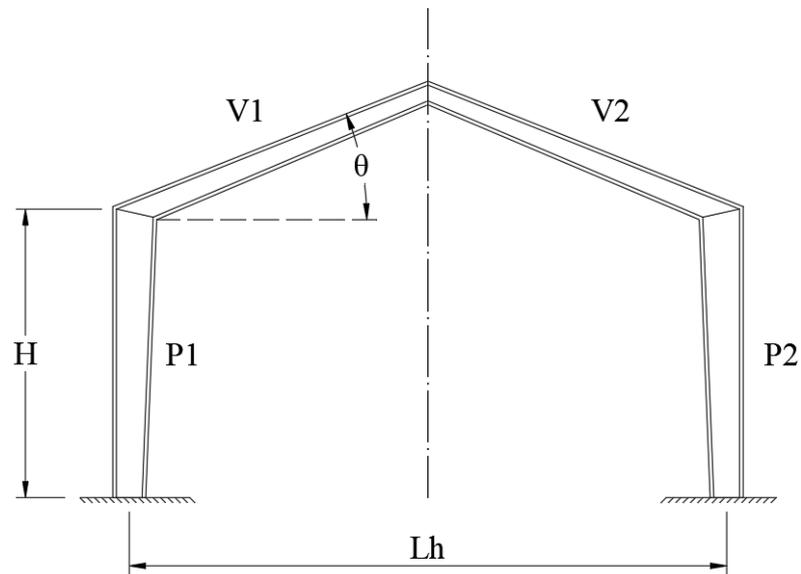


Fonte: Elaborado pelo autor

A estrutura de suporte principal do galpão é formada por pórticos de aço, compostos por vigas e pilares com seção I soldada de alma cheia com altura variável. Vale destacar que as espessuras da alma e mesas, bem como a largura das mesas dos perfis, foram mantidas constantes ao longo de um mesmo elemento (pilar ou viga), ou seja, a única dimensão que torna a seção variável é a altura total da mesma.

Para facilitar o entendimento dos próximos itens, a Figura 2 apresenta a geometria dos pórticos principais, na qual o ângulo θ e a dimensão H representam, respectivamente, o ângulo de inclinação do telhado do galpão e a altura total dos pilares do pórtico e, além disso, mostra a denominação dos pilares (P1 e P2) e das vigas (V1 e V2) que os constituem.

Figura 2 - Pórtico principal do galpão



Fonte: Elaborado pelo autor

O emprego de perfis de altura variável visa maximizar a eficiência no uso dos materiais, pois permite a adequação das características da seção de acordo com os esforços solicitantes que ocorrem em cada região.

Além disso, conforme BELLEI (1988), esse tipo de perfil resulta em configurações estruturais mais eficientes, principalmente quando se trata de galpões com pórticos principais com grande distanciamento e grandes vãos horizontais. A Figura 3 apresenta os intervalos de vãos horizontais e espaçamentos entre pórticos recomendados para o uso de perfis com seção variável.

Figura 3 - Intervalos recomendados para o uso de seções com inércia variável

Vão		Espaçamento entre pórticos		
Pequeno:	até 15 m	3	a	5
Médio:	16 a 25 m	4	a	7
	26 a 35 m	6	a	8
Longo:	36 a 45 m	8	a	10
Inércia variável:	46 a 60 m	9	a	12

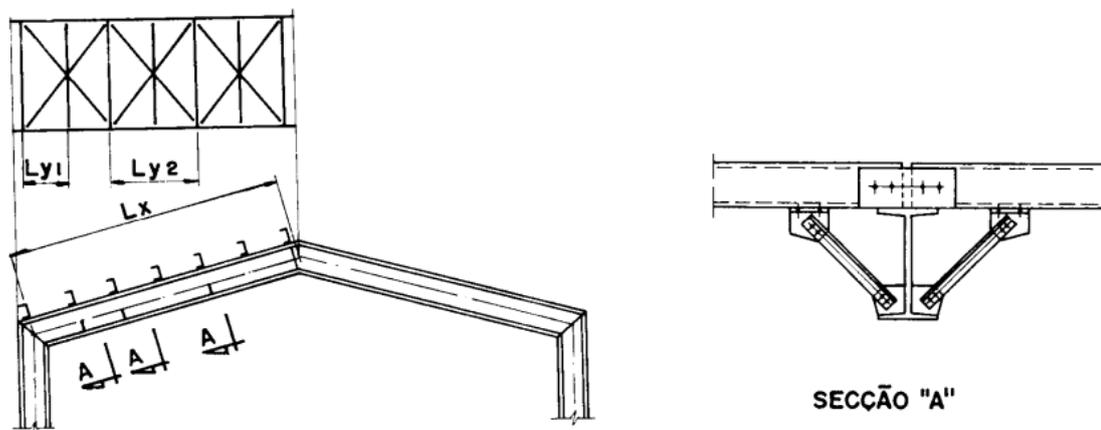
Fonte: Edifícios Industriais em Aço (BELLEI, 1988)

De acordo com BELLEI (1998), bases de pilar rotuladas resultam em fundações mais econômicas e podem ser empregadas em qualquer tipo de terreno, especialmente em locais de solo ruim, já as bases engastadas promovem economia quanto à estrutura dos pórticos, mas têm fundações mais caras que as rotuladas. Em vista disso, para fins deste trabalho, optou-se pela utilização de bases engastadas para os pilares com o intuito de obter o menor consumo de aço para constituir os pórticos principais da estrutura, apesar do reconhecimento de que isso implica em um maior consumo de material para confeccionar as fundações. Ademais, as ligações entre vigas, assim como entre vigas e pilares, foram consideradas rígidas.

BELLEI (1998) também ressalta que a configuração dos contraventamentos da estrutura é fundamental para se ter um dimensionamento econômico. O contraventamento das vigas de cobertura pode ser feito pelas próprias terças ou através da utilização de mãos francesas em pontos estratégicos. A Figura 4 ilustra um exemplo do sistema de contraventamentos discutido. A ilustração, no lado esquerdo, mostra o contraventamento no plano da cobertura do galpão, já a imagem no lado direito apresenta um detalhe de uma mão francesa feita entre a viga e uma das terças de cobertura.

Nesse trabalho, admite-se a existência de pelo menos três pontos contraventados através do uso de mãos francesas ao longo do comprimento da viga. Essa característica tem impacto direto na estabilidade da viga quanto à flambagem lateral com torção, em decorrência da redução do comprimento destravado lateralmente da mesma.

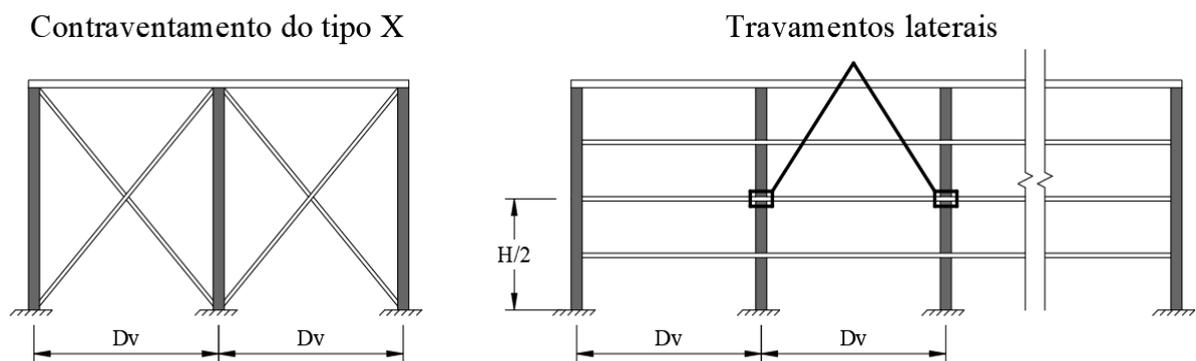
Figura 4 – Sistema de contraventamento das vigas de cobertura



Fonte: Edifícios Industriais em Aço (BELLEI, 1988)

Considerou-se que os pilares possuem contraventamento do tipo “X” no plano perpendicular ao plano dos pórticos principais. Ademais, partiu-se premissa que existe pelo menos um travamento lateral, localizado na metade do comprimento do pilar, em uma das vigas de tapamento lateral do galpão, assim, reduzindo o comprimento destravado do mesmo pela metade. O sistema de contraventamento dos pilares do pórtico é apresentado pelas ilustrações da Figura 5.

Figura 5 – Sistema de contraventamento dos pilares



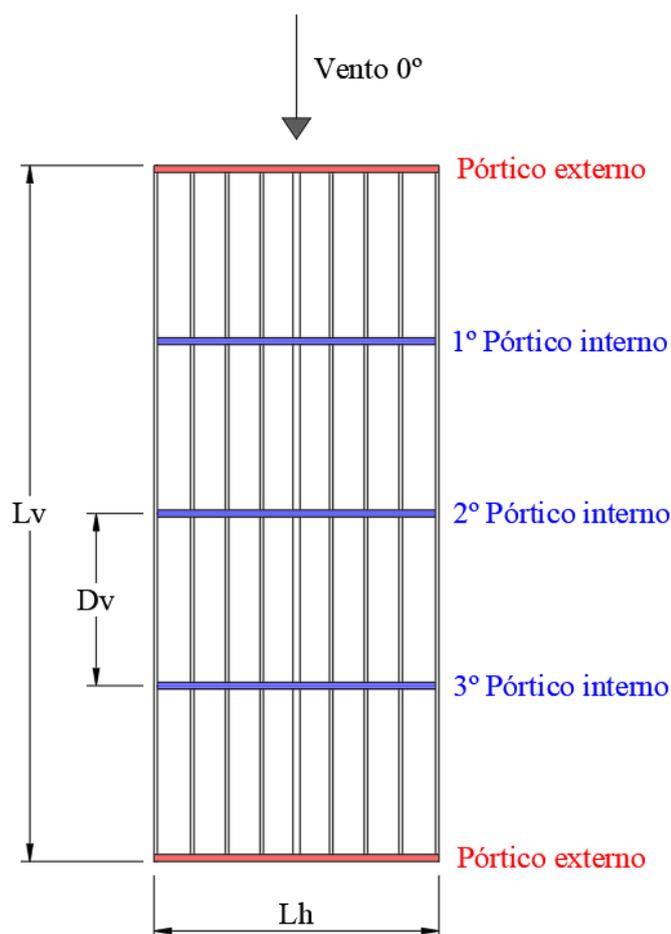
Fonte: Elaborado pelo autor

É importante ressaltar que é possível considerar travamento lateral dos pilares em todas as vigas de tapamento lateral, porém isso requer grande atenção quanto à forma de ligação entre esses elementos. Logo, nesse trabalho, julgaram-se adequados os travamentos laterais indicados na Figura 5.

3.2 Carregamentos

Esta seção traz uma descrição do tratamento realizado para calcular cada um dos carregamentos atuantes sobre a estrutura do pórtico de interesse. O estudo terá foco no pórtico mais carregado da estrutura que, no caso desse trabalho, é o primeiro pórtico interno do galpão, a partir da face de incidência do vento à 0° , cuja localização é mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Exemplo de locação do pórtico de interesse em um galpão com 5 pórticos



Fonte: Elaborado pelo autor

Para realizar estudos de otimização parametrizados sobre a estrutura, definiu-se os carregamentos atuantes e as resistências dos elementos em função das seguintes variáveis: comprimento vertical total, em planta, do galpão L_v , vão horizontal formado entre os pilares dos pórticos principais L_h , distância entre dois pórticos principais consecutivos D_v , número de pórticos considerados para o suporte do galpão N_p , altura total dos pilares do pórtico H e o

ângulo de inclinação do telhado θ . Vale ressaltar que essas não são as variáveis de projeto escolhidas para o problema de otimização, as quais serão discutidas na seção 4, mas sim variáveis paramétricas que permitem analisar soluções otimizadas para diferentes configurações geométricas do galpão industrial.

De maneira geral, os carregamentos pertinentes para a estrutura do pórtico escolhido para estudo podem ser divididos em duas categorias: carregamentos permanentes e carregamentos variáveis.

3.2.1 Carregamentos Permanentes

a) Peso próprio da estrutura

O carregamento oriundo do peso próprio dos elementos do pórtico é caracterizado por uma carga distribuída com intensidade dada pela multiplicação da área da seção transversal pelo peso específico do aço, que é de 77 kN/m^3 . Vale destacar que, no caso da estrutura desse trabalho, essa carga altera-se de acordo com a variação de altura da seção transversal e que a mesma é calculada e aplicada pelo próprio software de análise estrutural utilizado.

b) Peso dos elementos do telhado

Admite-se que o telhado do galpão é composto por chapas de alumínio trapezoidais de espessura 8 mm suportadas por uma estrutura de terças metálicas. A partir das recomendações presentes na Tabela 6 da ABNT NBR 6120:2019, esta configuração resulta em uma carga distribuída de $0,30 \text{ kN/m}^2$.

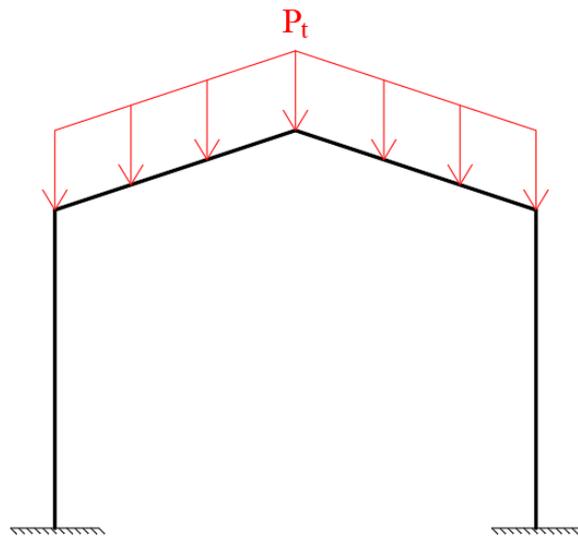
A ação do peso próprio dos elementos que compõem a cobertura será considerada de forma simplificada por meio de uma carga distribuída, com intensidade constante, dada pelo produto da intensidade da carga superficial pelo comprimento de influência do pórtico, dado pela dimensão D_v , ilustrada na Figura 1. Com isso, a definição da carga é independente do número de terças, simplificando a elaboração automatizada do modelo estrutural. Além disso, ressalta-

se que esse carregamento pode ser modificado, sem grande dificuldade, para adaptar-se à metodologia construída, permitindo, assim, o estudo de configurações alternativas de telhado.

A equação (1) e a Figura 7 caracterizam a ação do peso dos elementos do telhado sobre o pórtico de estudo.

$$P_t = D_v \times 0,30 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

Figura 7 – Modelo de aplicação da carga dos elementos do telhado



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Carregamentos Variáveis

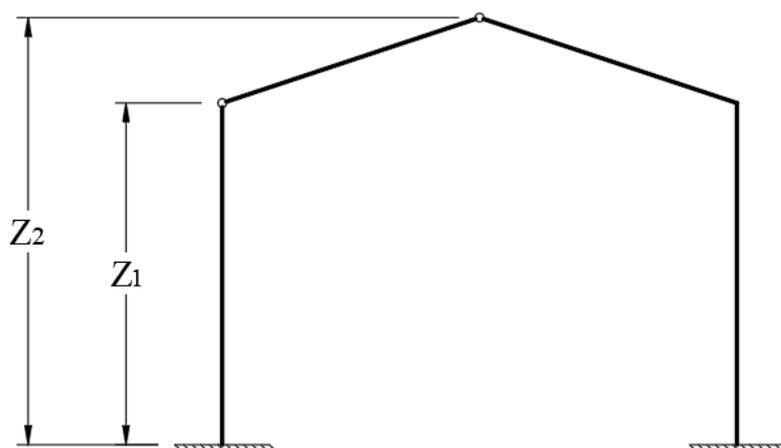
a) Carga do vento

A determinação dos carregamentos oriundos do vento seguiu as prescrições da ABNT NBR 6123:1988. Para o cálculo da velocidade característica do vento V_k considerou-se o galpão localizado em uma região pouco acidentada, com obstáculos pequenos e com baixo fator de ocupação. Isso permite definir os fatores S_1 e S_3 como 1,0 e 0,95, respectivamente. Além disso, para a situação apresentada, é possível definir a categoria de rugosidade do terreno como III.

É importante destacar que não é possível classificar previamente o galpão dentro das classes A, B e C, apresentadas no item 5.3.2 da ABNT NBR 6123:1988, pois as dimensões verticais e horizontais, em planta, do mesmo podem variar. Dessa forma, os parâmetros meteorológicos b , p e F_r presentes na Tabela 1 da ABNT NBR 6123:1988 utilizados para o cálculo do fator S_2 , também apresentam comportamento variável. Ademais, optou-se por manter a velocidade básica do vento V_o como uma variável paramétrica do problema.

Fez-se o cálculo do fator S_2 e, por consequência, das pressões dinâmicas q_1 e q_2 , atuantes sobre o pórtico para 2 cotas da estrutura: uma localizada no topo dos pilares (Z_1) e outra na cumeeira (Z_2), as quais são ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Cotas para cálculo do fator S_2



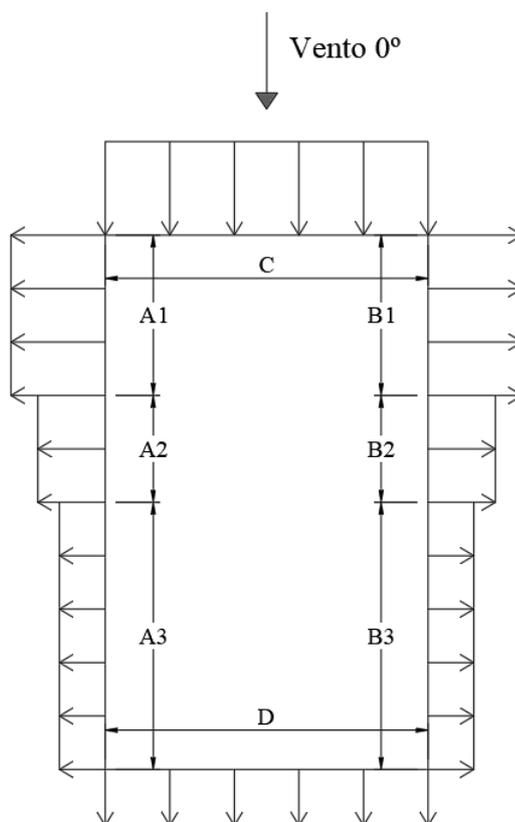
Fonte: Elaborado pelo autor

Esta configuração pode resultar na superestimação das cargas do vento para pórticos mais altos. No entanto, a mesma sempre se encontra a favor da segurança. Logo, decidiu-se mantê-la por questões de facilidade de automatização. A carga de vento foi calculada para as orientações 0° e 90° , conforme detalhado nos itens seguintes.

a.1) Vento incidente à 0°

A distribuição típica de pressões externas nas paredes de uma edificação com planta retangular para um vento com ângulo de incidência de 0° é mostrada na Figura 9.

Figura 9 - Distribuição de pressão externa nas paredes - Vento 0°



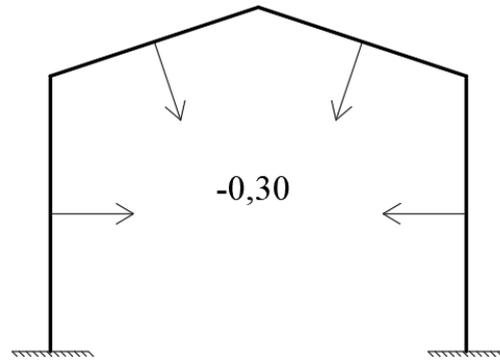
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6123

Os comprimentos A1, A2, A3, B1, B2, B3, C e D são definidos pela ABNT NBR 6123:1988 e caracterizam regiões com a mesma pressão externa. Para a distribuição de pressões externas atuantes sobre as paredes e sobre o telhado do galpão utilizou-se os procedimentos indicados na tabela 4 e 5 da ABNT NBR 6123:1988, respectivamente. Destaca-se o fato de que os coeficientes de pressão externa das paredes e telhado são dependentes da relação entre as dimensões em planta do galpão, logo podem variar de acordo com a mesma.

A partir da consideração de um galpão com 4 faces igualmente permeáveis, adotam-se coeficientes de pressão interna (C_{pi}) de 0 e -0,3 para o cálculo do coeficiente de pressão

resultante sobre cada um dos elementos da estrutura. A Figura 10 ilustra uma distribuição de pressões internas com coeficiente de pressão de $-0,3$.

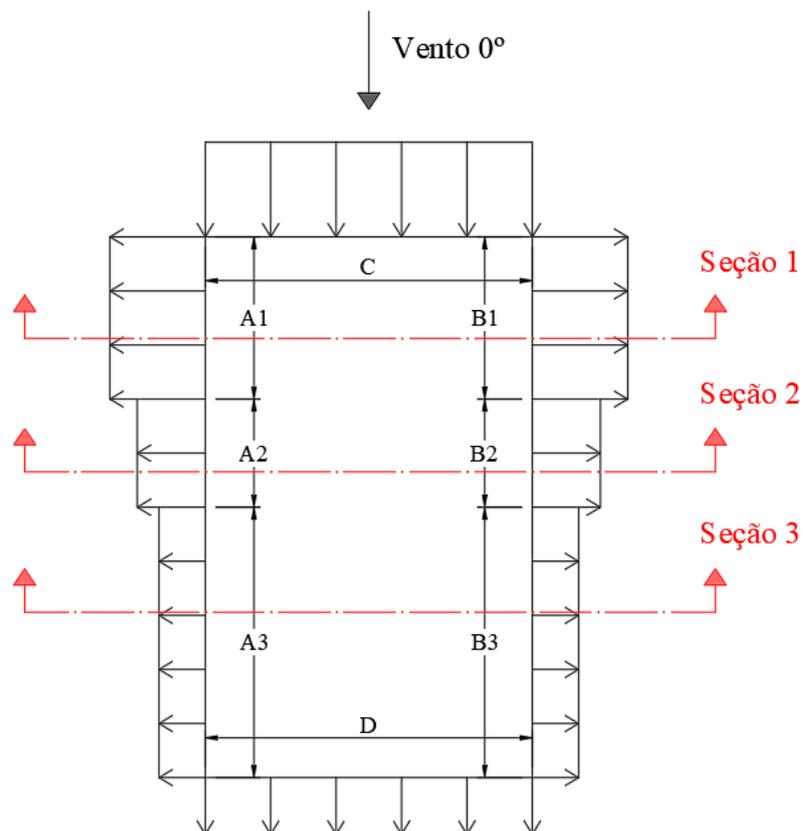
Figura 10 – Distribuição de pressões internas com $C_{pi} = -0,3$



Fonte: Elaborado pelo autor

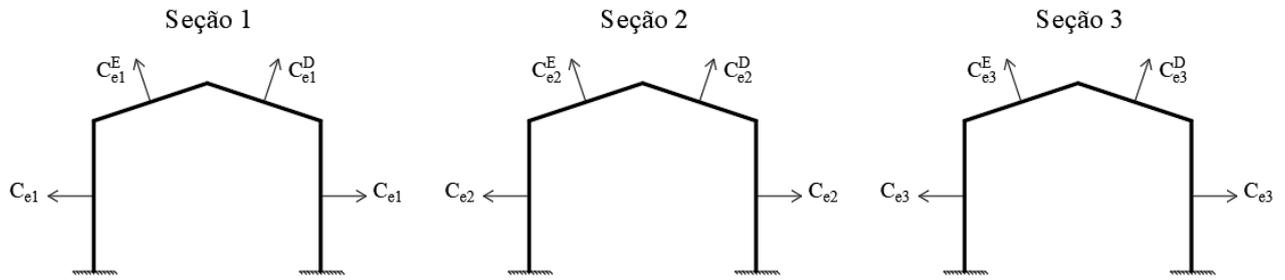
A Figura 11, assim como a Figura 12, ilustram as seções de cálculo utilizadas para obter a carga de vento sobre o pórtico de estudo.

Figura 11 - Seções de interesse para cálculo das pressões externas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 12 - Seções de cálculo para pressões externas - Vento 0°

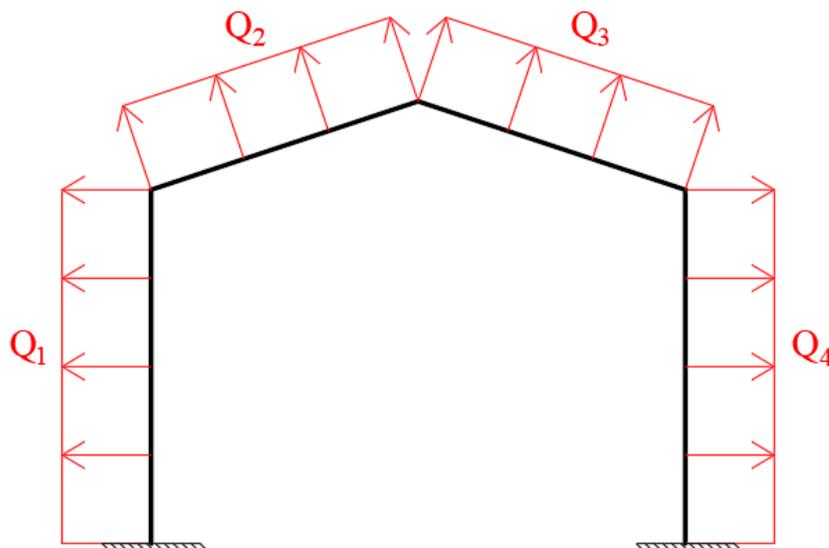


Fonte: Elaborado pelo autor

Onde C_e é o coeficiente de pressão externa atuante sobre as paredes e C_e^E e C_e^D são os coeficientes de pressão externa atuantes sobre os lados esquerdo e direito do telhado do galpão, respectivamente.

Dividiu-se o carregamento gerado pelo vento incidente à 0° em quatro cargas distribuídas, Q_1 a Q_4 , atuantes sobre cada um dos elementos do pórtico (P1, V1, V2 e P2, respectivamente) ilustradas na Figura 13.

Figura 13 - Modelo de aplicação das cargas do vento - Vento 0°



Fonte: Elaborado pelo autor

O cálculo de cada uma das cargas da Figura 13 é dado por:

$$Q_1 = q_1 \times \sum_{i=1}^3 \Delta P_{i,P1} \times \Delta D_i \quad (2)$$

$$Q_2 = q_2 \times \sum_{i=1}^3 \Delta P_{i,V1} \times \Delta D_i \quad (3)$$

$$Q_3 = q_2 \times \sum_{i=1}^3 \Delta P_{i,V2} \times \Delta D_i \quad (4)$$

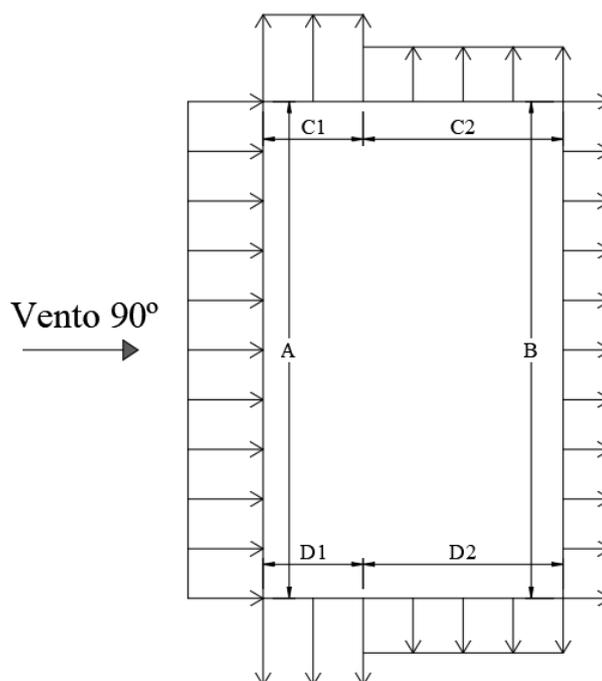
$$Q_4 = q_1 \times \sum_{i=1}^3 \Delta P_{i,P2} \times \Delta D_i \quad (5)$$

onde ΔP representa a pressão resultante, diferença entre a pressão externa e interna, que atua sobre o elemento de interesse (P1, P2, V1 ou V2), ΔD é o comprimento de influência do pórtico dentro das dimensões A1, A2, A3, B1, B2 e B3, apresentadas na Figura 11, que definem os limites de cada uma das seções de cálculo e i representa a seção de cálculo considerada. Destaca-se que, de acordo com o número de pórticos considerados para suporte do galpão (N_p) o comprimento de influência do pórtico de estudo pode abranger apenas 1 seção de cálculo, logo, nesse caso, os comprimentos ΔD das outras seções são tomados com o valor nulo.

a.2) Vento incidente à 90°

A distribuição típica de pressões externas para um vento com ângulo de incidência de 90° sobre o galpão é mostrado na Figura 14.

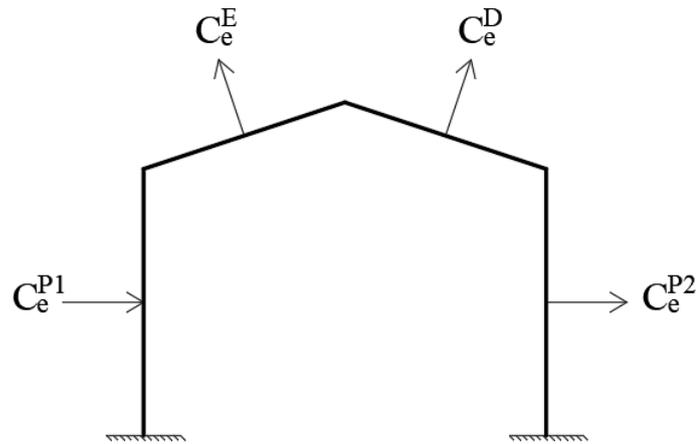
Figura 14 - Distribuição de pressão externa nas paredes - Vento 90°



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6123

As dimensões A, B, C1, C2, D1 e D2 são definidas pela ABNT NBR 6123:1988 e caracterizam regiões de mesma pressão externa. A determinação da carga de vento para este caso segue as mesmas premissas e procedimentos descritos no item anterior, apenas diferenciando-se no fato de que não há necessidade de definir três seções de cálculo, mas apenas uma, mostrada na Figura 15, pois a distribuição de pressões é constante ao longo do comprimento L_v do galpão.

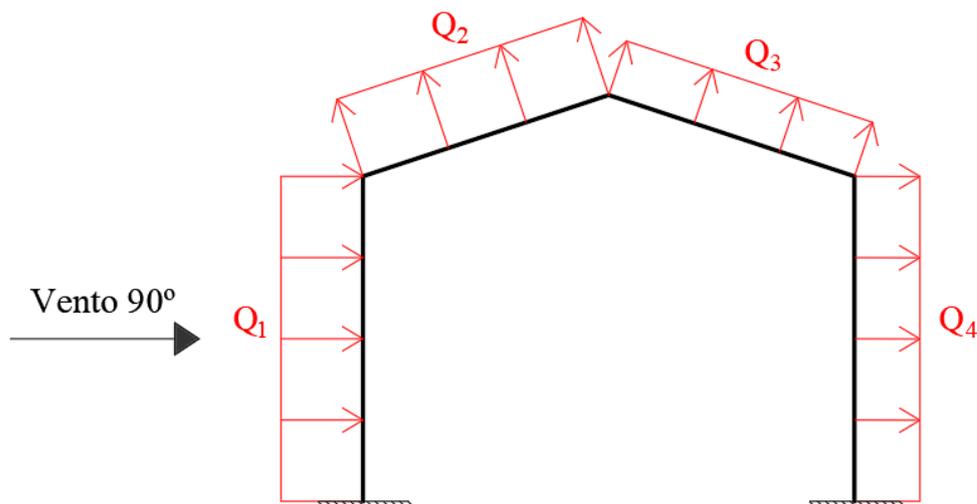
Figura 15 - Seção de cálculo para pressões externas – Vento 90°



Fonte: Elaborado pelo autor

Onde C_e^{P1} e C_e^{P2} são os coeficientes de pressão externa que atuam sobre os pilares P1 e P2, respectivamente. A divisão dos carregamentos de vento em 4 cargas distribuídas também foi realizada para esse caso, seu modelo de aplicação é ilustrado na Figura 16 e seu cálculo é dado pelas equações (2), (3), (4) e (5) considerando somente i igual a 1, pois existe apenas uma seção de cálculo.

Figura 16 - Modelo de aplicação das cargas do vento - Vento 90°



Fonte: Elaborado pelo autor

a.3) Considerações finais sobre a carga de vento

A abordagem descrita nos itens anteriores gera 4 hipóteses de carregamento de vento, as quais estão expostas abaixo e na Figura 17 e Figura 18:

- I. Vento incidente à 0° com $C_{pi} = 0$;
- II. Vento incidente à 0° com $C_{pi} = -0,30$;
- III. Vento incidente à 90° com $C_{pi} = 0$;
- IV. Vento incidente à 90° com $C_{pi} = -0,30$;

Figura 17 - Casos I e II associados ao vento incidente à 0°

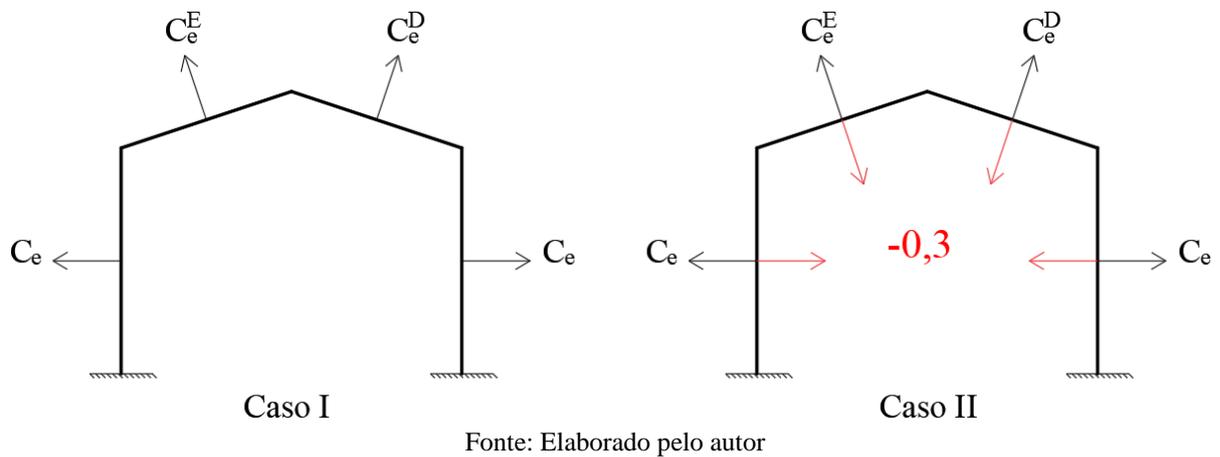
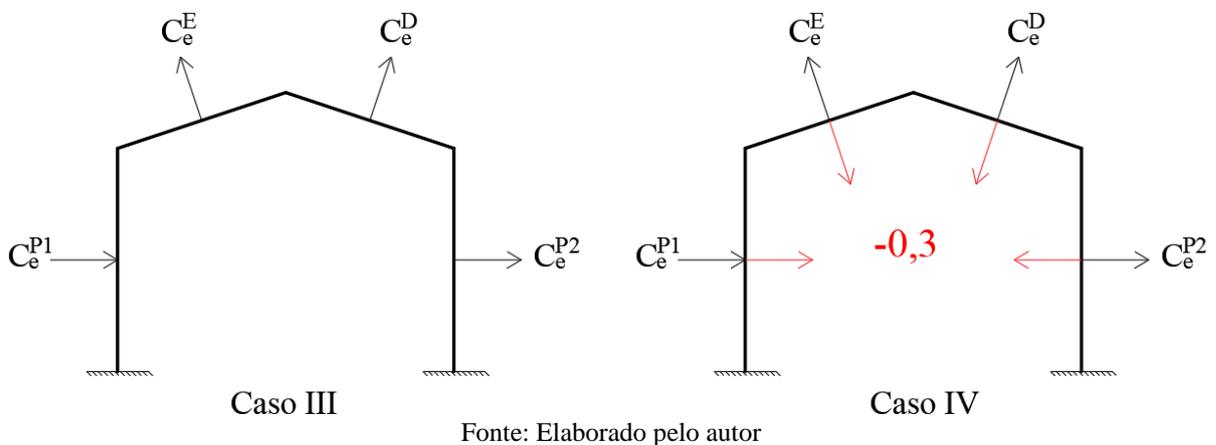


Figura 18 - Casos III e IV associados ao vento incidente à 90°



Ao observar as figuras 17 e 18, percebe-se que, nas hipóteses II e IV, a pressão interna tende a aliviar a sucção do vento sobre os elementos do pórtico. Logo, como forma de simplificar o processo de otimização, decidiu-se considerar apenas as hipóteses I e III como possibilidades de carregamento de vento, de forma que se espera que as combinações II e IV não sejam críticas para o dimensionamento do pórtico.

b) Sobrecarga na cobertura

A carga acidental aplicada sobre a cobertura foi calculada de acordo com o item 6.4 da ABNT NBR 6120:2019. Vale destacar que a metodologia apresentada neste item torna essa carga dependente da inclinação da cobertura. Logo, ela pode apresentar variações de acordo com o valor do parâmetro θ . A carga distribuída (q_{cob}) atuante sobre a cobertura do galpão é calculada pelas expressões a seguir:

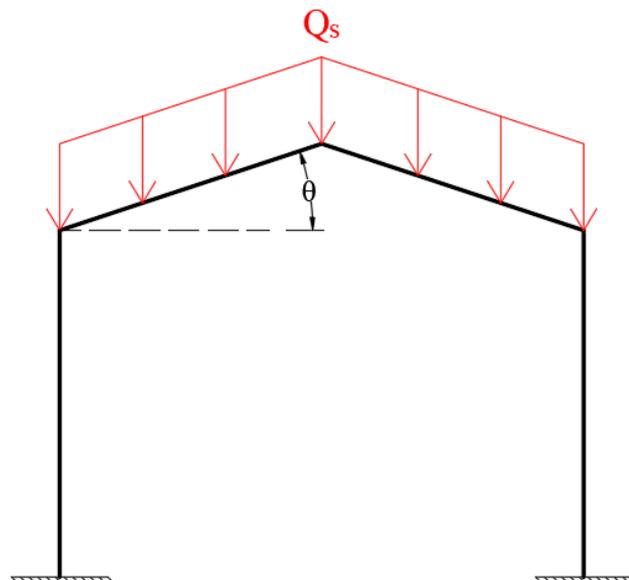
$$q_{cob} = \beta \times 0,50 \text{ kN/m}^2 \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} 1,0 & 1\% < i \leq 2\% \\ 2,0 - 0,5 \times i & 2\% < i < 3\% \\ 0,5 & i \geq 3\% \end{cases} \quad (7)$$

onde i é a inclinação da cobertura, expressa em porcentagem, dada pela tangente de θ . A carga distribuída sobre as vigas do pórtico (Q_s) é ilustrada na Figura 19 e calculada por:

$$Q_s = q_{cob} \times D_v \quad (8)$$

Figura 19 – Modelo de aplicação da sobrecarga na cobertura



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Combinações de Carga

Conforme as recomendações da ABNT NBR 8800:2008 uma estrutura deve ser verificada quanto aos estados-limites últimos (ELU), os quais estão relacionados com a segurança da estrutura e aos estados-limites de serviço (ELS), os quais refletem o desempenho da estrutura sob condições normais de uso.

Nesse trabalho são consideradas combinações últimas normais para avaliação do ELU e combinações frequentes de serviço para avaliação do ELS, conforme os itens 4.7.7.2.1 e 4.7.7.3.3 da ABNT NBR 8800:2008, respectivamente. Os valores dos coeficientes de ponderação utilizados para as combinações feitas são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 - Coeficientes de ponderação das cargas permanentes

Coeficientes de ponderação - Cargas permanentes	
Carga	γ_g
Peso próprio da estrutura	1,25
Peso da estrutura do telhado	1,50

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 - Coeficientes de ponderação das cargas variáveis

Coeficientes de Ponderação - Cargas Variáveis				
Carga	γ_f	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Vento	1,40	0,60	0,30	0
Sobrecarga	1,50	0,50	0,40	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor

Nos casos de avaliação do ELU foram realizadas combinações considerando as cargas permanentes desfavoráveis e favoráveis. Nestas, considerou-se apenas o vento como carga variável para avaliar os efeitos de sucção sobre os elementos da estrutura. Naquelas, foram consideradas combinações com o vento atuando como carga variável principal e a sobrecarga na cobertura como carga variável secundária, bem como combinações nas quais a sobrecarga atuou de forma principal e o vento de maneira secundária.

Nas combinações para avaliação do ELS seguiu-se a mesma lógica aplicada para o ELU, porém as cargas permanentes foram consideradas sem majoração em todas as combinações. Diante do

exposto nesse item e das informações contidas nas tabelas 1 e 2, a Tabela 3 apresenta as combinações de carregamentos utilizadas.

Tabela 3 - Combinações de carga

Combinações de Carregamentos – Coeficientes						
Tipo	Combinação	Ações permanentes		Ações variáveis		
		Peso próprio	Peso do telhado	Vento 0º	Vento 90	Sobrecarga na cobertura
ELU	1	1,25	1,50	0,84	-	1,50
	2	1,25	1,50	1,40	-	0,75
	3	1,25	1,50	-	0,84	1,50
	4	1,25	1,50	-	1,40	0,75
	5	1,25	1,50	-	-	1,50
	6	1,00	1,00	1,40	-	-
	7	1,00	1,00	-	1,40	-
ELS	8	1,00	1,00	-	-	0,40
	9	1,00	1,00	0,30	-	0,30
	10	1,00	1,00	-	0,30	0,30
	11	1,00	1,00	0,30	-	-
	12	1,00	1,00	-	0,30	-

Fonte: Elaborado pelo autor

4. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

De acordo com RAO (2009), o aumento da exigência por baixos custos de produção para garantir competitividade global fez com que engenheiros buscassem métodos rigorosos de tomada de decisões, como métodos de otimização, para projetar e produzir produtos e sistemas de forma econômica e eficiente. Métodos de otimização, juntamente com ferramentas modernas de projeto auxiliadas por computador, estão sendo utilizados para intensificar o processo de criação de sistemas de engenharia bem detalhados.

O uso de métodos de otimização no âmbito da engenharia é uma ferramenta de grande relevância, pois o projeto de estruturas otimizadas não só beneficia o processo produtivo de empresas, como também auxilia na redução dos insumos utilizados para a concepção de estruturas, ou seja, a otimização caminha junto com o conceito de sustentabilidade quando se trata de engenharia de estruturas.

A resolução e implementação de métodos de otimização requerem o uso de ferramentas computacionais e conhecimentos avançados de cálculo integral e diferencial. Contudo, na atualidade, existem diversos softwares de análise estrutural que já possuem ferramentas de otimização integradas, como, por exemplo, o Robot Structural Analysis, Cypecad, Eberick e Scia Engineer.

No entanto, muitas dessas ferramentas são limitadas à otimização de partes específicas da estrutura ou até mesmo de apenas um elemento dela. Além disso, não permitem personalizar todas as condições de contorno do problema. Visto isso, faz-se necessário o conhecimento da metodologia de implementação de problemas de otimização.

4.1 Elementos para Formulação de Problemas de Otimização

Esta seção traz a descrição de cada elemento necessário para formar um problema de otimização sob o formato padrão:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } f(\vec{x}) \\ & \text{tal que } g_i(\vec{x}) \leq 0, \quad \text{para } i = 1, \dots, n_g \end{aligned} \quad (9)$$

onde \vec{x} é um vetor composto por todas as variáveis de projeto consideradas para o problema de otimização em questão, $f(\vec{x})$ é a função objetivo, $g_i(\vec{x})$ representa a i -ésima função de restrição com respeito às variáveis de projeto e n_g é o número de funções de restrição.

De modo grosseiro, a formulação padrão pode ser lida como: “Minimizar a função objetivo de forma que nenhuma restrição seja violada”. Portanto, em outras palavras, pode-se dizer que o resultado de uma otimização obteve sucesso quando as limitações impostas sobre as variáveis de projeto foram respeitadas e a função objetivo atingiu seu valor mínimo.

4.1.1 Variáveis de Projeto

De acordo com HAFTKA (1992), o conceito de otimizar ou aprimorar uma estrutura parte da premissa da existência de uma liberdade de mudança da mesma. Esta liberdade usualmente é expressa em termos da possibilidade de variação de um grupo de parâmetros da estrutura, os quais são conhecidos como variáveis de projeto dentro de um problema de otimização.

As variáveis de projeto possuem grande flexibilidade em sua definição, desde que se relacionem bem com a estrutura e o problema de otimização a ser resolvido. É possível definir dimensões, áreas ou até mesmo propriedades de materiais como variáveis de projeto de um problema de engenharia.

Além disso, as variáveis de projeto podem apresentar comportamento discreto, assumindo apenas valores bem definidos, ou contínuo, podendo assumir quaisquer valores dentro de um intervalo pré-determinado. Por fim, é importante destacar que a escolha dessas variáveis é de

extrema importância para definir o sucesso da otimização, visto que as mesmas influenciam diretamente na forma de construção do problema.

4.1.2 Função Objetivo

Conforme HAFTKA (1992), a função objetivo pode ser entendida como uma forma de caracterizar/medir a efetividade de um problema de otimização. Dentro de um ambiente de engenharia de estruturas a função objetivo pode medir o comportamento da massa, deslocamento, solicitações e até mesmo o custo de uma estrutura.

4.1.3 Restrições

As restrições podem ser interpretadas como limites de desempenho, os quais devem ser respeitados pelas variáveis de projeto. Esses limites podem estar relacionados diretamente aos valores assumidos por essas variáveis ou a quaisquer aspectos que sejam influenciados pelas mesmas. Na engenharia de estruturas as restrições normalmente se manifestam sob a forma de limitações quanto a: resistências a esforços, deslocamentos ou dimensões máximas, vibrações excessivas ou até mesmo limitações de custo.

4.2 Método de Otimização Particle Swarm (PSO)

Uma etapa fundamental na construção de um problema de otimização é a escolha do método a ser utilizado para solucioná-lo. Existem diversos métodos de otimização, cada um apresenta suas devidas vantagens e desvantagens de acordo com as condições de contorno do problema proposto. Existem métodos muito eficientes para: tratamento de problemas com variáveis discretas, solução de problemas com função objetivo linear ou não-linear, solução de problemas sem restrições, dentre outros. Contudo, o foco deste trabalho não é a discussão destes métodos,

mas sim a implementação de um método de otimização dentro de um problema típico de engenharia de estruturas.

Segundo RAO (2009), o método PSO inspirou-se no comportamento de colônias e enxames de insetos como formigas, abelhas, vespas ou cardumes de peixes. A palavra partícula representa um indivíduo dentro do conjunto do enxame. Cada indivíduo se comporta de maneira independente do outro, porém quando ele encontra um caminho razoável em direção à comida ele alerta os outros indivíduos sobre sua posição, fazendo com que se movam em sua direção.

A analogia acima pode ser transcrita para o contexto de otimização quando se pensa que cada partícula representa um ponto no domínio do problema de otimização, o qual é formado pelas variáveis de projeto. Cada partícula é posicionada, inicialmente, em uma região aleatória desse domínio e carrega duas propriedades: posição e velocidade. As partículas caminham pelo domínio e guardam as melhores posições, aquelas cuja função objetivo apresentou menor valor, e informam às outras partículas sobre essas posições para que elas ajustem sua posição e velocidade. A atualização da posição e velocidade de uma partícula são expressas, respectivamente, por:

$$P_j(i) = P_j(i - 1) + V_j(i); j = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$V_j(i) = V_j(i - 1) + C_1 r_1 [P_{best,j} - P_j(i - 1)] + C_2 r_2 [G_{best,j} - P_j(i - 1)]; j = 1, \dots, N \quad (11)$$

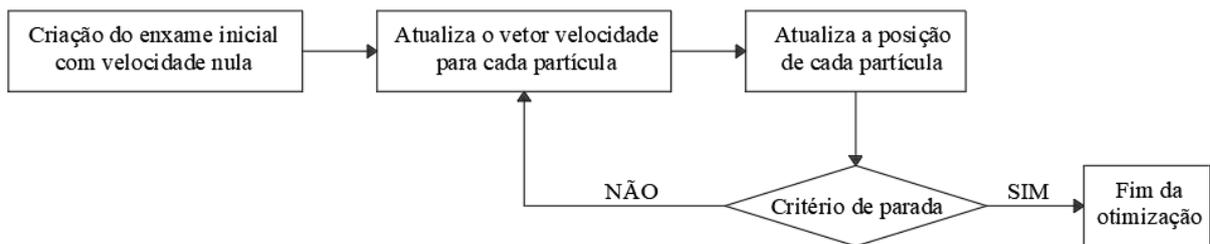
onde $P_j(i)$ e $V_j(i)$ representam, respectivamente, o vetor posição e velocidade da partícula j na i -ésima iteração e $P_j(i-1)$ e $V_j(i-1)$ o vetor posição e velocidade da mesma partícula na iteração anterior. C_1 e C_2 simbolizam, respectivamente, as taxas de aprendizado cognitivo individuais e em grupo das partículas e r_1 e r_2 são números aleatórios distribuídos de forma uniforme entre 0 e 1. $P_{best,j}$ representa a melhor posição encontrada pela partícula j em todas as iterações precedentes e $G_{best,j}$ representa o menor valor da função objetivo encontrado em todas as iterações anteriores por qualquer uma das N partículas.

De acordo com PEREZ (2007), esse método é ideal para atividades de otimização estrutural, o que motivou a escolha deste. Vale destacar que o método PSO necessita apenas da função objetivo e da definição de limites superiores e inferiores para as variáveis de projeto para ser

executado, não necessitando de derivadas para sua implementação. Além disso, não considera, por padrão, restrições de projeto em sua formulação. Por fim, a formulação matemática desse método não será discutida, pois o intuito é apenas utilizá-lo como ferramenta dentro de um problema de otimização de engenharia.

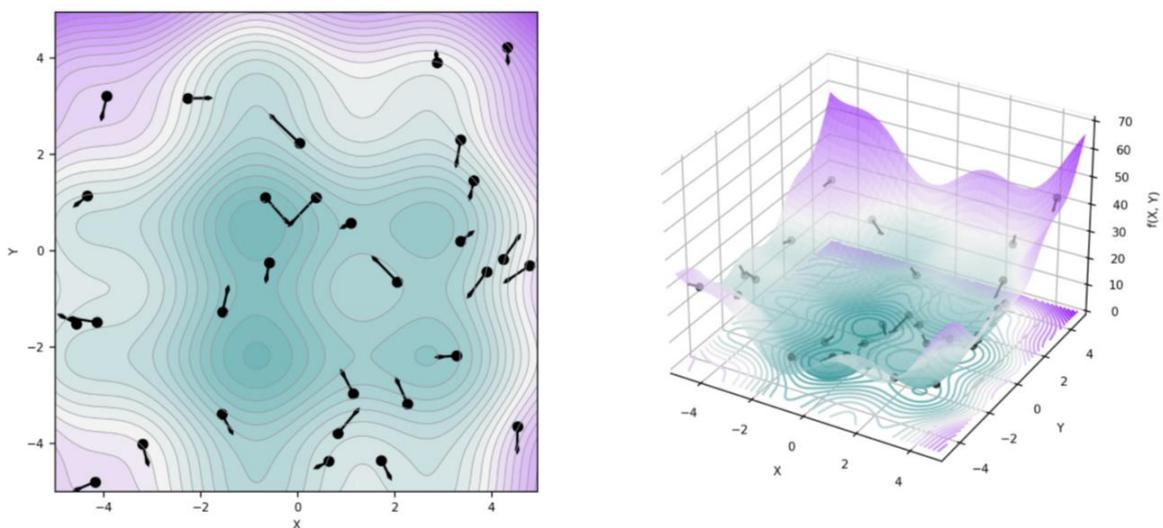
Para ilustrar os conceitos expostos nesse item, a Figura 20 e a Figura 21 apresentam, respectivamente, um fluxograma básico do funcionamento de um algoritmo de implementação de PSO e um exemplo ilustrativo de um enxame com trinta partículas, com velocidades de intensidade dadas pelo tamanho dos vetores, dentro do domínio de um problema de otimização com duas variáveis (X e Y), no qual as curvas de nível representam os valores da função objetivo a ser minimizada.

Figura 20 - Fluxograma simplificado do funcionamento do PSO



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 - Método PSO – Enxame inicial com 30 partículas



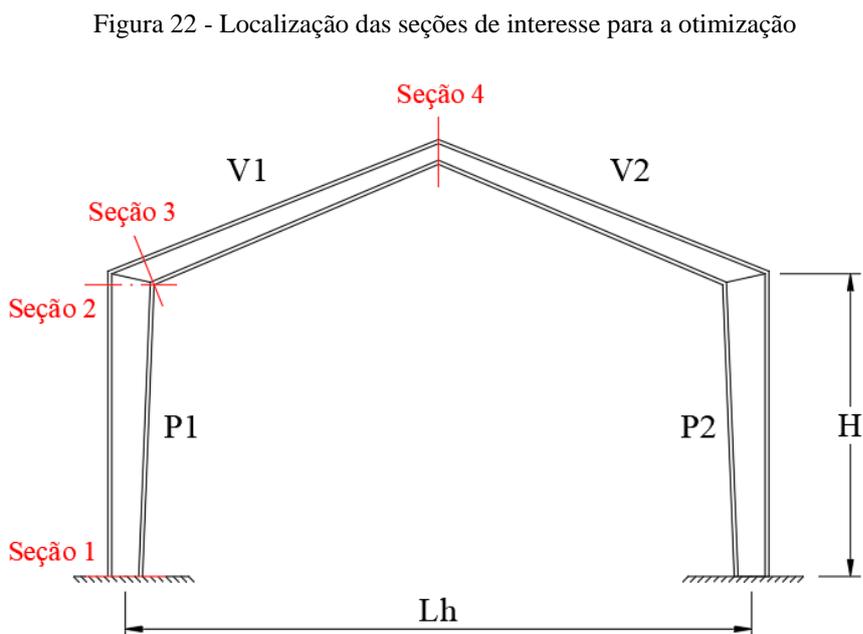
Disponível em: <https://towardsdatascience.com/particle-swarm-optimization-visually-explained-46289eeb2e14>

4.3 Formulação do Problema de Otimização Estrutural

Esta seção trata da formulação do problema de otimização do pórtico plano, apresentado no item 3 deste trabalho.

4.3.1 Variáveis de Projeto

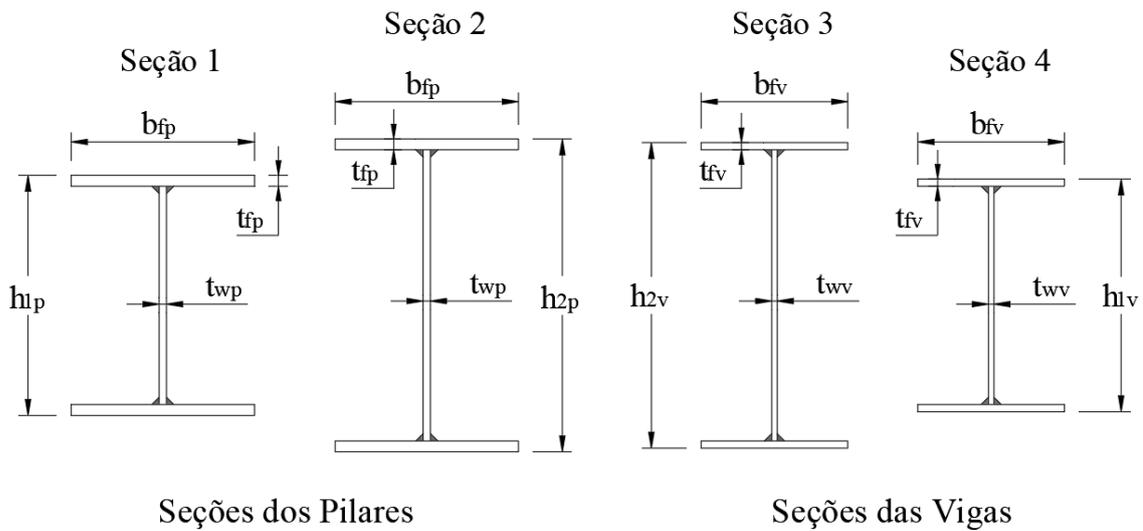
As variáveis de projeto escolhidas para o problema de otimização são as dimensões das seções transversais, localizadas nas extremidades de cada um dos elementos estruturais componentes do pórtico. A Figura 22 ilustra a localização dessas seções.



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante mencionar que as vigas e pilares do pórtico foram definidos de forma a constituir um pórtico simétrico. Dessa forma, as seções de base e topo do pilar P2 e a seção de base da viga V2 (seção da viga na região de encontro com o pilar P2) já estão contempladas nas seções 1, 2 e 3, respectivamente. A Figura 23 ilustra as seções transversais com as variáveis de projeto escolhidas.

Figura 23 - Variáveis de projeto – Seções dos pilares e vigas



Fonte: Elaborado pelo autor

O problema de otimização é formulado em função de dez variáveis de projeto, sendo que cinco delas estão relacionadas aos pilares: h_{1p} , h_{2p} , b_{fp} , t_{fp} e t_{wp} e as outras cinco estão relacionadas às vigas: h_{1v} , h_{2v} , b_{fv} , t_{fv} e t_{wv} .

4.3.2 Função Objetivo

O objetivo da otimização é encontrar o pórtico mais leve que respeite as restrições de projeto, que serão detalhadas no item 4.3.3. Visto que o material que constitui os elementos do pórtico foi considerado homogêneo, decidiu-se utilizar o volume de aço total do pórtico como função objetivo desse problema, assim, pode-se escrevê-la conforme a equação abaixo:

$$f(\vec{x}) = H \times \left((h_{1p} + h_{2p})t_{wp} + 4t_{fp}(b_{bfp} - t_{wp}) \right) + C \times \left((h_{1v} + h_{2v})t_{wv} + 4t_{fv}(b_{bfv} - t_{wv}) \right) \quad (12)$$

onde C é o comprimento total das vigas V1 e V2, calculado de acordo com a equação (13).

$$C = \frac{L_h}{2\cos(\theta)} \quad (13)$$

Como já foi mencionado, o método PSO não considera restrições em sua formulação. Sabendo disso, recorreu-se à utilização de uma função penalidade para contornar essa situação. A formulação básica de uma função penalidade é dada por:

$$F(\vec{x}) = f(\vec{x}) + \sum_{i=0}^{n_g} H(g_i(\vec{x})) \times g_i(\vec{x}) \times \omega_i \quad (14)$$

onde $F(x)$ é a função penalidade, $H(g_i(x))$ é a função Heaviside e ω_i é i -ésimo fator de penalidade. A função Heaviside é mostrada na equação (15).

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

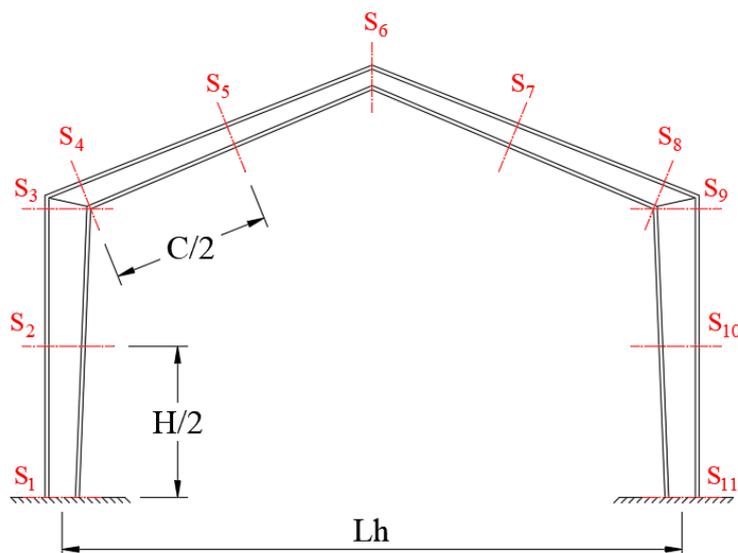
De maneira simples, a função penalidade pode ser interpretada como uma função que acrescenta à função objetivo um certo valor para cada restrição $g_i(x)$ violada. Logo, o método de otimização PSO vai buscar soluções que não violem as restrições de projeto para evitar o incremento no valor da função objetivo $f(x)$.

4.3.3 Restrições

As restrições de projeto definidas para este estudo estão relacionadas à capacidade resistente da estrutura quanto a esforços normais, cortante e momentos fletores, assim como a limites de deformação e geometria dos elementos. Vale ressaltar que se considerou restrições de desigualdade, conforme o formato padrão apresentado na equação (9).

Para facilitar o entendimento dos próximos itens, a Figura 24 mostra a localização das 11 seções de cálculo utilizadas para definir as restrições relacionadas à resistência da estrutura a esforços externos.

Figura 24 - Seções transversais para cálculo das restrições de resistência



Fonte: Elaborado pelo autor

Vale ressaltar que essas seções foram escolhidas devido a limitação da integração entre o software SAP2000 e a linguagem Python, na qual o SAP2000 retorna apenas as solicitações no centro e nas extremidades dos elementos. No entanto, para fins deste trabalho, julga-se que essas seções são adequadas para avaliar a segurança da estrutura.

Além disso, destaca-se o fato de que as restrições quanto ao esforço de compressão, cortante, momento fletor e à flexo-compressão foram determinadas pela maior razão entre esforço solicitante e resistente de cálculo em todas as combinações feitas no ELU. Desse modo, para cada um desses esforços, a função penalidade, mostrada na equação (14), penaliza a função objetivo apenas para as maiores violações da desigualdade $g_i(x) \leq 0$.

a) Resistência à compressão

A resistência à compressão dos elementos do pórtico foi calculada de acordo com o capítulo 5.3 do manual técnico AISC 25 (2011). É importante destacar que a metodologia de cálculo apresentada neste manual se assemelha muito à metodologia apresentada no item 5.3 da ABNT NBR 8800:2008, diferenciando-se apenas no cálculo da força de flambagem elástica em torno do eixo de maior inércia do perfil N_{ex} . O cálculo dessa força é mostrado a seguir:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI'}{L^2} \quad (16)$$

$$x = 0,5L \left(\frac{I_{x,min}}{I_{x,máx}} \right)^{0,0732} \quad (17)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, I' é o momento de inércia equivalente que é calculado em uma seção transversal localizada a uma distância x , obtida a partir da equação (17), da extremidade da barra com a menor altura, L é o comprimento da barra e $I_{x,min}$ e $I_{x,max}$ são, respectivamente, os momentos de inércia, em relação ao eixo de maior inércia, mínimo e máximo do elemento.

A restrição quanto à resistência ao esforço de compressão é definida pela seguinte equação:

$$g_1(\vec{x}) = \frac{N_{sd}}{N_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

onde N_{sd} e N_{rd} são, respectivamente, os esforços normais de cálculo de compressão solicitante e resistente. Destaca-se que a resistência à compressão é definida para o elemento do pórtico como um todo, apesar de que o efeito da flambagem local da alma e mesas é avaliado nas 11 seções ilustradas na Figura 24.

b) Resistência ao corte

A resistência ao corte foi avaliada de acordo com o item 5.6 do manual técnico AISC 25 (2011). Ressalta-se que a metodologia de cálculo da força cortante resistente, apresentada no item 5.4.3 da ABNT NBR 8800:2008, é idêntica ao procedimento utilizado, diferenciando-se apenas pelo fato de que o manual técnico AISC 25 exige a verificação da resistência em 3 pontos do elemento: nas duas extremidades e no centro. A restrição de projeto quanto à resistência ao esforço cortante é definida por:

$$g_2(\vec{x}) = \frac{V_{sd}}{V_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

onde V_{sd} e V_{rd} são, respectivamente, os esforços cortantes solicitante e resistente de cálculo. Ressalta-se que essa restrição é calculada em cada uma das seções de cálculo da Figura 24.

c) Resistência à flexão

A restrição quanto à resistência ao momento fletor é descrita pela equação abaixo:

$$g_3(\vec{x}) = \frac{M_{sd}}{M_{rd}} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

onde M_{sd} e M_{rd} são, respectivamente os momentos fletores solicitante e resistente de cálculo.

A resistência à flexão foi determinada segundo as prescrições do capítulo 5.4 do manual técnico AISC 25 (2011). Da mesma forma que o Anexo G da ABNT NBR 8800:2008, considerou-se 3 estados-limites para definição do momento fletor resistente da seção transversal de interesse: flambagem local da mesa (FLM), flambagem local da alma (FLA) e flambagem lateral com torção (FLT). No entanto, os critérios de resistência adotados diferem das recomendações da ABNT NBR 8800:2008 apenas no cálculo da resistência quanto ao estado-limite da FLT, que é detalhado no item c.1. É importante destacar que os estados-limites da FLA e FLM são avaliados em todas as seções de cálculo apresentadas na Figura 24.

c.1) Determinação da resistência quanto a flambagem lateral com torção (FLT)

Primeiramente, destaca-se que o fator de modificação para diagramas de momento fletor não-uniforme C_b foi considerado, de maneira conservadora, com o valor de 1,0.

I. Cálculo do fator de plastificação da alma R_{pc} e do fator de flambagem na flexão R_{pg}

O fator R_{pc} é utilizado para ajustar o esforço de flexão para levar em conta o efeito favorável da plastificação da alma em seções transversais com almas não esbeltas e é calculado a partir das seguintes expressões:

$$\text{Para } \lambda = \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw} \rightarrow R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (21)$$

$$\text{Para } \lambda_{rw} > \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw} \rightarrow R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (22)$$

$$\frac{h_c}{t_w} \geq \lambda_{rw} \rightarrow R_{pc} = 1,0 \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (23)$$

onde h_c é o dobro da distância do centroide da seção até a face interna da mesa comprimida, t_w é a espessura da alma do perfil, λ_{pw} e λ_{rw} são, respectivamente, as esbeltezes limites para classificação da alma da seção como compacta e não compacta, calculadas conforme a equação (24). M_p e M_{yc} são, respectivamente, os momentos de plastificação e o momento fletor correspondente ao início do escoamento da seção transversal, cujos valores são obtidos pelas expressões da equação (25):

$$\lambda_{pw} = 3,76 \sqrt{E/f_y} \quad e \quad \lambda_{rw} = 5,70 \sqrt{E/f_y} \quad (24)$$

$$M_p = f_y Z_x \leq 1,6 f_y W_x \quad e \quad M_{yc} = f_y W_x \quad (25)$$

onde f_y é a tensão de escoamento do aço, Z_x e W_x são os módulos de resistência plástico e elástico da seção transversal, respectivamente. O fator R_{pg} define a redução do esforço de flexão para seções com almas esbeltas e é calculado conforme as expressões abaixo:

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \rightarrow R_{pg} = 1,0 \quad (26)$$

$$\text{Para } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{rw} \rightarrow R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq 1,0 \quad (27)$$

onde a_w é obtido conforme:

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_f t_f} \leq 10,0 \quad (28)$$

onde b_f e t_f são, respectivamente, a largura e espessura das mesas do perfil.

II. Cálculo da tensão de flambagem elástica na FLT (F_{eFLT})

A tensão de flambagem elástica na FLT é dada por:

$$F_{eFLT} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{J}{W_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \quad (29)$$

onde h_o é a distância entre os centroides das mesas do perfil, J é o momento de inércia polar da seção em análise, L_b é o comprimento destravado lateralmente do elemento e r_t é obtido de acordo com a equação a seguir:

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(\frac{h_o}{h_c} + \frac{1}{6} a_w \frac{h^2}{h_o h_c} \right)}} \quad (30)$$

onde h é a altura total da seção em análise. Destaca-se que no caso da alma ser esbelta é necessário utilizar a constante de torção com o valor 0 na equação (29).

III. Cálculo da tensão F_L

Como, nesse caso, utiliza-se um perfil I com dupla simetria, a tensão F_L , que representa a diferença entre a tensão de escoamento do aço e a tensão residual oriunda de sua fabricação, é tomada como 70% do valor da tensão de escoamento do aço.

IV. Cálculo do momento fletor resistente M_{Rd}

O momento fletor resistente na FLT é definido para cada comprimento destravado L_b e seu cálculo é realizado nas seções de extremidade e centro desse comprimento conforme as seguintes expressões:

$$\text{Para } 8,2 > \frac{F_{eFLT}}{f_y} > \frac{f_L}{f_y} \rightarrow M_{Rd} = \Phi_c C_b R_{pc} R_{pg} M_{yc} \left[1 - \left(1 - \frac{F_L}{R_{pc} F_y} \right) \left(\frac{\pi \sqrt{\frac{F_y}{F_{eFLT}} - 1,1}}{\pi \sqrt{\frac{F_y}{F_L} - 1,1}} \right) \right] \quad (31)$$

$$\text{Para } \frac{F_{eFLT}}{F_y} \leq \frac{F_L}{F_y} \text{ e membros com alma esbelta} \rightarrow M_{Rd} = \Phi_c C_b R_{pg} F_{eFLT} W_x \quad (32)$$

$$\text{Para } \frac{F_{eFLT}}{F_y} \leq \frac{F_L}{F_y} \text{ e outros membros} \rightarrow M_{Rd} = \Phi_c C_b F_{eFLT} W_x \quad (33)$$

onde Φ_c é o coeficiente de minoração da resistência considerado como 0,90 para fins do cálculo da resistência à flexão. É fundamental mencionar que o coeficiente Φ_c também foi utilizado, com o mesmo valor, para minorar as resistências à compressão e ao esforço cortante.

De acordo com os contraventamentos detalhados no item 3.1, considerou-se para as vigas do pórtico o comprimento destravado L_b como 1/3 de seu comprimento total, já para os pilares este comprimento foi tomado como $H/2$.

d) Resistência à flexo-compressão

A restrição quanto à combinação de esforços normais de compressão e flexão foi determinada de acordo com os critérios do item 5.5.1.2 da ABNT NBR 8800:2008. Logo, esta restrição pode ser definida pelas equações (34) e (35).

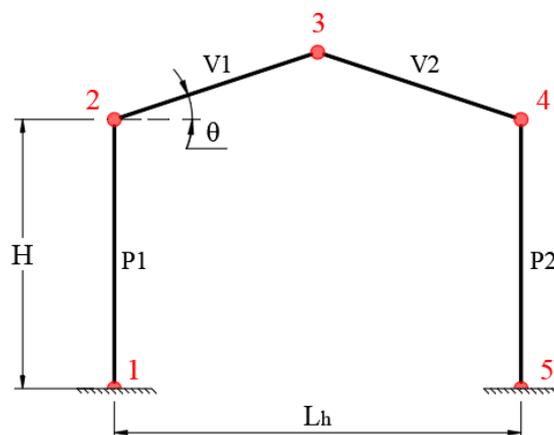
$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{rd}} \geq 0,20 \rightarrow g_4(\vec{x}) = \left(\frac{N_{sd}}{N_{rd}} + \frac{8}{9} \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \right) - 1 \leq 0 \quad (34)$$

$$\text{Para } \frac{N_{sd}}{N_{rd}} < 0,20 \rightarrow g_4(\vec{x}) = \left(\frac{N_{sd}}{2N_{rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \right) - 1 \leq 0 \quad (35)$$

e) Deslocamentos máximos

Para melhor compreensão deste item a Figura 25 traz a numeração dos nós da estrutura do pórtico.

Figura 25 - Identificação dos nós do pórtico



Fonte: Elaborado pelo autor

Em vista das informações contidas da Tabela C.1 da ABNT NBR 8800:2008 considerou-se uma limitação quanto ao deslocamento vertical máximo para as vigas de cobertura de $L/250$ e ao deslocamento lateral máximo no topo dos pilares de $L/300$, onde L é o comprimento total do elemento. Desse modo, foram estabelecidas restrições quanto a deslocamentos laterais nos nós 2 e 4 e ao deslocamento vertical no nó 3, conforme a expressão:

$$g_5(\vec{x}) = \max\left(\frac{\delta_{h,2}}{300}; \frac{\delta_{h,4}}{300}; \frac{\delta_{v,3}}{250}\right) - 1 \leq 0 \quad (36)$$

onde $\delta_{h,2}$, $\delta_{h,4}$ e $\delta_{v,3}$ são, respectivamente, os deslocamentos horizontais nos nós 2 e 4 e o deslocamento vertical no nó 3, obtidos nas combinações de carga para avaliação do estado limite de serviço.

f) Esbeltez

Conforme o item 5.3.4 da ABNT NBR 8800:2008, o índice de esbeltez global de barras comprimidas não deve ser superior a 200. Dessa forma, considerou-se uma restrição quanto à esbeltez dos pilares e vigas do pórtico, cuja formulação é definida pela equação abaixo:

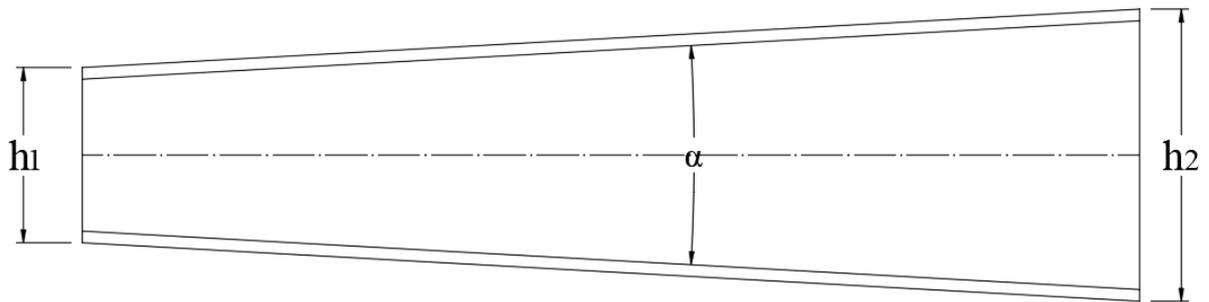
$$g_6(\vec{x}) = \max\left(\frac{\lambda_{\text{ pilar}}}{200}; \frac{\lambda_{\text{ viga}}}{200}\right) - 1 \leq 0 \quad (37)$$

onde $\lambda_{\text{ pilar}}$ e $\lambda_{\text{ viga}}$ são, respectivamente, os índices de esbeltez máximos dos dois pilares e vigas do pórtico.

g) Taxa de variação da altura

De acordo com o manual técnico AISC 25 (2011), o ângulo de inclinação α , conforme a Figura 26, formado devido à variação de seção ao longo de um elemento de inércia variável deve encontrar-se entre 0 e 15°.

Figura 26 - Ângulo de inclinação de elementos com seção variável



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa limitação pode ser adaptada através da consideração de uma taxa limite de variação de altura ao longo do elemento. Essa taxa foi chamada de μ_{lim} e seu valor é igual 0,2679, correspondente à tangente de 15°. Desse modo, define-se uma restrição quanto à taxa de variação de altura de um elemento de comprimento L , altura máxima da seção transversal h_2 e mínima h_1 , de acordo com as equações abaixo:

$$\mu = \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (38)$$

$$g_7(\vec{x}) = \frac{\mu}{\mu_{lim}} - 1 \leq 0 \quad (39)$$

h) Efeitos de segunda ordem

Conforme o item 4.9.4 da ABNT NBR 8800:2008, as estruturas podem ser classificadas, de acordo com sua sensibilidade a deslocamentos laterais, como pequena, média ou grande deslocabilidade. Para evitar a necessidade de considerar efeitos de segunda ordem no dimensionamento do pórtico de estudo, decidiu-se manter a estrutura dentro dos limites de uma estrutura de pequena deslocabilidade, ou seja, manter a relação entre os deslocamentos laterais oriundos de uma análise de segunda ordem e aqueles obtidos a partir de uma análise de primeira ordem igual ou inferior a 1,1. Essa restrição é definida por:

$$g_8(\vec{x}) = \max \left(\frac{\Delta_{2,2}}{\Delta_{1,2}}; \frac{\Delta_{2,4}}{\Delta_{1,4}} \right) - 1,1 \leq 0 \quad (40)$$

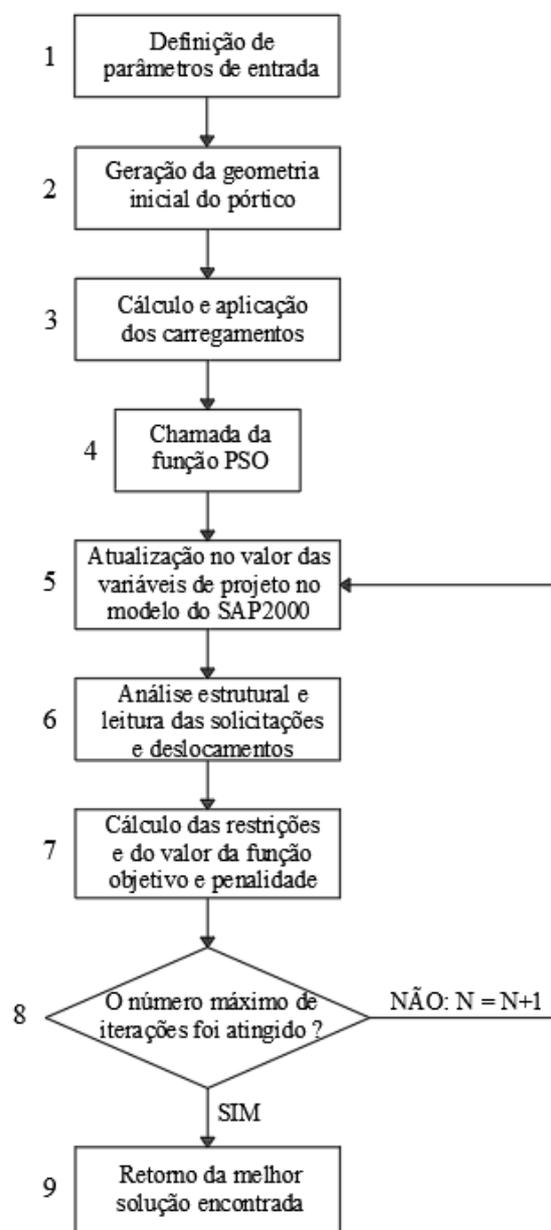
onde $\Delta_{2,2}$ e $\Delta_{2,4}$ são os deslocamentos laterais dos nós 2 e 4 obtidos a partir de uma análise de segunda ordem e $\Delta_{1,2}$ e $\Delta_{1,4}$ são os mesmos deslocamentos, porém oriundos de uma análise de primeira ordem.

É fundamental destacar que essa relação entre deslocamentos laterais foi avaliada para cada combinação no estado limite último definida no projeto. Logo, para cada caso de ELU presente na Tabela 3 fez-se uma combinação de cargas com metodologia de análise linear e outra com metodologia não-linear.

4.4 Integração com Software de Análise Estrutural

Para consolidar o problema de otimização construído utilizou-se a API (*Auxiliar Programming Interface* ou Interface Auxiliar de Programação), existente entre o software de análise estrutural SAP2000 e a linguagem de programação Python. Esta ferramenta permite a comunicação entre ambos e, portanto, a automatização de processos no SAP2000 através de rotinas de programação. A Figura 27 apresenta as etapas que compõem o fluxo de trabalho da otimização.

Figura 27 - Fluxograma de funcionamento da otimização

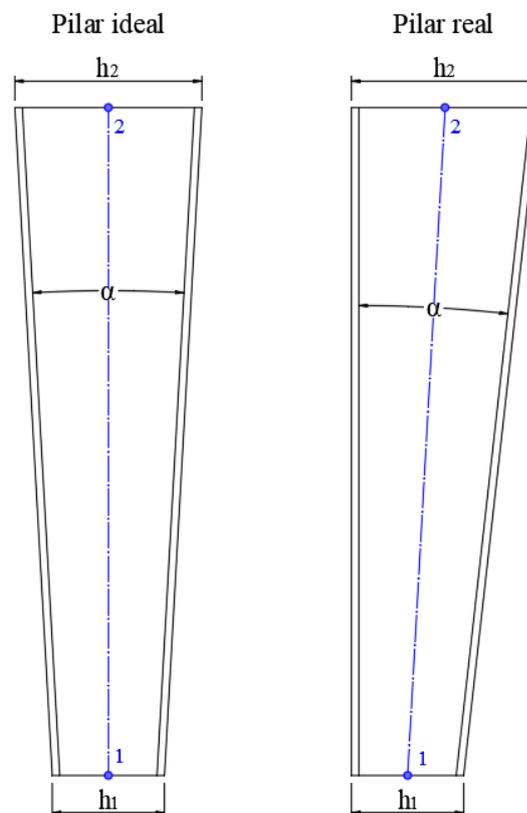


Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira etapa consiste na atribuição dos valores dos parâmetros L_v , L_h , D_v , N_p , H , θ e V_o , discutidos no item 3.2 desse trabalho, das propriedades de resistência do aço como tensões de escoamento e ruptura, módulo de elasticidade longitudinal e coeficiente de Poisson, bem como do valor das dimensões das seções transversais iniciais do topo e base dos pilares e vigas do pórtico. Além disso, definem-se os limites superiores e inferiores das variáveis de projeto, os quais são necessários para aplicação do método PSO.

A segunda etapa trata da definição da geometria inicial do pórtico de acordo com o valor das seções transversais iniciais e dos parâmetros definidos na etapa 1. É importante destacar que é comum manter a variação de seção transversal dos pilares voltada para a região interna do galpão. Dessa forma, como se utilizou um modelo de barras no SAP2000, a maneira mais realista de representar os pilares é através da modelagem de barras inclinadas, reproduzindo, assim, o efeito da variação da seção. A diferença no eixo longitudinal de um pilar idealizado e um pilar realista é ilustrada na Figura 28.

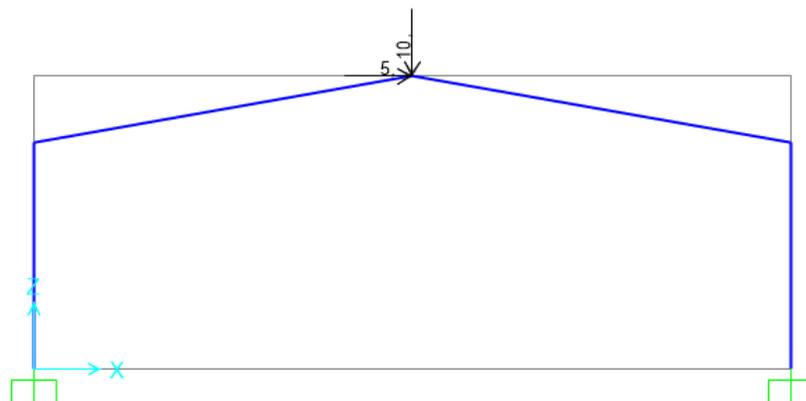
Figura 28 - Comparativo entre eixos de um pilar ideal e um pilar real



Fonte: Elaborado pelo autor

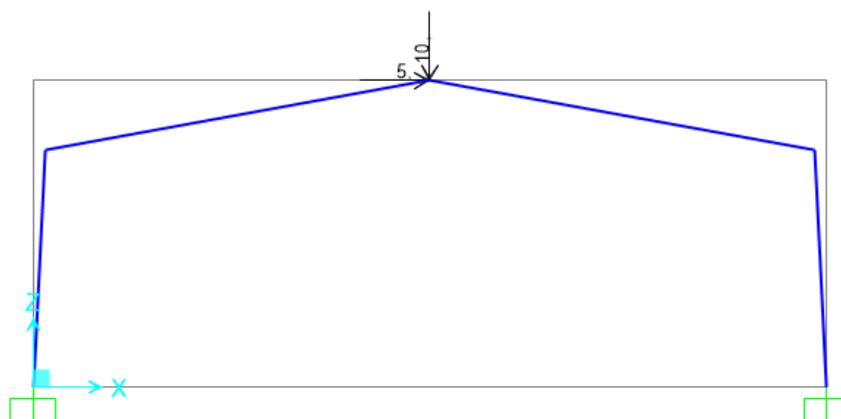
No entanto, para fins deste trabalho, decidiu-se modelar os pilares com o eixo longitudinal reto, pois, apesar do reconhecimento de que isso não representa a realidade, as solicitações nos elementos não apresentam grande variação e a construção do modelo torna-se mais simples. Para justificar essa escolha, a Figura 29 e a Figura 30, assim como a Tabela 4, ilustram um estudo comparativo feito com um pórtico de base engastada com vão horizontal de 20 m, altura dos pilares de 6 m, inclinação do telhado de 10°. As seções transversais das vigas possuem $h_{1v} = 30$ cm, $h_{2v} = 50$ cm, $b_{fv} = 20$ cm, $t_{fv} = 1$ cm, $t_{wv} = 0,8$ cm, já as seções transversais dos pilares possuem $h_{1p} = 20$ cm, $h_{2v} = 80$ cm, $b_{fp} = 20$ cm, $t_{fp} = 1$ cm, $t_{wp} = 0,8$ cm. Utilizou-se um aço com tensão de escoamento de 350 MPa e módulo de elasticidade longitudinal de 200 GPa.

Figura 29 - Configuração indeformada com pilares de eixo vertical



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 - Configuração indeformada com pilares com eixos inclinados



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4 - Diferenças percentuais nas solicitações

Elemento	Δ
P1	2,69%
P2	6,29%
V1	1,14%
V2	0,67%

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse estudo foram aplicadas 2 cargas pontuais na cumeeira no pórtico: uma carga horizontal de 5 kN e uma vertical de 10 kN. A Tabela 4 traz as diferenças percentuais máximas das solicitações na base, meio e topo de cada elemento do pórtico, obtidas no modelo com eixo inclinado quando comparadas com as do modelo com eixo reto. É possível observar que as solicitações nas vigas apresentaram diferenças desprezíveis e nos pilares atingiram 6,29%, o que se julgou um valor aceitável, considerando que a diferença de alturas entre as seções de base e de topo dos pilares foi exagerada para 60 cm.

Dando sequência ao fluxo de trabalho da Figura 27, a terceira etapa consiste no cálculo e aplicação dos carregamentos atuantes sobre o pórtico, os quais são diretamente dependentes dos parâmetros definidos na etapa 1 e do modelo criado na etapa anterior. Além disso, destaca-se que foi feita uma análise elástica linear da estrutura do pórtico.

As etapas 4, 5, 6, 7 e 8 definem o comportamento iterativo da otimização. Na etapa 4, utilizou-se uma função chamada “pso”, encontrada na biblioteca Pyswarm da linguagem de programação Python, a qual contém o método de otimização PSO implementado. Dessa forma, ao utilizar essa função dentro do algoritmo, o enxame inicial é gerado e para cada uma das partículas do enxame são executadas as etapas 5, 6 e 7, que caracterizam a otimização do volume de material do pórtico. Por fim, na etapa 9, a função PSO retorna a melhor solução encontrada dentre as N iterações realizadas.

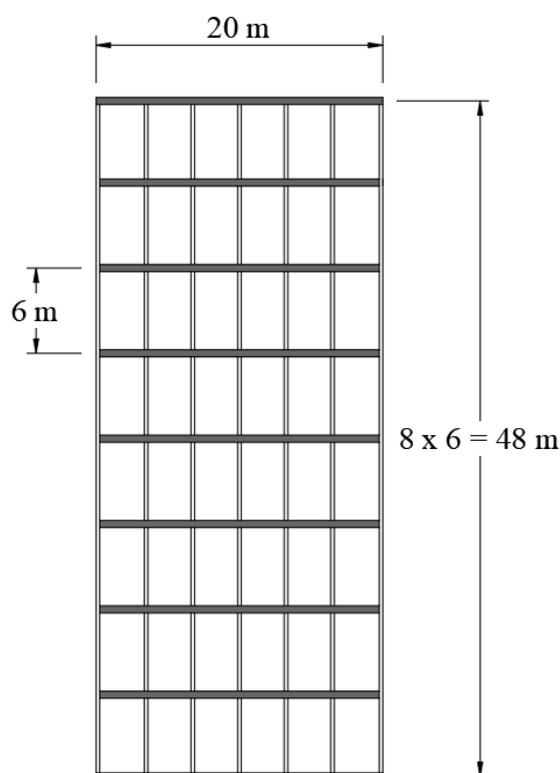
5. APLICAÇÕES

Neste tópico serão apresentados dois problemas. O primeiro tem o objetivo de validar a metodologia de otimização formulada, pois consiste na estrutura de um galpão industrial estudado por BELLEI (1998). O segundo, envolve a variação do número de pórticos principais N_p considerados para suporte de determinado galpão, de forma a demonstrar a flexibilidade da metodologia empregada nesse trabalho.

5.1 Exemplo de Aplicação - Problema de Validação

Para validação da metodologia de otimização construída, utilizou-se como base o galpão industrial do exemplo de cálculo presente no Apêndice D de BELLEI (1998), ilustrado na Figura 31.

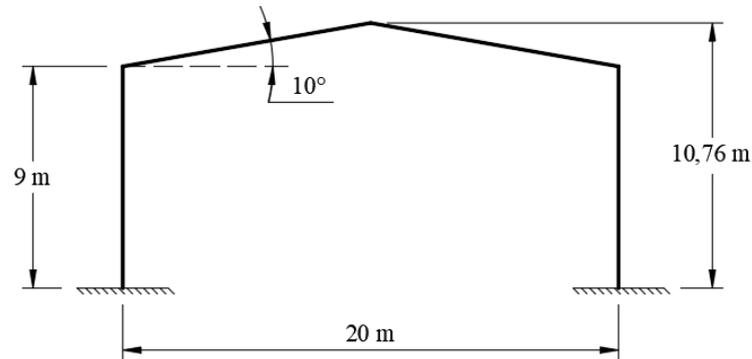
Figura 31 - Geometria do galpão industrial



Fonte: Elaborado pelo autor

O galpão é formado por nove pórticos principais com pilares de altura H igual a 9 m, e inclinação do telhado de 10° . A Figura 32 ilustra a geometria dos pórticos principais.

Figura 32 - Geometria dos pórticos principais



Fonte: Elaborado pelo autor

As propriedades do aço utilizado estão expostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do aço

Propriedade	Valor	Unidade
f_y	350	MPa
f_u	450	MPa
E	200	GPa
ν	0,30	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação às seções transversais iniciais, considerou-se as seções dos pilares com $h_{1p} = 20$ cm, $h_{2v} = 40$ cm, $b_{fp} = 20$ cm, $t_{fp} = 1,25$ cm, $t_{wp} = 0,8$ cm e as seções das vigas com $h_{1v} = 20$ cm, $h_{2v} = 40$ cm, $b_{fv} = 15$ cm, $t_{fv} = 1,25$ cm, $t_{wv} = 0,63$ cm. Além disso, a Tabela 6 mostra os limites das variáveis de projeto adotados.

Tabela 6 - Limites superiores e inferiores das variáveis de projeto

Limites das variáveis de projeto (cm)					
Limite	PILARES				
	h_{1p}	h_{2p}	b_{fp}	t_{fp}	t_{wp}
Inferior	20,0	20,0	15,0	1,0	0,5
Superior	60,0	60,0	30,0	2,2	1,0
Limite	VIGAS				
	h_{1v}	h_{2v}	b_{fv}	t_{fv}	t_{wv}
Inferior	20,0	20,0	15,0	1,0	0,5
Superior	60,0	60,0	30,0	2,2	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Definiu-se o valor do coeficiente de penalidade ω_i , presente na equação (14), como o volume máximo que o pórtico pode assumir. Além disso, utilizou-se o mesmo coeficiente de penalidade para todas as restrições.

Com respeito aos carregamentos, a partir das dimensões do galpão, é possível classificá-lo como uma estrutura de classe B (maior dimensão em planta menor que 50 m). Logo, os fatores meteorológicos b , p e F_r necessários para o cálculo do coeficiente S_2 apresentam, respectivamente, os seguintes valores: 0,94; 0,105; 0,98. A velocidade básica do vento V_o foi tomada com o valor de 35m/s, em vista disso, a Tabela 7 mostra as pressões dinâmicas calculadas nas cotas Z_1 e Z_2 , ilustradas na Figura 8.

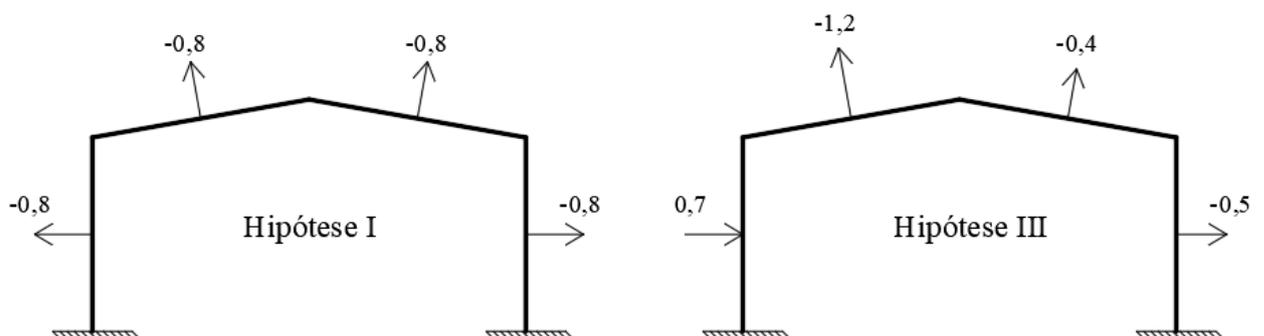
Tabela 7 - Pressões dinâmicas nas cotas Z_1 e Z_2

Pressões dinâmicas de interesse			
Cota (m)	S2	Vk (m/s)	q (N/m ²)
9,00	0,911	30,29	562,4
10,76	0,928	30,86	583,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Os coeficientes de pressão resultantes das paredes e telhado das hipóteses I e III de carregamento de vento são apresentados na Figura 33.

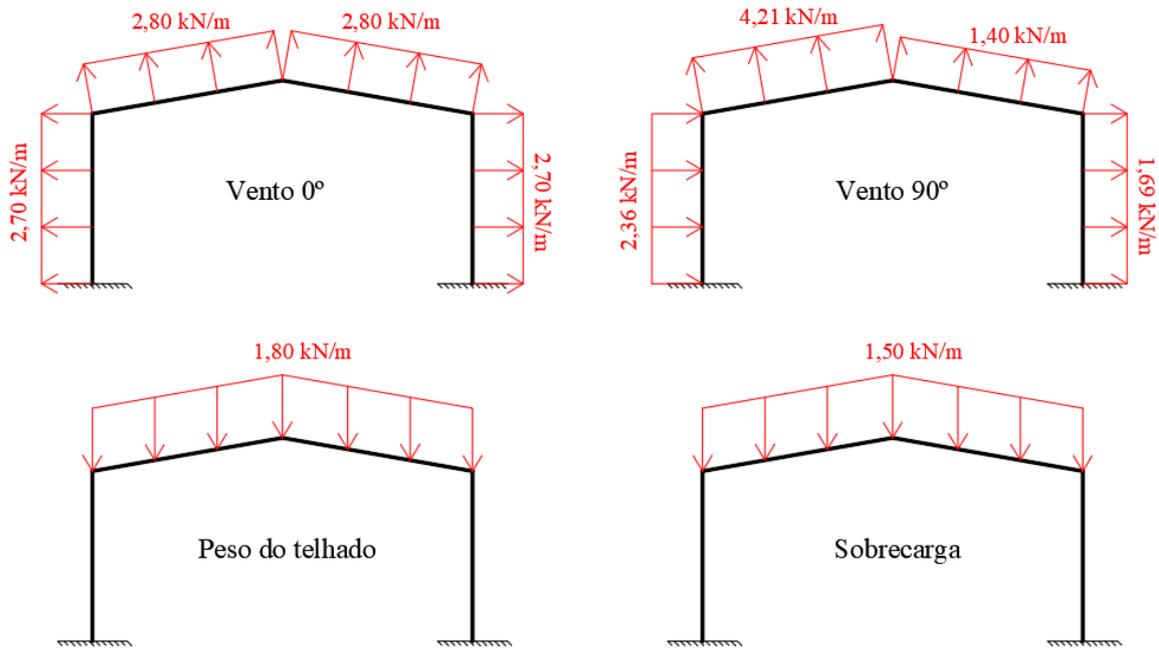
Figura 33 - Coeficientes de pressão das hipóteses I e III de vento



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do exposto, e do reconhecimento de que o comprimento de influência do pórtico de estudo é de 6 m, a Figura 34 ilustra os carregamentos permanentes e variáveis considerados sobre o pórtico, com exceção do peso próprio, o qual é determinado pelo próprio SAP2000.

Figura 34 - Carregamentos atuantes sobre o pórtico



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, antes de prosseguir com a análise dos resultados da otimização, fez-se um estudo de alguns parâmetros importantes da função “pso”, que será apresentado no item 5.1.1.

5.1.1 Estudo dos Parâmetros Swarmsize e Maxiter

O objetivo desse estudo é determinar o desempenho do PSO no problema proposto. Isso é medido em termos da melhor solução e da média das soluções (e coeficiente de variação) com base em uma série de otimizações realizadas. O estudo inclui a avaliação da sensibilidade do desempenho quanto ao ajuste dos parâmetros tamanho do enxame (*swarmsize*) e número máximo de iterações (*maxiter*).

Para isso fixou-se em 1000 o número máximo de avaliações da função objetivo. Em outras palavras, isso pode ser entendido como uma limitação no produto dos parâmetros *swarmsize* e *maxiter*, cujo limite superior é igual a 1000. Desse modo, consideraram-se 4 combinações de parâmetros possíveis:

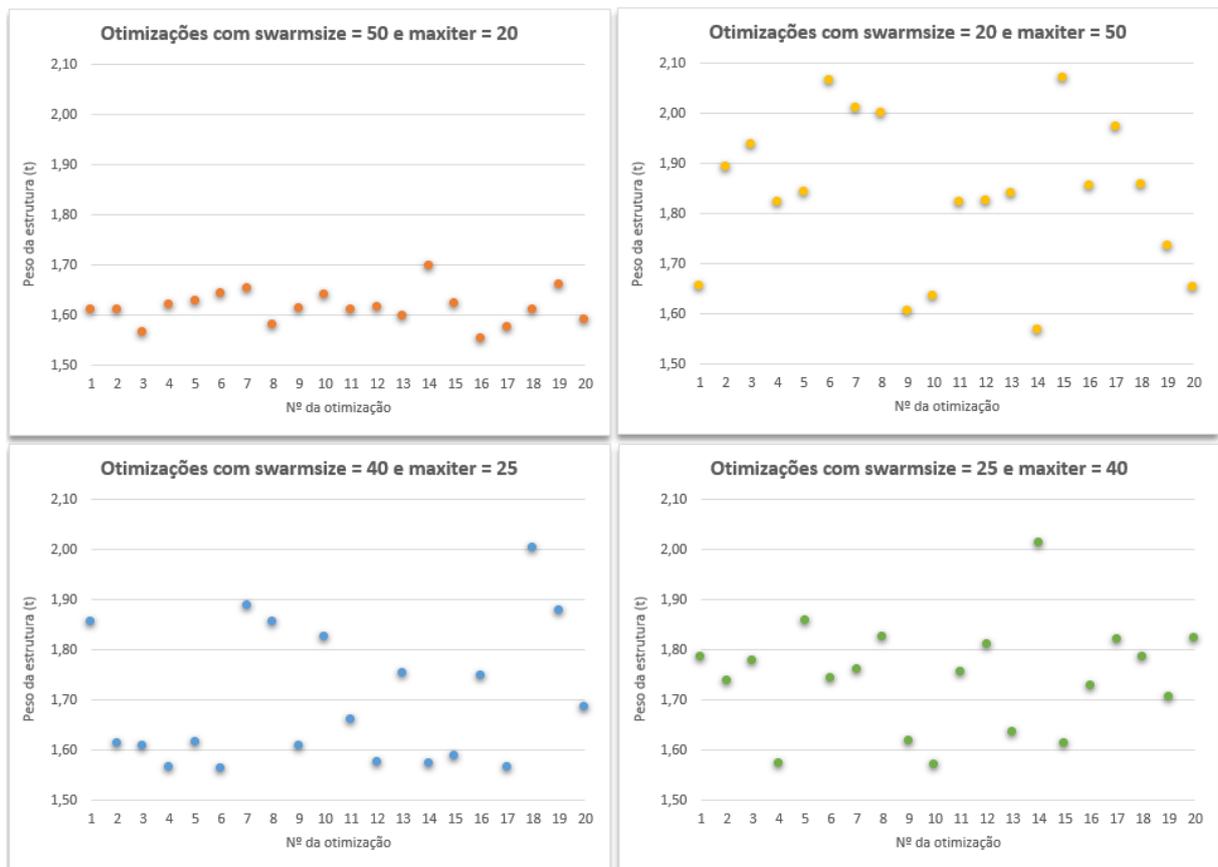
- 1) *Swarmsize* = 50 e *maxiter* = 20;

- 2) *Swarmsize* = 20 e *maxiter* = 50;
- 3) *Swarmsize* = 40 e *maxiter* = 25;
- 4) *Swarmsize* = 25 e *maxiter* = 40;

Realizou-se 20 otimizações para cada uma das combinações de parâmetros acima. Vale destacar que se utilizou uma máquina com processador de 8 núcleos, com frequência base de 3,6 GHz e memória RAM de 16 Gb, o que resultou, em média, em um tempo de processamento de 12 minutos para executar cada otimização. Além disso, optou-se por apresentar os resultados em função da massa da estrutura, por se tratar de uma grandeza mais palpável no âmbito da engenharia de estruturas.

A Figura 35 traz a massa da estrutura do pórtico obtida em cada uma das 20 otimizações e a Tabela 8 apresenta uma análise estatística dos resultados.

Figura 35 - Resultado das otimizações - Combinação de parâmetros



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos – Comparação entre combinações

Análise Estatística				
Parâmetros		Massa mínima (t)	Massa média (t)	Coeficiente de variação
<i>Swarmsize</i>	<i>Maxiter</i>			
50	20	1,562	1,615	3,4%
20	50	1,567	1,834	15,2%
40	25	1,563	1,701	13,8%
25	40	1,571	1,747	10,7%

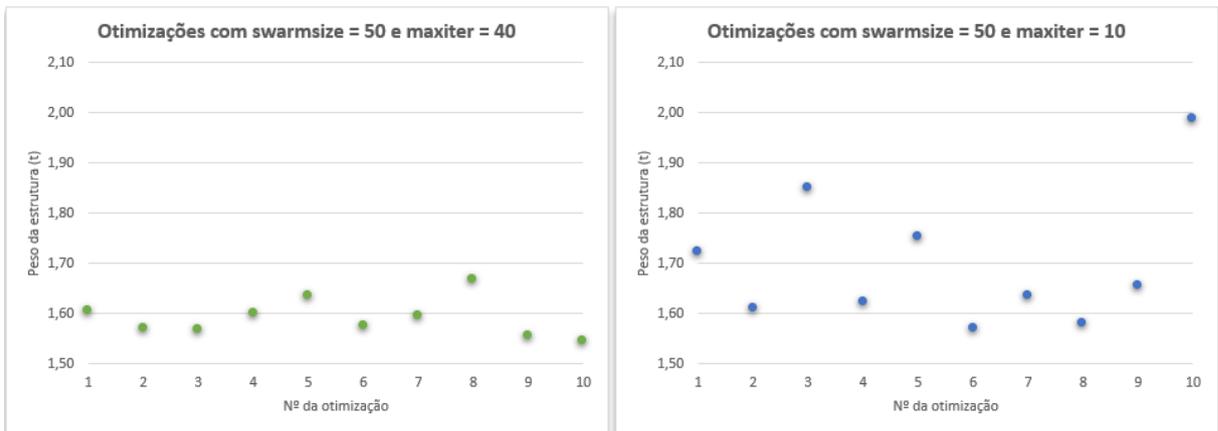
Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que todas as combinações encontraram uma solução com massa mínima em torno de 1,56t, porém a única que demonstrou consistência na busca por soluções ótimas foi a primeira combinação, que apresentou um coeficiente de variação de 3,4%. Isso pode ser explicado pelo fato de que o tamanho do enxame de partículas é um parâmetro que influencia diretamente na abrangência da busca por soluções ótimas dentro do domínio do problema e o número máximo de iterações, de forma geral, apenas ajuda a refinar a solução dentro desta região do domínio.

A utilização de menos partículas implica na redução da região, dentro do domínio do problema, na qual o método irá procurar por soluções ótimas e o uso de um valor maior de iterações não traz aumento significativo desta região, mas sim um aprimoramento da melhor solução encontrada dentro da mesma. Esse fenômeno pode ser observado quando se comparam os resultados obtidos nas combinações 3 e 4 de parâmetros, na qual a combinação com 40 partículas apresentou coeficiente de variação maior, mas valor mínimo e médio menores do que a combinação com 25, o que reflete o fato de que a combinação com maior número de partículas busca soluções em uma região mais abrangente.

Portanto, com base nos dados apresentados, pode-se concluir que a melhor configuração de parâmetros é de 50 partículas e 20 iterações. Para avaliar o efeito do número máximo de avaliações da função objetivo, foi realizado um estudo adicional, no qual se fixou o número de partículas em 50 e realizaram-se 10 otimizações com 500 e 2000 avaliações máximas da função objetivo, ou seja, com 10 e 40 iterações, respectivamente. A Figura 36 e a Tabela 9 apresentam os resultados obtidos nesse último estudo.

Figura 36 - Otimizações para 2000 e 500 avaliações máximas



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos – Comparação entre o número de avaliações

Análise estatística - 500, 1000 e 2000 avaliações				
Parâmetros		Massa mínima (t)	Massa média (t)	Coeficiente de variação
Swarmsize	Maxiter			
50	10	1,571	1,699	13,3%
50	20	1,562	1,615	3,4%
50	40	1,546	1,592	3,7%

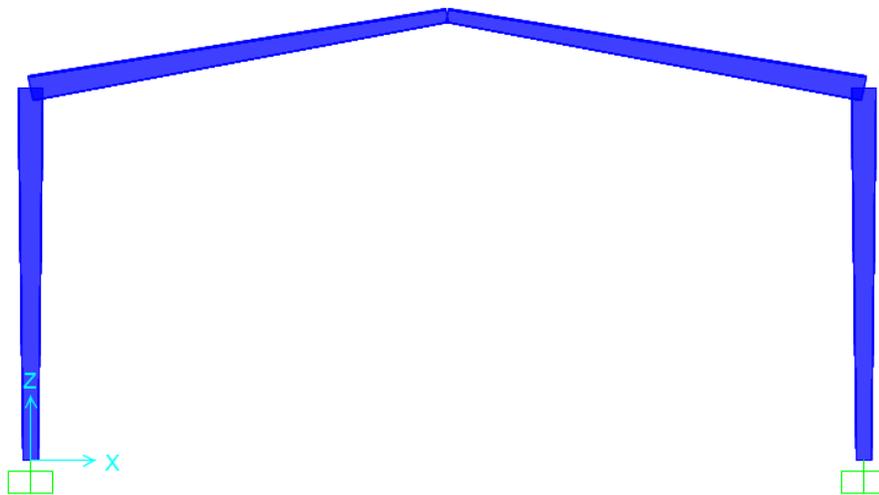
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a limitação da busca por apenas 500 soluções no espaço de resposta provocou um aumento do valor das massas média e mínima, isso ocorre devido à falta de refinamento das soluções ótimas encontradas. As otimizações que empregaram 2000 avaliações da função objetivo levaram a uma solução ótima com massa 1,03% inferior à obtida com a combinação 1 de parâmetros. No entanto, os valores médio e mínimo dessa solução tiveram pequenas melhorias, o que não justifica o dobro da demanda computacional. Dessa forma, justifica-se a escolha de 50 partículas e 20 iterações para realizar a otimização do pórtico em uma situação prática de projeto.

5.1.2 Solução Ótima

Nesta seção serão apresentados os principais aspectos da melhor solução encontrada, dentre as otimizações realizadas com 50 partículas e 20 iterações, para o pórtico do item 5.1. Vale destacar que, nesse trabalho, mantiveram-se as variáveis de projeto como variáveis contínuas, apesar da utilização de variáveis discretas ser mais comum para esses casos. Além disso, para esse problema, o coeficiente de penalidade assumiu o valor de 0,7186 m³. A Figura 37 apresenta uma vista frontal da solução ótima no SAP2000.

Figura 37 - Pórtico otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor

O pórtico apresentou um volume total de 0,20 m³ de aço o que se traduz em uma massa de 1,56 t. As dimensões das seções transversais dos elementos são expostas na Tabela 10.

Tabela 10 - Variáveis de projeto na solução ótima

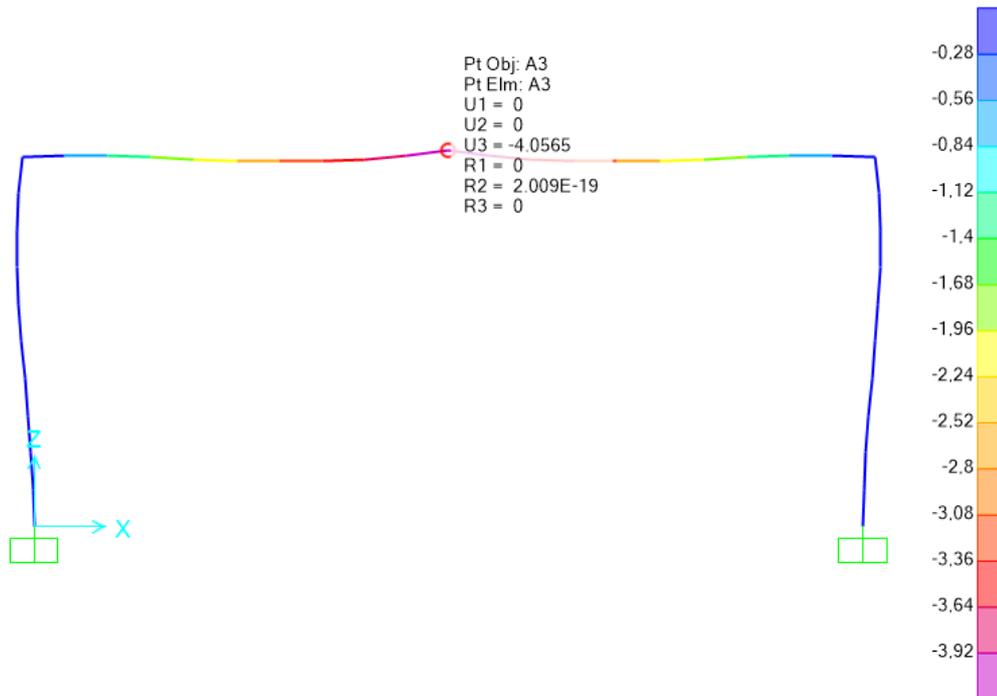
Dimensões das Seções Ótimas (cm)					
Elemento	h ₁	h ₂	b _f	t _f	t _w
Pilar	35,47	59,34	15,70	1,00	0,50
Viga	32,76	59,92	15,00	1,00	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o algoritmo optou por manter as seções transversais na região da ligação entre as vigas e pilares com as maiores alturas, o que já era esperado, uma vez que nesse tipo de

estrutura as maiores solicitações, usualmente, aparecem nesses locais. Além disso, destaca-se que as restrições que mais limitaram a otimização foram as restrições quanto à flexo-compressão, ao deslocamento vertical no nó 3 e à consideração de efeitos de segunda ordem. As figuras e discussões a seguir, caracterizam essas restrições.

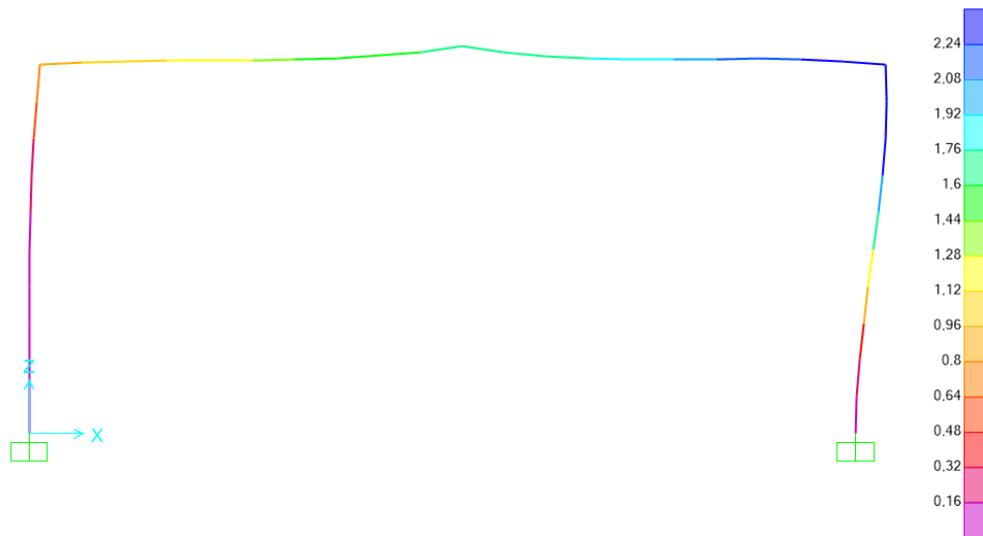
Figura 38 - Deslocamento máximo no nó 3 no caso 8 do ELS (cm)



Fonte: Elaborado pelo autor

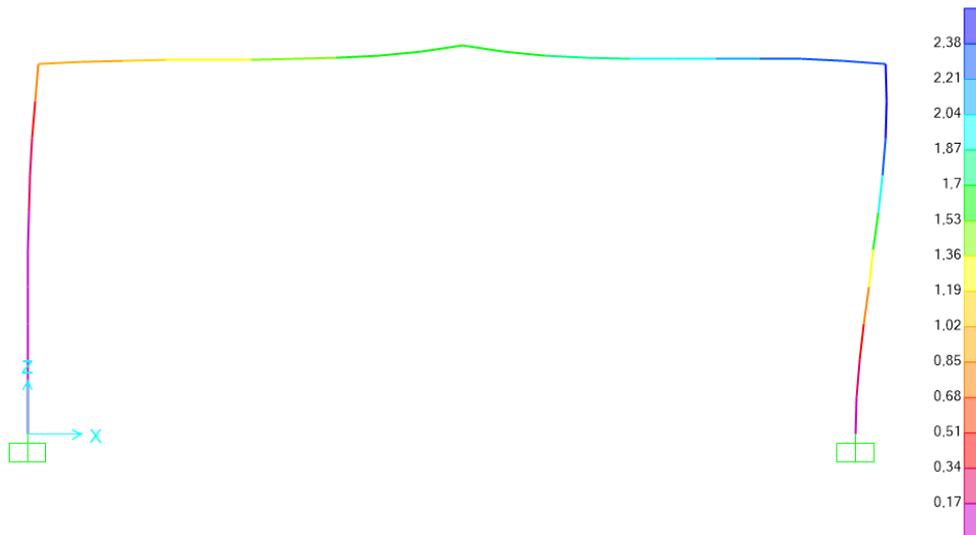
Conforme o item 4.3.3, o deslocamento vertical máximo aceitável para o nó 3 foi definido como $L/250$. Neste problema, as vigas do pórtico possuem um comprimento total de 1015 cm, o que resulta em um deslocamento máximo de 4,06 cm e, pela Figura 38, observa-se que esse nó apresentou um deslocamento vertical de 4,05 cm, assim, evidenciando que a estrutura foi dimensionada respeitando as restrições impostas.

Figura 39 - Configuração deformada no caso 3 de ELU – Análise linear (cm)



Fonte: Elaborado pelo autor

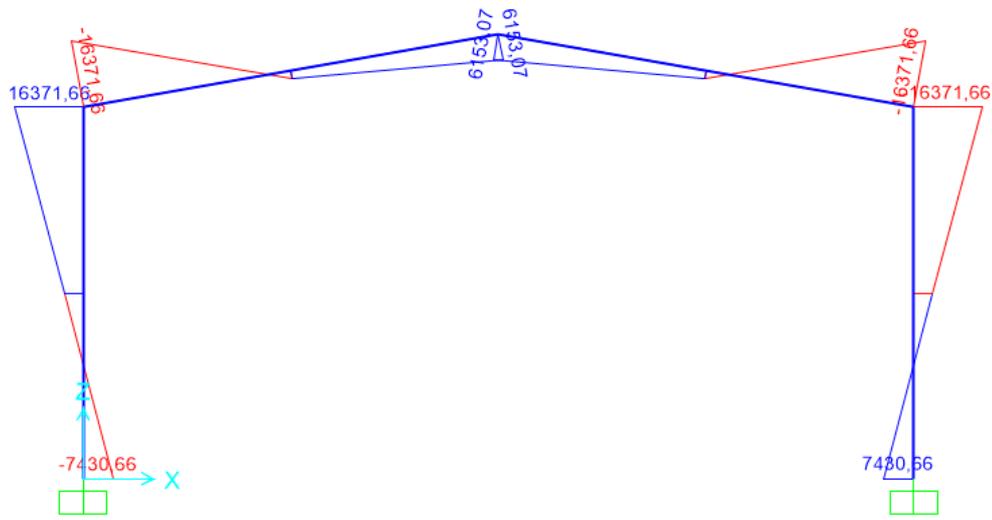
Figura 40 - Configuração deformada no caso 3 de ELU – Análise não-linear (cm)



Fonte: Elaborado pelo autor

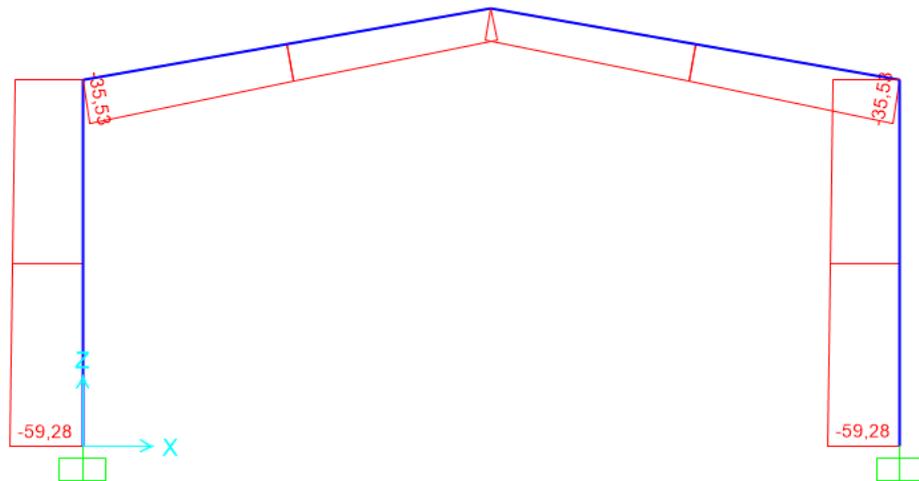
A maior relação entre os deslocamentos laterais nos nós 2 e 4, obtidos com metodologias de análise não-linear e linear, foi encontrada no caso 3 do ELU, apresentado na Tabela 3. De acordo com a Figura 39, os deslocamentos laterais nos nós 2 e 4 são de 0,876 cm e 2,374 cm, respectivamente. Conforme a Figura 40, esses mesmos deslocamentos são de 0,893 cm e 2,403 cm. Isso define a razão mencionada como 1,02 para o nó 2 e 1,01 para o nó 4. Dessa forma, garante-se que a estrutura foi analisada de maneira correta, pois foram considerados apenas esforços de primeira ordem em seu dimensionamento.

Figura 41 - Diagrama de momento fletor - Caso 5 do ELU (kN.cm)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 - Diagrama de esforço normal - Caso 5 do ELU (kN)



Fonte: Elaborado pelo autor

A restrição quanto à resistência a flexo-compressão atingiu seu maior valor nas seções de cálculo 3 e 9 na combinação 5 do ELU, cujos diagramas de momento fletor e esforço normal são apresentados nas figuras 41 e 42, respectivamente. Nessas seções, os momentos fletores solicitante e resistente de cálculo são de 16371,66 kN.cm e 17967,11 kN.cm, respectivamente. Já os esforços de compressão solicitante e resistente são de 35,53 kN e 314,1 kN, respectivamente. Desse modo, a expressão que define a restrição quanto à resistência à flexo-compressão é dada pela equação (35) e assume o valor de -0,00322, indicando proximidade do limite resistente da seção com os esforços solicitantes.

Vale mencionar que o diagrama de momento fletor das vigas da Figura 41 deveria ser representado por uma parábola, visto que o carregamento aplicado sobre as mesmas é uma carga distribuída. No entanto, o software SAP2000 plota os diagramas dos elementos, baseado na análise de corpo livre dos mesmos, ou seja, o programa isola cada uma das barras e representa o efeito do carregamento destas, bem como do restante da estrutura sobre elas, através do uso de cargas pontuais e momentos aplicados nos nós de extremidade do elemento, assim o diagrama fica representado por retas.

A Tabela 11 apresenta o valor de cada um das restrições, detalhadas no item 4.3.3, na solução ótima encontrada.

Tabela 11 - Valores das restrições na solução ótima

Restrições de projeto na solução ótima	
Restrição	Valor
Resistência à compressão	-0,82615
Resistência ao corte	-0,72987
Resistência à flexão	-0,08879
Resistência à Flexo-compressão	-0,00322
Deslocamentos máximos	-0,00167
Esbeltezes máximas	-0,31345
Taxa de variação da altura	-0,90018
Efeitos de 2ª ordem	-0,00795

Fonte: Elaborado pelo autor

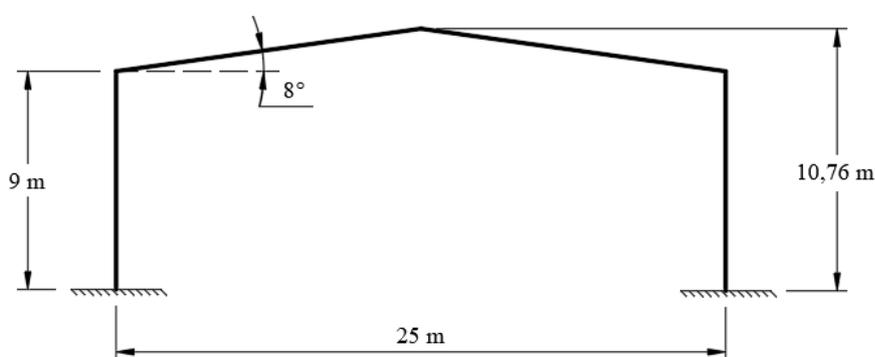
Como é possível observar na Tabela 11, nenhuma restrição ficou ativa, ou seja, nenhuma restrição teve o seu valor igual a zero. No entanto, as três restrições apresentadas neste item chegaram muito próximas de disto e, portanto, caracterizam as restrições limitantes do processo de otimização. Destaca-se que a restrição quanto ao deslocamento vertical máximo no nó 3 foi a que mais limitou a otimização, atingindo um valor de -0,00167.

Em um problema similar a este, BELLEI (1998) utilizou perfis I de alma cheia e seção constante e encontrou um pórtico principal com peso total em torno de 2,5t. É importante ressaltar que não é possível realizar uma comparação direta com a solução ótima encontrada neste trabalho, pois os carregamentos e limitações considerados não são os mesmos. No entanto, o exemplo ilustra a possibilidade de economia que a metodologia apresentada pode demonstrar

5.2 Exemplo de Aplicação – Variação do Número de Pórticos

Como forma de explorar a flexibilidade da metodologia de otimização apresentada, realizou-se um estudo que envolve a variação do número de pórticos principais N_p considerados para suporte do galpão. O pórtico de interesse para esse estudo é ilustrado na Figura 43. Destaca-se que se considerou um problema similar ao antecedente, porém com um galpão de L_v igual a 60 m, L_h igual a 25 m, pilares com altura H de 9 m e inclinação do telhado de 8° , para manter a altura total do pórtico considerado no estudo anterior.

Figura 43 – Vista frontal – Geometria do pórtico principal



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, considerou-se uma velocidade básica do vento V_o de 45m/s e propriedades do aço de acordo com a Tabela 5. Quanto aos limites das variáveis de projeto adotaram-se os mesmos do problema anterior, com exceção do limite superior da altura h_2 dos pilares e vigas, cujo valor foi aumentado para 70 cm.

A intenção desse estudo é observar a variação de peso do pórtico quando se aumenta seu comprimento de influência. Dessa forma, consideraram-se três configurações possíveis: um galpão com 11, 9 e 7 pórticos principais, o que se traduz em comprimentos de influência de 6, 7,5 e 10 m, respectivamente.

Foram realizadas 10 otimizações para cada configuração, utilizando-se a mesma população de partículas e iterações do problema anterior. A Tabela 12, a Tabela 13 assim como a Tabela 14 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 12 - Resultados das otimizações - Estudo de variação de N_p

Resultados das otimizações			
Otimização	Massa do pórtico (t)		
	11	9	7
1	2,21	2,42	2,71
2	2,38	2,58	2,79
3	2,10	2,32	2,70
4	2,12	2,42	2,92
5	2,19	2,55	2,72
6	2,26	2,56	2,64
7	2,20	2,27	2,73
8	2,34	2,21	2,61
9	2,17	2,36	2,86
10	2,22	2,52	2,71

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 - Estudo de variação de N_p

Parâmetros estatísticos - Variação de N_p			
N_p	Massa mínima (t)	Massa média (t)	Coefficiente de variação
11	2,10	2,22	8,9%
9	2,21	2,42	13,1%
7	2,61	2,74	9,6%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 - Variáveis de projeto - Estudo de variação de N_p

Soluções ótimas - Estudo de variação de N_p						
N_p	Elemento	Variáveis de projeto (cm)				
11	Pilares	h_{1p}	h_{2p}	b_{fp}	t_{fp}	t_{wp}
		43,91	69,88	17,29	1,00	0,50
	Vigas	h_{1v}	h_{2v}	b_{fv}	t_{fv}	t_{wv}
		50,47	70,00	16,20	1,00	0,50
9	Pilares	h_{1p}	h_{2p}	b_{fp}	t_{fp}	t_{wp}
		60,10	68,32	18,71	1,00	0,51
	Vigas	h_{1v}	h_{2v}	b_{fv}	t_{fv}	t_{wv}
		59,41	66,95	17,35	1,00	0,50
7	Pilares	h_{1p}	h_{2p}	b_{fp}	t_{fp}	t_{wp}
		61,51	70,00	18,70	1,18	0,59
	Vigas	h_{1v}	h_{2v}	b_{fv}	t_{fv}	t_{wv}
		67,82	70,00	18,30	1,09	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que, com a diminuição do número de pórticos e, por consequência, o aumento do comprimento de influência dos mesmos, a otimização apresentou uma tendência de aproximar a configuração geométrica dos pilares e vigas à de um elemento de seção constante, o que pode ser um indício de que, no caso do galpão com 7 pórticos, a melhor solução seja utilizar perfis I soldados de altura constante.

Ademais, ao extrapolar o cálculo da massa total dos pórticos principais do galpão, através da consideração de que todos os pórticos são idênticos ao pórtico mais solicitado, obtém-se massas totais de 23, 19,8 e 18,2t para os casos com 11, 9 e 7 pórticos, respectivamente.

Esses valores podem ser utilizados para estudar as vantagens econômicas trazidas pela consideração de menos pórticos principais ou para encontrar o número de pórticos que resulta na configuração mais econômica para o galpão como um todo, pois, como se pode observar, no caso com 11 pórticos a redução de 2 pórticos implicou em uma mudança de aproximadamente 3 toneladas na massa total. Em relação ao caso com 9 pórticos, essa mesma redução provocou uma mudança de apenas 1 tonelada. Essa constatação revela que eventual diminuição do número de pórticos não ocasionará diferenças significativas no peso total.

O aumento dos vãos entre pórticos implica no uso de estruturas de suporte do telhado e tapamentos laterais mais robustas, o que gera um consumo maior de material para confeccioná-las. Assim, para realizar-se um balanço preciso da economia obtida ao se reduzir o número de pórticos principais do galpão é necessário estudar o comportamento global da estrutura do mesmo.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou construir um problema de otimização com respeito à estrutura de um dos pórticos principais de um galpão industrial, bem como realizar estudos a partir da metodologia desenvolvida. Conforme o exposto, conclui-se que o objetivo principal foi alcançado e destacam-se, a seguir, alguns aspectos importantes.

O dimensionamento da estrutura, em ambos os estudos, foi limitado pelas restrições quanto à segurança associada à flexo-compressão e ao deslocamento vertical, o que já era esperado, pois, conforme o estudo de LIM (2015), a consideração de limitações de serviço no dimensionamento otimizado de pórticos metálicos pode levar a pórticos duas vezes mais pesados, quando comparados às soluções obtidas nas otimizações feitas sem considerar esses limites. Essa constatação fortalece a validade da implementação realizada e sustenta os argumentos apresentados.

Existem diversos métodos de otimização modernos que podem ser aplicados a problemas reais de engenharia. Conforme RAO (2009), os algoritmos genéticos e métodos baseados em redes neurais são exemplos desses métodos que vêm conquistando espaço na solução de problemas complexos de engenharia. No entanto, ressalta-se que é de suma importância conhecer o funcionamento de cada método, para permitir a configuração e análise dos parâmetros envolvidos em sua implementação, como foi feito no item 5.1.1 deste trabalho, pois, dessa forma, é possível adaptá-los para diferentes condições de contorno do problema de estudo.

Conforme HERNÁNDEZ (2005), a construção de softwares de otimização, voltados para a resolução de problemas específicos de engenharia, pode incentivar o uso de técnicas de otimização na metodologia de dimensionamento dos engenheiros estruturais. De acordo com isso, acredita-se que a formulação desenvolvida, apesar de suas limitações, é um processo viável que pode ser aplicado em problemas reais e que facilita o trabalho de escritórios de engenharia estrutural.

Por fim, para trabalhos futuros, recomenda-se estender a abrangência do problema de otimização para considerar aspectos como: efeitos de segunda ordem, comportamento discreto das variáveis de projeto, influência da rigidez da ligação entre os pilares e vigas do pórtico ou

até mesmo o comportamento estrutural global do galpão, permitindo, assim, otimizar a estrutura como um todo e não apenas um segmento dela.

REFERÊNCIAS

HAFTKA, R; GURDAL, Z. **Elements of Structural Optimization**. 3ª Edição. SpringerScience+Business Media, 1992.

RAO, S. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 4ª Edição. New Jersey. John Wiley & Sons Inc, 2009.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço**. 2ª Edição. Pini Ltda, 1998.

KAEHLER, R.; WHITE, D.; KIM, Y. **AISC Steel Design Guide 25 – Frame Design Using Web-Tapered Members**, 2011.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360: Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, Illinois., 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

HERNÁNDEZ, S. Design optimization of steel portal frames. **Advances in Engineering Software**, Coruña, v. 36, n. 9, p. 626-633, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997805000414>. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

LIM, J. Effect of serviceability limits on optimal design of steel portal frames. **Journal of Construction Steel Research**, Reino Unido, v. 86, p. 74-84, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X13000710>. Acesso em 10 de janeiro de 2021.

SHA, W. Optimal design of long-span steel portal frames using fabricated beams. **Journal of Construction Steel Research**, Reino Unido, v. 104, p.104-114, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X14002715>. Acesso em 20 de janeiro de 2021.

PEREZ, R. Particle swarm approach for structural design optimization. **Computer & Structures**, Toronto, v. 85, n. 19-20, p. 1579-1588, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794907000399>. Acesso em 4 de abril de 2021.