



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ROBERT JONATHAN ROCHA MASCARENHAS

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE PILARES METÁLICOS VIA
ALGORITMO DE VAGA-LUME**

FORTALEZA

2023

ROBERT JONATHAN ROCHA MASCARENHAS

DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE PILARES METÁLICOS VIA
ALGORITMO DE ENXAME

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia
Civil do Centro Universitário Christus,
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Eduardo Alcino de
Farias Marques

Fortaleza

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M395d Mascarenhas, Robert Jonathan Rocha.
DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE PILARES
METÁLICOS VIA ALGORITMO DE VAGA-LUME / Robert
Jonathan Rocha Mascarenhas. - 2023.
83 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,
Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Me. Eduardo Alcino de Farias Marques.

1. Algoritmo de vaga-lumes. 2. Otimização de pilares. 3. Pilares
metálicos. 4. Esbeltez. 5. Algoritmos de otimização. I. Título.

CDD 624

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção do aço	13
Figura 2 - Classe das ligas metálicas conforme o teor de carbono	14
Figura 3 - Propriedades mecânicas dos aços carbono	14
Figura 4 - Diagrama tensão-deformação do aço	15
Figura 5 - Propriedades do aço em paralelo ao teor de cada elemento constituinte	18
Figura 6 - Agrupamento dos perfis metálicos por tipo de perfil	18
Figura 7 - Seção de perfis laminados do tipo simples	19
Figura 8 - Seção de perfis laminados do tipo composto	19
Figura 9 - Catálogo de perfis laminado W do tipo I	20
Figura 10 - Fluxograma para dimensionamento do pilar metálico	21
Figura 11 - Pilar metálico sujeito da carga de compressão	26
Figura 12 - Coeficiente de flambagem (K)	28
Figura 13 - Efeito do momento torsor em um perfil metálico	29
Figura 14 - Perfil metálico sob ação do momento de flexo-torção	29
Figura 15 - Flambagem local na alma e mesa do perfil metálico	30
Figura 16 - Valores da relação $(bt)_{lim}$	31
Figura 17 - Comparativo de custo entre diferentes etapas construtivas utilizando estrutura metálica	34
Figura 18 - Concepção estrutural de um galpão em concreto pré-moldado e estruturas metálicas	35
Figura 19 - Composição de custos dos elementos estruturais de um galpão metálico	35
Figura 20 - Parâmetros geométricos de perfil metálico	42
Figura 21 - Fluxograma para a otimização de pilar metálico via algoritmo de enxame	50

Figura 22 - Código genérico do algoritmo de vaga-lumes	52
Figura 23 - Dados de saída do código compilado no Online GDB compiler - Python	58
Figura 24 - Recorte dos dados de saída descritivos do código compilado no Online GDB compiler - Python	58
Figura 25 - Fluxograma para gerar população inicial	60
Figura 26 - Trecho do código - geração da população inicial	61
Figura 27 - Fluxograma de interação entre candidatos	62
Figura 28 - Trecho do código - interação entre candidatos	64
Figura 29 - Tabela de perfis laminados do tipo HP	65
Figura 31 - Resultado da otimização para população de 25 vagalumes para 125 interações	67
Figura 32 - Resultado da otimização para população de 25 vagalumes para 125 interações	67
Figura 33 - Resultado da otimização para população de 50 vagalumes para 250 interações	69
Figura 34 - Resultado da otimização para população de 75 vagalumes para 375 interações	70
Figura 35 - Resultado da otimização para população de 100 vagalumes para 500 interações	70
Figura 36 - Resultado da otimização para população de 200 vagalumes para 1000 interações	71
Figura 37 - Resultado da otimização para população de 200 vagalumes para 1000 interações	71
Figura 38 - Gráfico da área de perfis gerados por quantidade de interações e população	72
Figura 40 - Área da seção transversal candidato_P1 - Perfil 75/375	74
Figura 41 - Montagem do perfil metálico	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Justificativa	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	11
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Aço como elemento estrutural de edificações no Brasil e no estado do Ceará	12
2.2 Processo de produção do aço e suas propriedades	13
2.2.1 Processo de produção	13
2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas	16
2.2.3 Tipos de perfis adotados para pilar metálico	19
2.3 Projeto estrutural: dimensionamento de pilares metálicos	21
2.3.1 Pilar metálico	21
2.3.1.1 Condições de contorno	22
2.3.1.2 Estados limites	23
2.3.2 Cargas solicitantes	25
2.3.2.1 Combinação das ações	26
2.3.3 Flambagem Global	27
2.3.4 Flambagem local	32
2.3.5 Resistência do pilar	34
2.3.6 Custo do pilar	35
2.4 Otimização de estruturas metálicas com uso de algoritmos	38
2.4.1 Conceito inicial de otimização	38
2.4.2 Algoritmo de otimização	39
2.4.2.1 Variáveis	43
2.4.2.2 Função objetivo	44
2.4.2.3 Restrições e penalidades	45
2.4.3 Algoritmo de vaga-lumes	46
2.4.4 População inicial	49
2.4.5 Interação entre candidatos	49
2.4.6 Processo de otimização de pilar metálico via algoritmo de enxame	50
3 METODOLOGIA	52
3.1 Definição do problema modelo	56
3.2 Identificação das variáveis	56
3.3 Restrições	57
3.4 Definição da função objetivo	58
3.5 Dimensionamento manual de um perfil do tipo H, HP e I	59

3.6 Dimensionamento do perfil W utilizando algoritmo	60
3.6.1 Parâmetros	62
3.6.2 População inicial e interações	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 Cálculo manual dos pilar metálico	68
4.2 Algoritmo de vaga-lumes	69
4.2.1 Hardware para execução do algoritmo	69
4.3 Resultados da Otimização	69
4.3.1 Análise do processo de interação	71
5 CONCLUSÕES	73
ANEXOS	74
REFERÊNCIAS	77

RESUMO

Este trabalho trata da elaboração de um código em *python* utilizando o conceito de algoritmo de vaga-lumes para dimensionamento e otimização de um pilar metálico sujeito a esforços de compressão. O comparativo de eficiência dos perfis gerados para a situação modelo idealizada utilizou como base 4 perfis laminados similares em área de seção transversal escolhidos de acordo com a carga aplicada. Os cálculos realizados foram baseados na norma NBR 8800:200 - Projetos de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios onde são roteirizados os métodos para o dimensionamento, análise e verificação de um perfil metálico sujeito aos efeitos de compressão. O site utilizado para elaboração e compilação do algoritmo foi o Online python compiler GDB beta pois possui grande acessibilidade e exige pouco processamento computacional.

Palavras-chaves: Algoritmo de vaga-lumes. Otimização de pilares. Pilares metálicos. Esbeltez. Algoritmos de otimização. Algoritmos bioinspirados.

ABSTRACT

This work addresses the development of a Python code using the concept of firefly algorithm for the sizing and optimization of a metallic pillar subjected to compression forces. The efficiency comparison of the generated profiles for the idealized model situation was based on four similar cross-sectional area profiles chosen according to the applied load. The calculations were based on the NBR 8800:200 - Design of steel structures and mixed steel and concrete structures of buildings, which outlines methods for the sizing, analysis, and verification of a metallic profile subjected to compression effects. The Online Python Compiler GDB beta was used for the algorithm's development and compilation, as it offers great accessibility and requires minimal computational processing.

Keywords: Firefly algorithm. Pillar optimization. Metallic pillars. Slenderness. Optimization algorithms. Bioinspired algorithms.

1 INTRODUÇÃO

A otimização estrutural é uma área de grande importância dentro da engenharia. Sua busca por melhores soluções possíveis para projetos de estruturas tem como objetivo reduzir o impacto econômico e potencializar o desempenho estrutural.

Pesquisas nessa área podem levar a avanços significativos na forma como os engenheiros e arquitetos projetam estruturas de aço, possibilitando um melhor entendimento dos fatores que afetam a estabilidade, a resistência e a durabilidade dos elementos que compõem esse sistema estrutural.

Dentre os diversos elementos estruturais a se analisar, destaca-se o pilar, elemento responsável por receber, normalmente, os esforços provenientes das lajes e vigas, além de resistir à flexo-compressão e dar continuidade ao fluxo de cargas até a fundação e ao solo.

O processo de dimensionar um pilar metálico envolve uma série de procedimentos a fim de garantir a segurança, a estabilidade e a eficiência da estrutura. Alguns dos principais pontos de análise incluem: a ação das cargas solicitantes, as tensões atuantes, o índice de esbeltez, os efeitos dos momentos no elemento, as dimensões mínimas, entre outros. Sua otimização torna-se ainda mais complexa, pois deve-se analisar, além dos fatores já mencionados, o fenômeno da flambagem, o seu comportamento a flexo-compressão, os parâmetros de modelagem estrutural e o uso de softwares avançados de simulação.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece diretrizes para o dimensionamento seguro das estruturas metálicas, utilizando como embasamento o método dos estados limites. Este método consiste em estabelecer limites para os quais a estrutura (ou parte dela) deve respeitar e assim assegurar as condições especificadas para o seu uso normal. O dimensionamento pelo método dos estados limites subdivide-se em duas análises: os estados limites últimos, os quais estão associados ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína que determine a interrupção do uso da estrutura; e os estados limites de serviço que estão

relacionados à durabilidade das estruturas, à aparência, ao conforto do usuário e à sua boa utilização funcional.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) também disponibiliza a metodologia para o cálculo das ações e combinações de cargas atuantes, além de parâmetros mínimos que devem ser atendidos, como a máxima deformação aceitável e o índice de esbeltez limite de um pilar. Estes dados e requisitos mínimos auxiliam o projetista a realizar o pré-dimensionamento, ou seja, a estimativa inicial das dimensões de um elemento estrutural para o seu adequado dimensionamento e detalhamento.

O pré-dimensionamento pode ser tratado como uma análise não aprofundada entre a razão da carga aplicada e a resistência do material pré selecionado, obtendo como produto uma área efetiva. Com base nessa área, é escolhido um perfil de área compatível usando tabelas comerciais de fabricantes, no entanto, o pré-dimensionamento é uma estimativa inicial para a análise, necessitando ainda as verificações dos efeitos da flambagem, de seu impacto na redução da capacidade resistente e na estabilidade do elemento.

Assim, o pilar pré-dimensionado deve ser novamente avaliado pois teve sua capacidade resistiva minorada. Caso sua nova capacidade resistente seja inferior à solicitada, a geometria selecionada deve ser revisada buscando compensar ou reduzir os efeitos redutores relacionados ao fenômeno de flambagem do pilar. Apesar da semelhança com processos de tentativa e erro, o pré-dimensionamento é um processo sistemático e cuidadoso, pois busca a melhor configuração possível através de cálculos e variáveis de baixa complexidade.

As propriedades geométricas apresentam grande influência para a adequada escolha de perfil metálico para um pilar, tanto por questões de segurança quanto por economia. O impacto econômico de pilares no orçamento de obras da construção civil quando comparado aos demais elementos estruturais é significativo, por isso a importância de buscar-se a melhor configuração possível.

Da Paz *et al.* (2019), Queiroz (2020) e Silva e Rodrigues (2020) demonstram em seus estudos o custo efetivo de cada etapa de execução da estrutura de uma obra, em 3 tipos diferentes de edificações, definindo, ao final, o pilar como item significativo no orçamento. Desse modo, segundo dados extraídos

dos estudos de Da Paz *et al.* (2019) e Queiroz (2020), o pilar seria, dentre os outros elementos estruturais, o de maior impacto financeiro na obra. Realizar a otimização deste elemento pode gerar economias financeiras relevantes ao construtor além de tornar mais eficiente o uso da matéria prima.

Diversas são as opções matemáticas para se avaliar um problema de otimização, alguns exemplos são: o método da programação não linear, o método do gradiente reduzido ou algoritmos bioinspirados. O objetivo da otimização é encontrar a solução ótima ao problema, seja ela uma configuração ideal, a tendência ao menor valor de uma variável ou a potencialização da mesma.

Dentre esses métodos, a utilização de algoritmos bioinspirados é uma abordagem baseada no comportamento coletivo, que se auto organiza e estabelece interações entre seus indivíduos, adaptando-se às variações ambientais (SERAPIÃO, 2009). Este processo é demonstrado por certos animais ou padrões encontrados na natureza que utilizam técnicas de inteligência de enxames (IE). Segundo palavras de Pereira *et al.* (2020), pode-se definir IE como a capacidade que um grupo de indivíduos têm de encontrar, em esforço conjunto, a solução para um determinado problema.

O uso da inteligência de enxame, no campo da engenharia, para a otimização, vem se mostrando promissor. Estudos de Barbosa (2017) demonstram efetividade quando aplicados em diferentes formatos com controle dos dados de entrada. Sua busca é baseada em situações ótimas ou próximas do ótimo tornam seu emprego viável na busca por soluções mais eficientes e econômicas, no entanto, a utilização desse método requer conhecimento específico para definir os parâmetros de entrada do algoritmo em função de sua sensibilidade. Além disso, o processo de otimização pode ser extenso pois o encontro da solução ótima é proporcional ao número de interações, demandando tempo e capacidade de processamento.

Assim, observa-se que há uma complexidade envolvida em todo o procedimento de otimização via algoritmo de enxame, mas isto leva a uma estrutura mais eficiente, com menor custo, menor peso e maior resistência, garantindo, também, assim a segurança, a estabilidade e a economia dos pilares metálicos.

1.1 Justificativa

O projeto estrutural baseia-se em 5 princípios: segurança, economia, eficiência estrutural, conforto e sustentabilidade ambientalmente. Otimizar um elemento estrutural tem impacto direto nestes princípios, possibilitando também análises mais complexas e o melhor entendimento do comportamento das estruturas, haja vista que:

- Aumenta a segurança: a otimização pode ajudar a garantir que os pilares metálicos sejam dimensionados com uma margem de segurança adequada, o que pode reduzir o risco de falhas ou colapsos inesperados;
- Redução de custos: através da redução do peso, da escolha do perfil, da melhor configuração estrutural ou do elemento mais eficiente pode-se reduzir significativamente os custos de construção, uma vez que pode-se adotar elementos mais eficientes e reduzir a quantidade necessária para tais construções;
- Aumento da eficiência: a otimização via algoritmo de enxame pode levar a soluções mais eficientes, economizando material e reduzindo o peso da estrutura sem comprometer a segurança ou a resistência;
- Melhora da qualidade estética: ao otimizar a seção de um pilar, é possível criar uma estrutura mais esbelta, com maiores vãos e pilares melhores dispostos, o que pode reduzir o impacto visual e aumentar o ganho de espaços em ambientes limitados, como por exemplo: garagens ou galpões de armazenamento;
- Redução no impacto ambiental: a quantidade de materiais utilizados é reduzida e, conseqüentemente, há um menor impacto construtivo com o melhor aproveitamento dos recursos.

Deste modo, reafirma-se, portanto, que este trabalho se justifica através da busca por aprimorar o desempenho da estrutura de um pilar metálico, otimizando-o via algoritmo de enxame buscando reduzir seu custo, ajustar a

margem de segurança a que é dimensionado e potencializar sua eficiência estrutural por meio de diferentes combinações.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Implementar algoritmo de vagalume em *Python* para a otimização de perfis metálicos utilizados em pilares e analisar a sua viabilidade e sua eficiência em comparação com perfis laminados de fabricantes de aço.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- a) Encontrar a “área ótima” através do processo de otimização por algoritmo de vagalume.
- b) Minimizar o peso, mantendo a resistência necessária.
- c) Minimizar os custos do material, mantendo a resistência necessária.
- d) Maximizar a resistência, mantendo peso e/ou custos dentro de limites razoáveis.
- e) Analisar diferentes formas de seções transversais, como perfis W dos tipos I, H e HP, para o uso em pilares.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aço como elemento estrutural de edificações no Brasil e no estado do Ceará

A utilização do aço como elemento estrutural em obras da indústria da construção civil tem impacto bastante positivo, sobretudo, na produtividade, isto é, em tempos de execução de obras cada vez mais curtos, proporciona rapidez na aplicação, além de permitir alto controle de qualidade do material, excelente desempenho estrutural e a possibilidade de reaproveitamento do material (BELLEI, 2008).

O Brasil sempre foi atrativo a práticas siderúrgicas, a riqueza natural de seu solo com forte presença de minérios de ferro e outros componentes presentes na liga é seu principal motivador. Segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro, em 2021, o Brasil produziu mais de 522 milhões de toneladas de ferro, representando mais de 70% de todos os minérios produzidos para comercialização. No cenário global dos grandes produtores do minério, o Brasil fica atrás apenas da Austrália e dos Estados Unidos. Por proporcionar uma abundante riqueza natural há elevados números de minas em produção atualmente, atingindo a marca de 203 unidades com produção de 1 milhão de toneladas/ano.

Por anos as estruturas metálicas estavam mais diretamente ligadas à construção de ferrovias. Em 1941, houve início um grande movimento que alavancaria ainda mais a indústria de aço no Brasil: a implantação do plano siderúrgico nacional. Sua execução, pelo então presidente Getúlio Vargas, deu origem a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Mas, foi apenas no final do século XIX e início do século XX, quando ocorreu a transição da arquitetura e da construção em alvenaria para a construção em aço, a utilização deste importante material foi potencializada (GERDAU, 2023; FERREIRA, 2021).

A execução de sistemas construtivos em aço estrutural se mostra presente em aplicações mais simples, como em treliças e em arcos treliçados de

galpões industriais e de ginásios poliesportivos em perfis de seção aberta (W, I, H, U) utilizados em pilares, vigas e telhados, até aplicações mais complexas com formas geométricas arrojadas e de seções esbeltas. No estado do Ceará, o impacto da utilização do aço estrutural nas edificações é considerado expressivo com grandes obras reconhecidas, por exemplo:

- Centro de Eventos do Ceará;
- Ponte dos Ingleses;
- Edifício Garagem do Aeroporto Internacional Pinto Martins;
- Estádio Presidente Vargas;
- Mercado dos Peixes;
- Terminal Marítimo de Passageiros de Fortaleza;
- BS Designer Corporate Towers.

Além das construções que utilizam estruturas metálicas convencionais (perfis de alma cheia, treliças e arcos) como base estrutural, pode-se citar outros sistemas construtivos que vem se tornando mais frequente, como, por exemplo, as construções em *Light Steel Framing*. Este sistema é fortemente utilizado em outros países, como: EUA e Japão (ABCEN, 2021) pois, além de seu apelo sustentável e velocidade na execução da obra, permite elevar a outro patamar o modelo de *lean construction* já que seu desperdício de insumos é baixíssimo quando comparado ao convencionalmente adotado concreto armado em conjunto com vedação em tijolos cerâmicos ou blocos de concreto.

2.2 Processo de produção do aço e suas propriedades

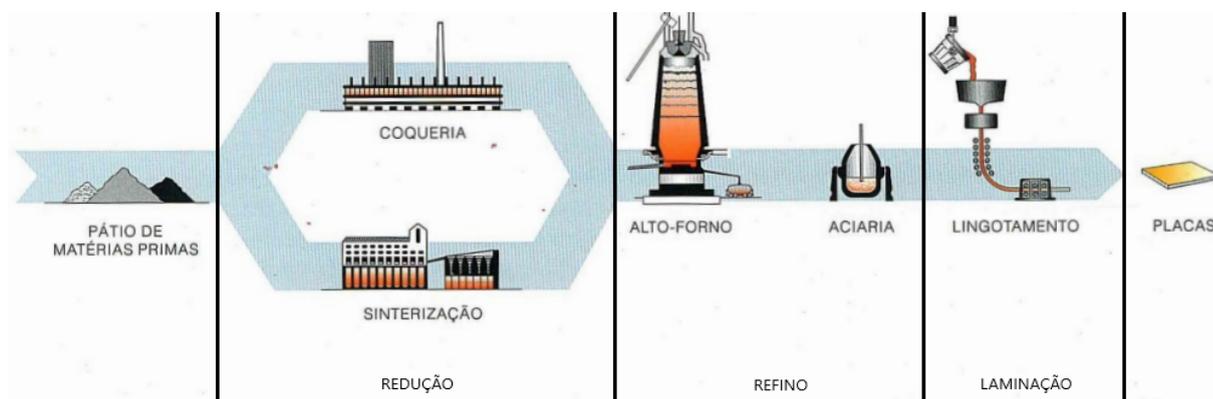
2.2.1 Processo de produção

O aço é, de forma geral, uma liga metálica composta de ferro, carbono e elementos residuais provenientes de sua fabricação (CHIAVERINI, 1996). Obtido

através de processos siderúrgicos, o aço é resultado de 3 importantes processos aplicados ao minério de ferro: redução, refino e laminação.

Na etapa de redução, o minério de ferro é transformado em sinter por processo de queima e enviado ao alto forno. No alto forno, o sinter é adicionado de carvão mineral coqueificado, minério de ferro bitolado e pelotas para ser submetido a injeções de ar quente, aquecido a partir da queima de gás natural ou outras fontes, e combustíveis auxiliares, formando assim o ferro gusa e finalizando a etapa de redução. O ferro gusa, ainda em estado líquido, é refinado, removendo impurezas e adicionado de elementos que aprimoram sua capacidade física e química. Por último o aço passa pelo processo de laminação onde sua solidificação é feita através do lingotamento, obtendo-se o produto final pronto para o uso (COSTA *et al.*, 2007; USIMINAS, 2020). Todo este processo de produção pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Processo de produção do aço



Fonte: Adaptado pelo autor, Dias (1997).

Durante a produção é necessário um alto e rigoroso controle de qualidade, pois, além dos processos físico-químicos, o aço tem em sua composição relação com outros elementos que contribuem para garantir as propriedades mecânicas mínimas e as características específicas deste material.

Para as ligas metálicas destinadas a estruturas utiliza-se o aço-carbono. Este tipo de aço se diferencia dos demais por apresentar baixo teor de carbono (Figura 2), como consequência apresenta menor limite de resistência, mas maior ductilidade, importante parâmetro nas estruturas que adiante será abordado.

Figura 2 - Classe das ligas metálicas conforme o teor de carbono

CLASSE	LIMITE USUAL DE RESISTÊNCIA (MPa)	CARACTERÍSTICAS	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
BAIXO CARBONO	<440	Boa tenacidade, conformabilidade e soldabilidade	Pontes, edifícios, navios, caldeiras, tubos, estruturas, etc.
MÉDIO CARBONO	440 A 590	Médias conformabilidades e soldabilidade	Estruturas parafusadas de navios e vagões, tubos, estruturas mecânicas, implementos agrícolas, etc.
ALTO CARBONO	590 A 780	Más conformabilidades e soldabilidade, alta resistência ao desgaste	peças mecânicas, implementos agrícolas, trilhos e rodas ferroviárias.

Fonte: Adaptado pelo autor, Dias (1997).

Os principais tipos de aço-carbono utilizados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e das normas europeias EN Eurocodes, são os apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Propriedades mecânicas dos aços carbono

NBR 7007	ASTM	Principais Características	Limite escoamento (MPa)	Limite resistência (MPa)	Alongamento $L_0 = 200$ mm (%)
MR 250	A36	Aço estrutural ao carbono de média resistência mecânica	mín. 250	400 a 550	mín. 20
AR 350	A572 ou Grau 50	Aços estruturais microligados de alta resistência mecânica	mín. 345	mín. 450	mín. 18
AR 415	A572 ou Grau 60	Aços estruturais microligados de alta resistência mecânica	mín. 415	mín. 520	mín. 16
AR 350 COR**	A588*	Aço estrutural microligado de alta resistência mecânica e maior resistência	mín. 345	mín. 485	mín. 18

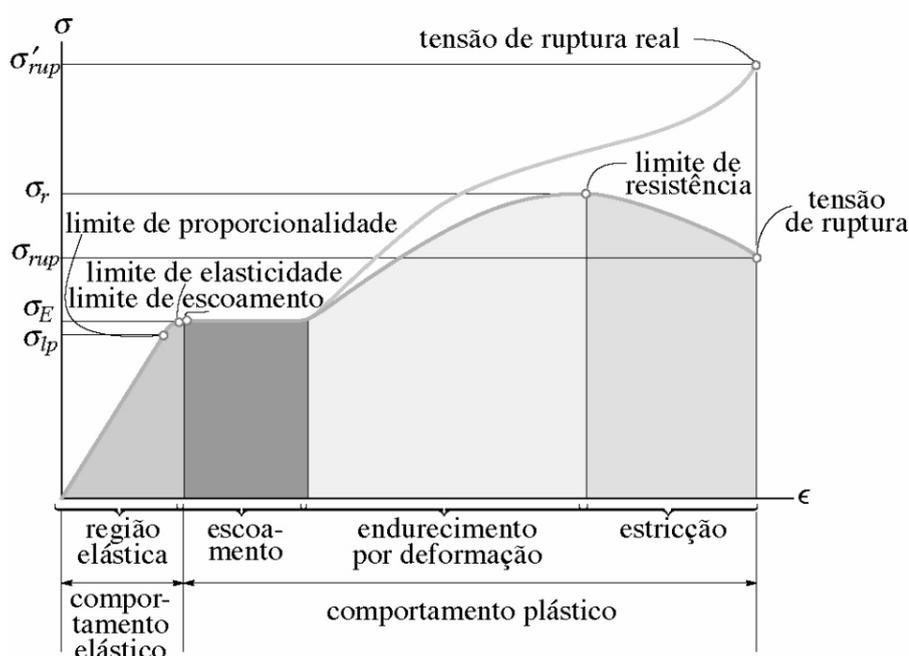
Fonte: Adaptado pelo autor, SIMEC (2019).

2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas

Para o dimensionamento de um elemento estrutural é fundamental conhecer o comportamento do material, suas características e suas propriedades físicas e mecânicas. Estas podem ser quantificadas através de ensaios padronizados, permitindo uma análise quantitativa das propriedades do material.

O principal ensaio de caracterização do aço utilizado em estruturas metálicas é o de tração. A metodologia deste ensaio compreende uma barra metálica submetida à tração, sendo possível mensurar a resistência do material e sua deformação através da aplicação de uma carga até sua ruptura conforme parâmetros da NBR 8800 (ABNT, 2008). Ao final do ensaio elabora-se a curva tensão-deformação do aço que pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama tensão-deformação do aço



Fonte: Hibbeler (2015).

Pode-se dividir o gráfico em duas regiões, a qual classifica-se como região de regime elástico e de regime plástico. Na região elástica o aço tem comportamento análogo a uma mola em que aplica-se uma carga de tração,

deforma-se e, após remoção da carga, retorna a seu estado inicial, isto é, sem deformações. Ainda nesta zona, sua deformação acontece de forma linear. Este comportamento limita-se a uma tensão limite que, após excedida, o aço escoando saindo de seu regime elástico para o plástico. Este evento, similar a uma mola, obedece a lei de Hooke (FAKURY, 2016).

Quando atinge seu limite máximo de deformação por tensão exercida o aço escoando, perdendo sua capacidade resiliente e entrando em seu regime plástico, onde continua a se deformar sob tensões de valores constantes ou minimamente variáveis até que atinja seu encruamento. Durante encruamento o aço adquire dureza, sendo necessário o aumento da tensão para que haja novas deformações ao custo da redução em sua seção, caracterizando o fenômeno da estricção. Esta é a última etapa do aço antes de sua ruptura.

Durante o processo de transição entre os regimes de trabalho o aço sofre solicitações de energia interna ou externa, e que devem ser absorvidas pelo material. Estudos realizados por diferentes autores, como exemplo citam-se: Chiaverini, (1996); Dias, (1997); Andrade (2016) e Pfeil e Pfeil, (2022) que elencam as principais propriedades do aço estrutural:

Resiliência: pode ser observada na região elástica e é definida como a quantidade de energia por unidade de volume que o material consegue absorver quando sujeito a uma carga e devolver essa energia com a remoção da carga.

Tenacidade: capacidade do material de absorver energia quando submetido à carga de impacto. É a energia total, elástica e plástica, absorvida pelo material até a sua ruptura, representando a área total do diagrama tensão-deformação.

Ductilidade: diretamente relacionada com a capacidade de maleabilidade do metal. Andrade (2016) define ductilidade como uma propriedade que garante ao aço capacidade de deformação plástica antes da ruína, permitindo que parte da estrutura mais solicitada se deforme após o início do escoamento, o suficiente para que outras partes absorvam novos incrementos de carregamento.

Além das propriedades mecânicas citadas, busca-se obter, para o aço, resistências a fenômenos independentes das cargas aplicadas, como é o caso da corrosão ou das altas temperaturas.

Segundo Gentil (2022), todos os metais estão sujeitos a corrosão se o meio for suficientemente agressivo e este autor descreve o processo de oxidação como um fenômeno espontâneo que se inicia já na exposição do aço ao oxigênio, onde ocorre uma reação entre o ferro e o oxigênio, formando uma camada fina de óxido de ferro na superfície do metal, invisível a olho nu, conhecida como ferrugem. No prolongamento desta exposição a camada de oxidação progride, sendo potencializada na presença de umidade, gerando vazios devido a sua maior porosidade permitindo a penetração de oxigênio e umidade em camadas cada vez maiores, no elemento metálico, e, conseqüentemente, aumenta os níveis de óxido de ferro. Este fenômeno de desgaste natural reduz a seção da estrutura afetada impactando negativamente em sua resistência mecânica com perda de resistência estrutural.

Além de efeitos espontâneos ligados a intempéries, o aço pode ainda, com base em seu uso, ser exposto a diversos de uso sendo um deles a variação para altas temperaturas, como por exemplo: um incêndio. Pavei (2014) demonstra através de um estudo prático realizado em um corpo de prova de aço ASTM A36 que, quando exposto a temperaturas de 750 °C, ultrapassa limites de deslocamentos prescritos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 14323 (ABNT, 2003) além de gerar modificações nas propriedades do material tornando inviável seu uso. Diante do impacto do fogo na resistência do aço, a resistência a altas temperaturas é uma das características importantes para eventos externos.

As propriedades citadas são atingidas com modificações na liga base do aço ou aditivando outros elementos. A modificação no teor de cada elemento ou na adição de um novo impacta de forma positiva ou negativa nas propriedades e resistências da liga. Na Figura 5 é mostrado um compilado do impacto, de forma resumida, do aumento ou redução no teor de participação de cada elemento da liga em suas respectivas propriedades.

Para efeitos de cálculo do aço estrutural e melhor análise de seu comportamento considera-se as seguintes propriedades para este material, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008):

- Módulo de elasticidade, $E = 200 \text{ GPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;

- Módulo de elasticidade transversal, $G = 77 \text{ GPa}$;
- Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- Massa específica, $\rho_a = 7\,850 \text{ kg/m}^3$.

Figura 5 - Propriedades do aço em paralelo ao teor de cada elemento constituinte

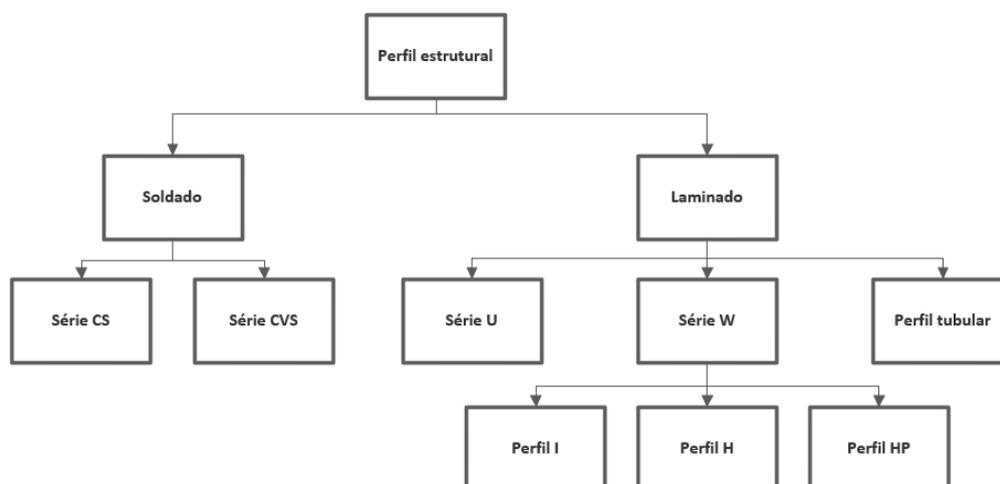
INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES DOS AÇOS									
PROPRIEDADE / ELEMENTO	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ti	Cr	Nb
RESISTÊNCIA MECÂNICA	+	+	+	-	+		+	+	+
DUCTIBILIDADE	-	-		-	-	-		-	-
TENACIDADE	-			-		-			+
SOLDABILIDADE	-	-	-	-	-	-		-	
RESISTÊNCIA A CORROSÃO	-		+		+	+	+	+	
DESOXIDANTE		+	+						

Fonte: Dias (1997).

2.2.3 Tipos de perfis adotados para pilar metálico

Dentre os perfis estruturais disponíveis para execução do pilar, destacam-se duas categorias: os perfis laminados e os perfis soldados. O diagrama abaixo (Figura 6) descreve a divisão dos principais tipos de perfis adotados para pilar metálico.

Figura 6 - Agrupamento dos perfis metálicos por tipo de perfil

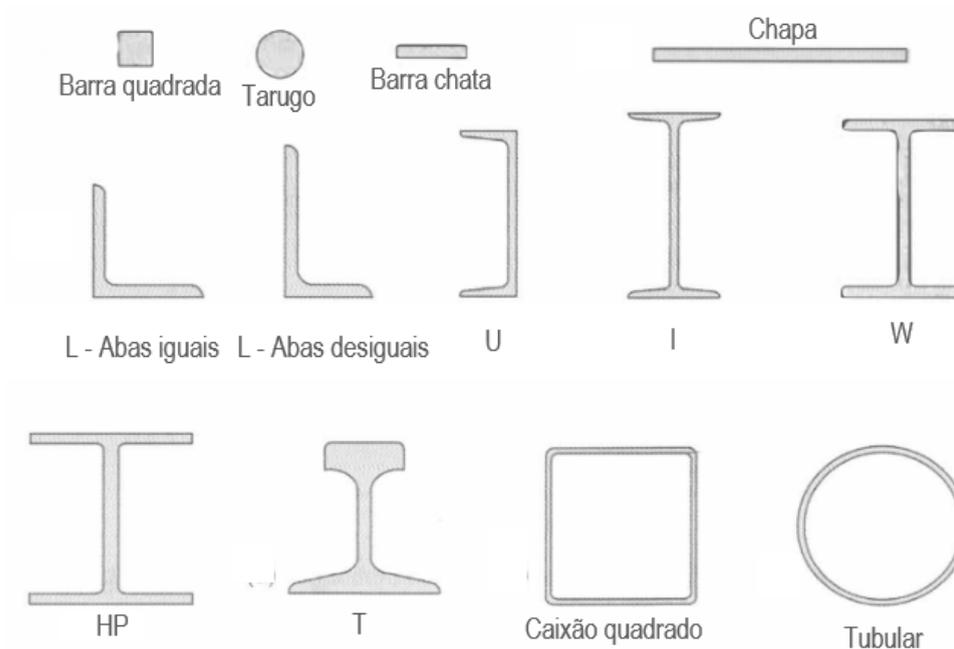


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ressalta-se que o uso de um perfil soldado para execução de um pilar metálico permite a variabilidade na composição do perfil, adotando medidas de alma e mesa normalmente não comercializadas. Além disso, ao soldar a mesa e a alma, é possível criar um novo perfil com propriedades geométricas aprimoradas.

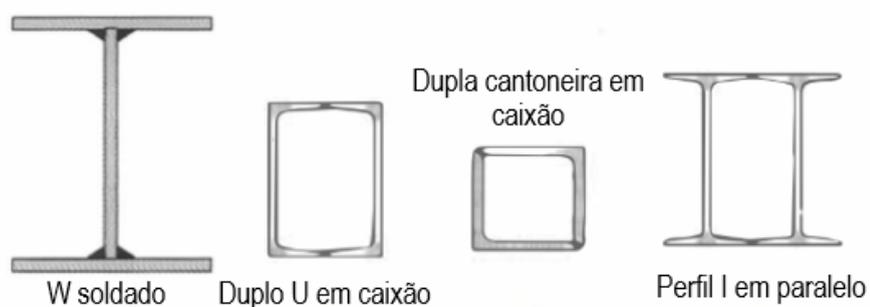
A Figura 7 ilustra seções simples, compostas por um único perfil, seja ele soldado ou laminado. Já na Figura 8, são apresentados exemplos dos arranjos mais comuns na união de dois ou mais perfis por solda, formando seções compostas.

Figura 7 - Seção de perfis laminados do tipo simples



Fonte: Pfeil e Pfeil (2022).

Figura 8 - Seção de perfis laminados do tipo composto



Fonte: Pfeil e Pfeil (2022).

Comercialmente os perfis podem ser apresentados, quando laminados, conforme catálogo disponível por seus fabricantes. Agrupados, de acordo com a Figura 9, os catálogos devem apresentar informações mínimas ao correto dimensionamento e escolha do perfil, a exemplo na tabela a seguir:

Figura 9 - Catálogo de perfis laminado W do tipo I

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X			EIXO Y - Y		
				t _w mm	t _f mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	82	16,4	2,22
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	126	24,7	2,32
W 150 x 22,5(H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1.229	161,7	6,51	387	50,9	3,65
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1.384	173,0	6,63	183	35,9	2,41
W 150 x 29,8(H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1.739	221,5	6,72	556	72,6	3,80
W 150 x 37,1(H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2.244	277,0	6,85	707	91,8	3,84
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,20	87	17,4	2,12
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1.686	166,1	8,19	116	22,7	2,14
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2.029	197,0	8,37	142	27,9	2,22
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2.611	252,3	8,73	330	49,6	3,10
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3.168	301,7	8,86	410	61,2	3,19
W 200 x 35,9(H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3.437	342,0	8,67	764	92,6	4,09
W 200 x 41,7(H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4.114	401,4	8,77	901	108,5	4,10
W 200 x 46,1(H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4.543	447,6	8,81	1.535	151,2	5,12
W 200 x 52,0(H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5.298	514,4	8,90	1.784	174,9	5,16
HP 200 x 53,0(H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4.977	488,0	8,55	1.673	161,7	4,96
W 200 x 59,0(H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6.140	584,8	8,99	2.041	199,1	5,18
W 200 x 71,0(H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7.660	709,2	9,17	2.537	246,3	5,28
W 200 x 86,0(H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9.498	855,7	9,26	3.139	300,4	5,32

Fonte: Mais Gerdau (2023).

2.3 Projeto estrutural: dimensionamento de pilares metálicos

2.3.1 Pilar metálico

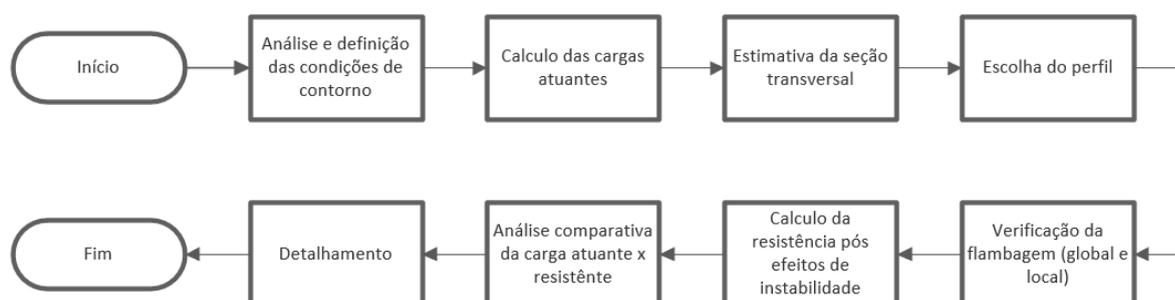
Caracterizado como um elemento vertical, submetido a esforços predominantemente axiais, o pilar é um dos principais elementos presentes no sistema estrutural. Sua principal função é resistir e transmitir cargas proveniente das vigas, lajes, treliças e terças de cobertura aos elementos da fundação.

Para assegurar a segurança e a efetividade da estrutura, é necessário examinar vários elementos ao dimensionar um pilar metálico. Alguns dos principais fatores a serem considerados compreendem a influência das cargas aplicadas, as

tensões presentes, a relação de esbeltez, o risco de flambagem, o impacto dos momentos no componente, as dimensões mínimas requeridas, as condições de suporte e diversos outros aspectos.

Pode-se compreender melhor o passo a passo de dimensionamento de pilares metálicos através da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma para dimensionamento do pilar metálico



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2.3.1.1 Condições de contorno

Define-se, inicialmente, as condições de contorno e as características do pilar metálico. Durante esta etapa, alguns pontos importantes são levados em consideração, como:

- Restrições físicas e detalhes de projeto: análise de impossibilidades físicas que possam restringir algum elemento do pilar, como a medida dos lados da seção, a orientação do pilar ou seu posicionamento;
- Altura: deve ser determinada considerando os requisitos de resistência e estabilidade da estrutura, evitando comprimentos exageradamente longos e esbeltez excessiva;
- Tipo de aço: exige, além de uma avaliação dos critérios de resistência, a verificação de condições especiais, como por exemplo a necessidade de aço mais resistente à corrosão. As principais opções

disponíveis de tipos de aço mais utilizados na construção civil brasileira podem ser observadas na Figura 3 e Figura 6;

- Escolha do perfil: atualmente, os pilares metálicos costumam ser executados em perfil laminado ou soldado. Os perfis laminados são fabricados em escala comercial padronizada, com propriedades geométricas e peso definido, facilitando o dimensionamento, além de serem pré-projetados para evitar a flambagem local. Já os perfis soldados resultam em uma maior flexibilidade na escolha da seção transversal, permitindo executar projetos específicos;
- Vinculação: os apoios utilizados na conexão dos elementos estruturais podem ser classificados conforme seu grau de restrição. Dá-se o nome de apoio móvel para uma restrição, apoio fixo aquele com duas restrições e apoio engastado com três. As condições de vinculações refletem diretamente no comprimento efetivo de flambagem, nos diagramas de esforços solicitantes e nos deslocamentos da peça.

2.3.1.2 Estados limites

Em um contexto geral existem duas abordagens para se dimensionar pilares metálicos: o método das tensões admissíveis e dos estados limites. A NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece o método dos estados limites como base de cálculo para o dimensionamento de elementos estruturais metálicos. Adiante será apresentado uma introdução de ambos os métodos, com explanação mais aprofundada nos estados limites uma vez que deve-se adotar o mesmo conforme apresentado pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

Bellei (2008) define o método das tensões admissíveis como aquele que se baseia na comparação das tensões atuantes em uma estrutura com os valores máximos de tensão que o material pode suportar sem sofrer deformações excessivas ao limites ou falhas críticas. Para isso são permitidos limites de tensão

admissíveis para diferentes materiais e condições de carga. Se as tensões atuantes estiverem abaixo desses limites, considere-se que a estrutura é segura.

Por outro lado, o método dos estados limites considera não apenas as tensões atuantes, mas também outros aspectos, como a capacidade de deformação, a estabilidade e a segurança global da estrutura. Esse método é baseado na definição de limites de desempenho, denominados estados limites, que devem ser respeitados para garantir a segurança da estrutura. Sua metodologia avalia, de modo comparativo, o atendimento de uma estrutura a determinada carga solicitada. Divide-se essa avaliação em duas formas: segurança e serviço. Para Fakury (2016), o estado limite de segurança (Estado limite último - ELU) está diretamente relacionado ao colapso, parcial ou total, da estrutura trabalhando em excesso de carga. A NBR 8681 (ABNT, 2013) relaciona a falha no ELU aos seguintes efeitos:

- Perda de equilíbrio como corpo rígido;
- Ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais;
- Ruptura de um ou mais apoios transformando a estrutura em hipostática;
- Flambagem em regime elástico ou não;
- Ruptura por fadiga.

Para a verificação dos ELUs, utiliza-se a seguinte Equação (1):

$$R_d \geq S_d \quad (1)$$

Onde:

S_d = representa os valores de cálculo dos esforços atuantes (em alguns casos específicos, das tensões atuantes), obtidos com base nas combinações últimas de ações;

R_d = representa os valores de cálculo dos correspondentes esforços resistentes (em alguns casos específicos, das tensões resistentes), obtidos em diversas partes desta norma, conforme o tipo de situação.

Já o estado limite de serviços (ELS) está voltado aos níveis de impacto no uso e conforto do usuário, como por exemplo: deformações e vibrações excessivas. Para verificação do ELS, utiliza-se a Equação (2):

$$S_{lim} \geq S_d \quad (2)$$

Onde:

S_d = representa os valores de cálculo dos efeitos estruturais, calculados com $\gamma_f = 1,0$;

S_{lim} = representa os valores limites adotados para os efeitos de serviço conforme a norma.

2.3.2 Cargas solicitantes

Devido ao importante papel do pilar, sendo este um elemento estrutural fundamental para a estabilidade e segurança dos edifícios e de outras estruturas é essencial compreender as principais cargas às quais ele está submetido e como essa carga influencia no comportamento da estrutura e em seu dimensionamento.

Apesar de sua função como elemento normalmente vertical, um pilar pode estar exposto a carregamentos em ambos os sentidos: horizontal e vertical. Cargas verticais são as mais comuns e previsíveis que atuam sobre os pilares e podem ser classificadas em permanentes ou acidentais, conforme a NBR 6120 (ABNT, 2019).

As cargas verticais do tipo permanente são compostas pelo peso próprio da estrutura, equipamentos fixos e outros elementos instalados na edificação (forro, revestimento ou paredes divisórias, por exemplo). Já as cargas acidentais podem variar ao decorrer do uso da edificação, portanto estão diretamente relacionadas ao tipo da estrutura. Os valores para cargas acidentais podem ser verificados de acordo com a Tabela 2 da NBR 6120 (ABNT, 2019). Este tipo de carga, quando centrada, é tratada como compressão axial simples, pois gera uniformidade compressiva ao longo do elemento. Para cargas excêntricas surge um esforço associado ao momento, porém não detalharemos estes esforços visando focar em cargas centradas.

Por outro lado, cargas horizontais tem sua origem principalmente pela ação dos ventos. Essas cargas exercem forças laterais nos pilares, criando

momentos de flexão e deslocamentos que devem ser cuidadosamente considerados no projeto estrutural e, portanto, será vista separadamente em um tópico mais adiante.

2.3.2.1 Combinação das ações

Os valores calculados das ações devem ser considerados em seu caso mais desfavoráveis para a segurança e, para isso, multiplica-se por um ponderador, conforme a Tabela 1 apresentada abaixo.

Tabela 1 - Coeficientes ponderadores

Combinações	Ações permanentes (γg) ^{ac}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elemento construtivo industrializado e empuxo permanente	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0,00)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0,00)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0,00 (0,00)
	Ações variáveis (γq) ^{ad}					
	Efeitos de temperatura	Ações do vento	Ações truncada	Demais ações variáveis incluindo de uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		

Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00
--------------	------	------	------	------

Fonte: ABNT NBR 8800 (2008).

Reafirma-se que existindo diversas combinações de ações, cada uma deve ser analisada separadamente, selecionando para o dimensionamento a envoltória das situações mais desfavoráveis, ou seja, os casos mais críticos.

2.3.3 Flambagem Global

A flambagem é um fenômeno de instabilidade que acentua os efeitos dos esforços solicitantes em peças sob compressão. Quando a flambagem ocorre ao longo do comprimento de um pilar, denomina-se isto de flambagem global.

Pode-se entender melhor o processo da flambagem através da analogia de uma régua flexível. Se você segurar uma extremidade da régua e aplicar uma força de tração, a régua se esticará ao longo do comprimento e permanecerá relativamente reta, no entanto, se aplicarmos a régua uma força de compressão, paralela a seu eixo longitudinal, tendendo a "esmagá-la" a régua começa a se curvar lateralmente, formando uma curvatura ao longo do comprimento. Essa curvatura é semelhante ao que ocorre em um pilar metálico sob uma carga de compressão elevada, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Pilar metálico sujeito da carga de compressão



Fonte: Pfeil e Pfeil (2022).

Inicialmente, se a carga aplicada a régua for de baixíssimo impacto é possível que essa curvatura não ocorra pois, assim como o pilar, a régua tem um limite de resistência da carga até que a deformação ($P_{cr} \geq P$) ocorra. Leonhardt Euler (1707- 1783), caracterizou esse limite de resistência como carga crítica.

Pode-se definir carga crítica de Euler como a maior carga a que um elemento pode resistir aos efeitos de compressão paralelos ao seu eixo antes que ocorra deslocamentos consideráveis, que causem instabilidade (Pfeil e Pfeil, 2022). Para o cálculo da carga crítica adota-se a seguinte Equação (3):

$$N_c = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2} \quad (3)$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade do material;

I = Inércia da seção transversal;

L = Comprimento da coluna;

K = Coeficiente de flambagem por flexão que depende das vinculações do pilar.

Para elaboração da Equação (6), Euler propôs seis princípios que devem ser considerados, caracterizando sua coluna como idealizada:

- Inicialmente a coluna é perfeitamente reta;
- O material que a compõe tem comportamento linear elástico, regido de acordo com a lei de Hooke;
- Os pinos das extremidades passam pelo centróide da seção transversal;
- A coluna tem liberdade para girar pelos pinos sem que haja fricção, assim, as restrições desses apoios são equivalentes àquelas de uma viga bi-apoiada;
- A coluna é simétrica em relação ao plano xy e qualquer deflexão lateral da coluna ocorrerá neste plano;
- A coluna recebe uma força axial compressiva P aplicada através do pino superior.

Além das preposições de Euler outros fatores podem também interferir na carga crítica de uma coluna, à exemplo pode-se citar as imperfeições

geométricas, tensões residuais e as cargas excêntricas descaracterizando o pilar idealizado por Euler e transformando o pilar em um elemento imperfeito e que, segundo Andrade (2016), não atingirá a carga crítica e colapsando devido os deslocamentos excessivos da flexão.

Andrade (2016) descreve o termo $K * L$ como comprimento de flambagem da coluna ou comprimento efetivo de flambagem (L_{fl}). O coeficiente K está associado ao tipo de apoio que a coluna está fixada, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Coeficiente de flambagem (K)

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de K	0,5	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados para o dimensionamento	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para a condição de apoio		Rotação e traslação impedidas				
		Rotação livre, traslação impedida				
		Rotação impedida, traslação livre				
		Rotação e traslação livres				

Fonte: Andrade, 2016.

A partir dos valores de comprimento efetivo da coluna calcula-se o índice de esbeltez do pilar através da Equação (4). Quanto maior for esse coeficiente, maiores são os efeitos da flambagem global sob esta coluna, devendo limitar-se o índice de esbeltez de pilares metálicos à compressão ao valor de 200 (adimensional).

$$\lambda = \frac{K x L}{r_x \text{ ou } r_y} \quad (4)$$

Onde:

λ = representa o índice de esbeltez;

L = representa o comprimento do pilar;

K = o coeficiente relacionado o tipo de apoio;

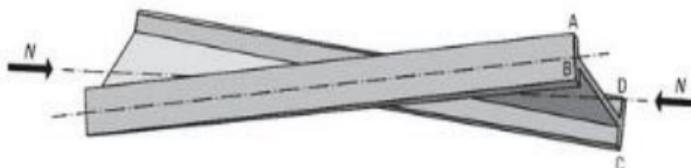
$r_{x,y}$ = o raio de giração na respectiva direção, sendo adotado o de menor valor.

Além da flexão simples, demonstrada acima, há, ainda, outros dois possíveis fenômenos dentro da flambagem:

- O efeito da torção: Caracterizado por uma rotação relativa entre as seções das extremidades da barra, sob ação da força normal de compressão.
- Flexo-torção: Neste caso o efeito de flexão acaba gerando uma rotação do elemento em torno do seu eixo.

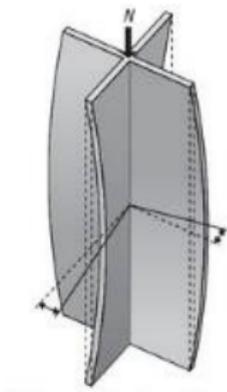
Ambos os efeitos podem ser observados na Figura 13 e 14 (UFPR, 2015). Este trabalho se limitará a analisar um pilar exposto somente aos efeitos de flexão simples.

Figura 13 - Efeito do momento torsor em um perfil metálico



Fonte: Andrade, 2016.

Figura 14 - Perfil metálico sob ação do momento de flexo-torção



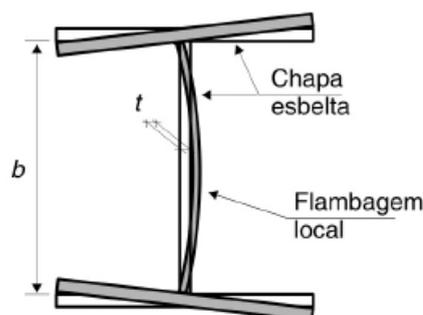
Fonte: Andrade, 2016.

2.3.4 Flambagem local

A flambagem local, como o próprio nome sugere, é caracterizado como a instabilidade localizada nos elementos que constituem o perfil metálico (alma e mesa), observar Figura 15.

Carvalho (2014) ressalta que este efeito, em comparação com a flambagem global, não leva necessariamente o perfil à ruptura, mas a uma redução de sua resistência, portanto lhe é cabível uma parcela da resistência do elemento estrutural.

Figura 15 - Flambagem local na alma e mesa do perfil metálico



Fonte: Andrade, 2016.

Este fenômeno sofre maior influência, assim como na flambagem global, através de sua geometria, neste caso, das dimensões da alma ou mesa. Visto isto, fabricantes de perfis metálicos evitam a minoração da capacidade resistente da seção transversal, adotando perfis com espessuras e dimensões de acordo com limite normativo para cada situação.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) disponibiliza uma tabela para verificação desses limites (Figura 16). Seu uso depende da segmentação dos elementos em duas categorias: AA e AL. Os elementos do tipo AA apresentam vínculo em ambas as extremidades (Apoio-Apoio) enquanto os elementos AL tem apenas um apoio enquanto sua outra borda está livre (Apoio-Livre). A análise é baseada também na relação $\frac{b}{t}$, sendo b o comprimento da chapa e t a espessura.

Figura 16 - Valores da relação $(\frac{b}{t})_{lim}$

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	<ul style="list-style-type: none"> Mesas ou almas de seções tubulares retangulares Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	<ul style="list-style-type: none"> Almas de seções I, H ou U Mesas ou almas de seção-caixão Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AL	3	Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento		$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	<ul style="list-style-type: none"> Mesas de seções I, H, T ou U laminadas Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	Mesas de seções I, H, T ou U soldadas ^a		$0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$
	6	Almas de seções T		$0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

^a O coeficiente k_c é dado em F.2.

Fonte: NBR 8800, ABNT (2008).

Para seções em que $\frac{b}{t} \leq (\frac{b}{t})_{lim}$, $Q = 1$ não havendo reduções na resistência do elemento devido a flambagem local. Para situações em que $\frac{b}{t} > (\frac{b}{t})_{lim}$ deve-se adotar o valor de Q , reduzindo a capacidade resistente do pilar.

2.3.5 Resistência do pilar

A NBR 8800 (ABNT, 2008), refere-se à resistência como capacidade do material de aço resistir às forças aplicadas sobre ele, sem apresentar falhas características ou deformações excessivas que comprometem sua integridade e segurança. Além disto, a referida norma estabelece valores de resistência e critérios de dimensionamento para garantir a estabilidade e a segurança das estruturas de aço.

De acordo com os procedimentos normativos, pode-se obter a resistência à compressão de cálculo para pilares metálicos utilizando a Equação (5) disponibilizada pela NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$N_{c, Rd} = \frac{\chi^* Q^* A_g^* f_y}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

Onde:

χ = fator de redução associado à instabilidade provocada pela flambagem global da coluna;

Q = fator redutor associado à flambagem local, é obtido pela multiplicação dos efeitos de flambagens locais nos elementos enrijecidos e não-enrijecidos que formam a seção transversal do perfil;

A_g = área bruta da seção transversal da barra;

f_y = resistência ao escoamento do aço escolhido;

γ_{a1} = coeficiente de segurança para flambagem (adotar 1,1).

Os fatores ponderadores χ e Q , ligados diretamente à instabilidade global e local, respectivamente, são as representações a favor da segurança que prescrevem reduções ante a ocorrência da flambagem no pilar.

No sentido de permitir a comparação entre as resistências de perfis com diferentes aços, o fator redutor x deve estar associado ao índice de esbeltez reduzido, para isso a NBR 8800 (ABNT, 2008) adota a curva 2P (curva única de flambagem) que pode ser descrita como a relação entre χ e o índice de esbeltez reduzido λ_0 (PFEIL; PFEIL, 2021). Pode-se definir seu valor através das Equações (6) ou (7) para os aços do tipo ABNT MR250 e ASTM A36:

$$\text{para: } \lambda_0 \leq 1,5 \quad x = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (6)$$

$$\text{para: } \lambda_0 > 1,5. \quad x = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

O índice de esbeltez reduzido pode ser definido através da seguinte Equação (8):

$$\lambda_0 = 0,0113 * \frac{KL}{i} \quad (8)$$

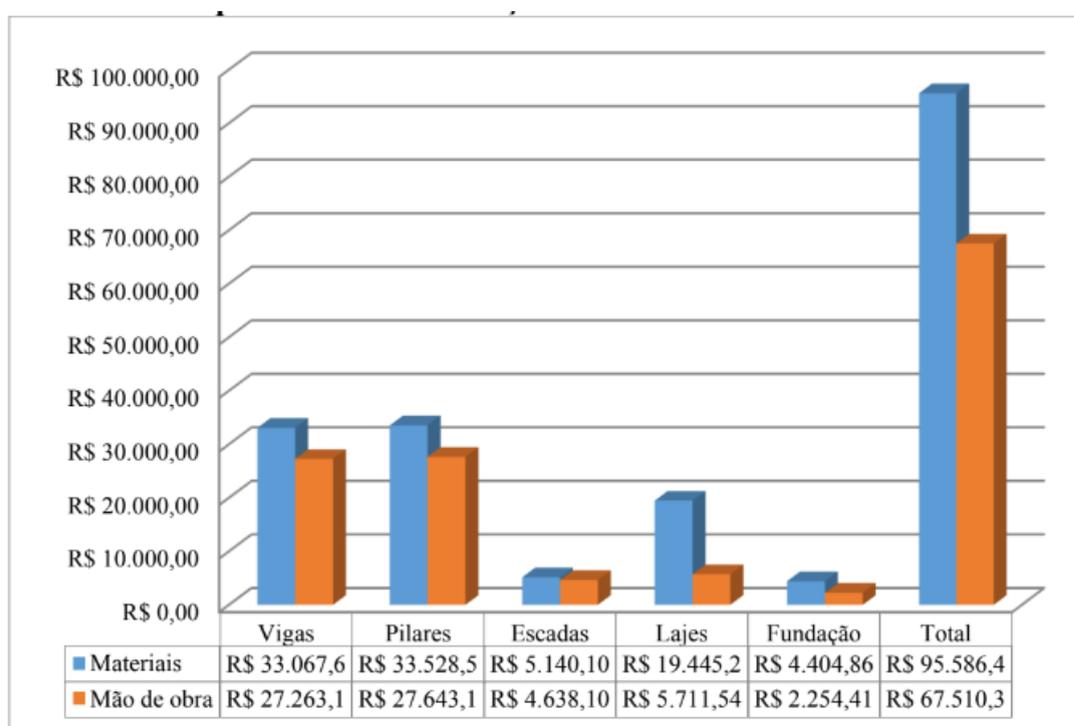
2.3.6 Custo do pilar

O custo de um pilar metálico pode variar a depender de diversos fatores, como a disponibilidade de matéria-prima e os processos de produção. Por ser um produto de processo siderúrgico o aço estrutural já tem certo valor agregado, pois estes processos de produção demandam investimentos, além disto ainda há o custo da extração dos minérios do solo.

Pode-se citar também como um fator externo de impacto no custo do aço, o conflito entre Rússia e Ucrânia que elevou substancialmente o valor do gás natural. É importante ressaltar que a Rússia é um dos principais produtores do insumo (COELHO, 2022). A presença do gás no processo de produção tem relevância significativa, conforme citado no processo de produção do aço, e sua substituição por outras fontes de energia para o processo de queima pode não ser a melhor saída.

No contexto estrutural, ressalta-se a análise realizada por Da Paz (2019). Seu estudo traz um comparativo orçamentário da construção de um mesmo edifício sob a ótica de diferentes sistemas estruturais: concreto armado e estruturas metálicas. Assim, seu trabalho nos expõe uma tabela comparativa entre os valores destinados a cada etapa estrutural para ambos os métodos. Na Figura 17 é mostrado o custo de diferentes elementos estruturais, considerando o edifício em estrutura metálica, em face ao custo total da construção da edificação.

Figura 17 - Comparativo de custo entre diferentes etapas construtivas utilizando estrutura metálica



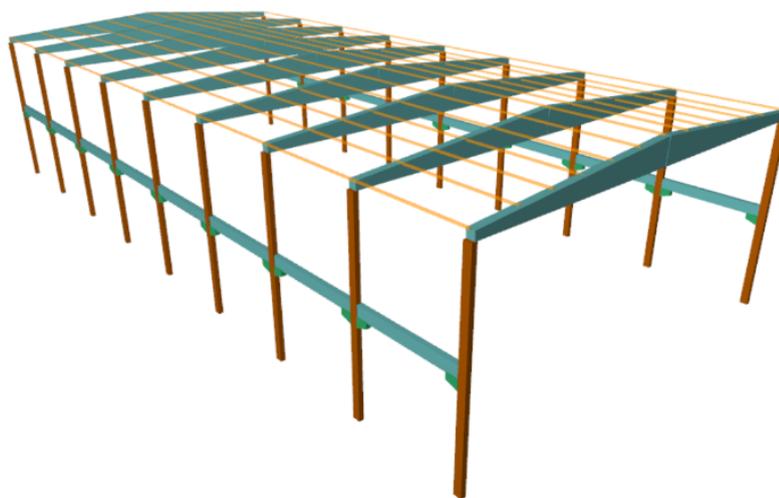
Fonte: Da Paz (2019).

O trabalho desenvolvido por Da Paz (2019) leva em consideração um edifício residencial de 142 m², composto de três andares e uma garagem, com alternância do método construtivo estrutural mantendo fixo o material para vedação, revestimento, esquadrias e cobertura. Sua execução foi realizada na cidade de Xanxerê, Santa Catarina.

Queiroz (2020) realizou um estudo comparativo entre a utilização de concreto pré-moldado e estruturas metálicas para construção de um galpão, em João Pessoa, Paraíba (Figura 18). Sua estimativa orçamentária foi elaborada com

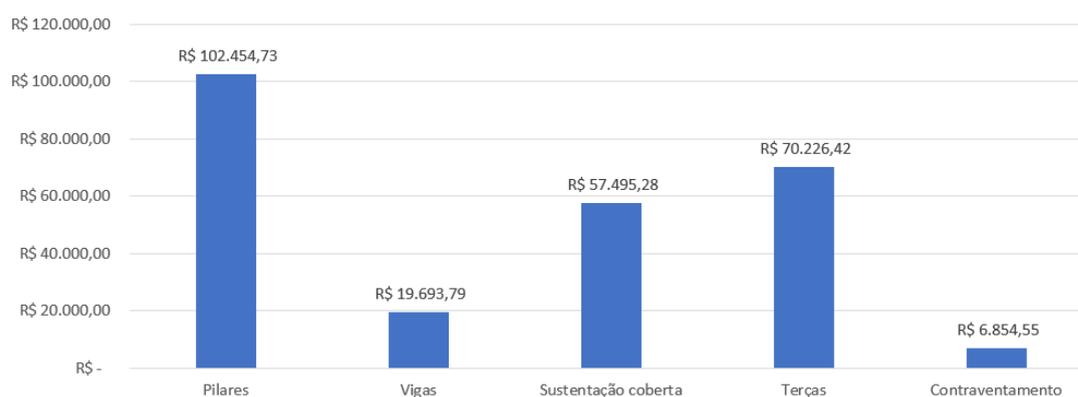
base nos preços da SINAPI e nos cadernos técnicos de composições para estruturas metálicas da Caixa Econômica Federal (CEF). Observa-se, também neste projeto, que o pilar metálico se sobressai entre os outros elementos, representando 39,9% do custo total da estrutural (Figura 19).

Figura 18 - Concepção estrutural de um galpão em concreto pré-moldado e estruturas metálicas



Fonte: Queiroz (2020).

Figura 19 - Composição de custos dos elementos estruturais de um galpão metálico



Fonte: Adaptado pelo autor, Queiroz (2020).

É possível observar a relevância do custo de pilares metálicos em comparativo com outros elementos. Assim, processos de otimização que visem

diminuir o gasto com a melhor escolha de perfis impactam significativamente o orçamento da obra.

2.4 Otimização de estruturas metálicas com uso de algoritmos

2.4.1 Conceito inicial de otimização

O processo de otimização pode ser entendido como a busca da melhor solução possível para determinado problema através do equilíbrio entre recurso disponível e desempenho (Olivieri, 2004). Tratando-se da otimização de um produto, processo ou serviço pode-se dizer, matematicamente, que estamos maximizando ou minimizando funções.

De acordo com Cortês (2010), em problemas de otimização há a necessidade de identificar as variáveis envolvidas e seus limites de variação, bem como os parâmetros relevantes ao problema, de maneira a poder equacioná-las em relações matemáticas, com o objetivo de representar formalmente o problema e suas restrições, para então buscar a solução.

Os problemas de otimização podem ser representados de maneira geral conforme a Equação (9) a seguir. A função pode ser utilizada, também, para maximizar um resultado multiplicando por -1 (GILL, 2019):

$$\text{Minimizar: } f(x) \tag{9}$$

$$\text{Sujeito à: } c(x) \leq 0; \quad ceq(x) = 0; \quad lb < x < ub; \quad x_0$$

Onde:

$f(x)$ = função objetivo que deverá ser minimizada ou maximizada;

$c(x) \leq 0$ = restrições. Inequações que devem ser atendidas;

$ceq(x) = 0$ = restrições. Equações que devem ser atendidas;

lb = vetor de limites inferiores;

ub = vetor de limites superiores;

x_0 = ponto inicial das iterações.

O processo de otimização pode ser classificado em 3 categorias: topológica, de forma ou paramétrica. O tipo de otimização depende do parâmetro a se otimizar e a escolha do tipo de otimização a ser aplicado pode levar em consideração as variáveis disponíveis e as restrições impostas ao problema. É possível observar em Alves (2018), a aplicação dos 3 tipos de otimização para a estrutura de uma torre de linha de transmissão.

Na otimização topológica trabalha-se com a modificação e reorganização dos elementos estruturais, distribuindo cargas, sua densidade ou potencializando a rigidez do elemento. Sua utilização pode ser exemplificada no sistema de treliças, onde se alteram as disposições das diagonais ajustando seu ângulo ao nó e redistribuindo cargas ao longo de todo o sistema, ou em um sistema de rede de sinais onde o sistema é otimizado a alocar os melhores pontos de nós para se instalar um roteador e distribuir o sinal no ambiente.

Já na otimização de forma ou dimensional há uma alteração geométrica do elemento que busca melhorar sua eficiência. Pode-se citar aqui o aprimoramento em asas de avião que sofrem ajuste em sua geometria buscando uma melhor aerodinâmica, reduzindo o arrasto do vento e melhorando a sustentação da aeronave.

Por outro lado, a otimização paramétrica interfere diretamente nas variáveis do elemento como: diâmetro, espessura e o tipo de material. Pode-se observar este tipo de otimização quando se faz alterações nos elementos de alma e mesa de um perfil metálico submetido a um carga, visando reduzir seu custo, ou em sua altura, impactando diretamente em sua flambagem.

2.4.2 Algoritmo de otimização

Segundo Kapelinski (2018), algoritmos de otimização são ferramentas matemáticas utilizadas de forma iterativa, comparando várias soluções possíveis, até que uma solução ótima, ou pelo menos satisfatória, seja encontrada.

A classificação apresentada por Hassanien (2018) não só relaciona a origem dos algoritmos como introduz brevemente sua metodologia de execução. As classificações, segundo sua obra, podem ser listadas em 3 categorias, com base em sua inspiração de origem:

- Inspiração física e química: Nesta categoria os algoritmos são desenvolvidos com inspirações nas leis da física e química, como é o caso do Algoritmo por recozimento simulado (SA) que se baseia nas propriedades termodinâmicas do resfriamento de sólidos;
- Inspirações matemáticas e lógicas: Os algoritmos matemáticos se baseiam puramente em princípios matemáticos, da álgebra linear e integração. Para esta classificação pode-se citar o Método dos elementos finitos (MEF);
- Inspiração biológica: Aqui enquadram-se os algoritmos elaborados com base nas observações dos fenômenos da natureza. O desenvolvimento destes algoritmos tenta imitar o movimento de animais, como o Algoritmo dos pássaros (PSO), ou o Algoritmo das formigas (ACO). que tenta simular a capacidade das formigas em criar caminhos eficientes entre seu formigueiro e a fonte de alimentos. Por isso estes algoritmos são conhecidos como algoritmos bioinspirados.

As inspirações de algoritmos bioinspirados emergiram das observações do comportamento animal em meio coletivo, seu modelo de auto-organização e compartilhamento mútuo de informações entre indivíduos nos permitiram fontes de modelos comportamentais que posteriormente foram convertidos em equações matemáticas adaptáveis a problemas reais (BONABEAU *et al*, 2014)

O avanço significativo neste campo de pesquisa lançou bases significativas para o desenvolvimento contínuo de algoritmos que se inspiram nestes processos naturais. Alguns exemplos notáveis desses algoritmos incluem:

- Algoritmo Genético (AG): É inspirado no processo de evolução biológica e utiliza técnicas da evolução por adaptação como seleção natural, recombinação, hereditariedade e mutação que geram novas

populações de indivíduos(soluções) e evoluí-las ao longo de várias gerações, buscando a solução ótima ();

- Otimização por Colônia de Formigas (ACO): é inspirado no comportamento das formigas de construir o caminho mais curto entre a colônia e a fonte de alimentos através de feromônios depositados em suas trilhas, sendo esses caminhos. Sua comunicação entre outras formigas acontece através de um feromônio que é despejado pelo caminho percorrido que serve de orientação para as outras formigas. (Dorigo *et al*, 1996). Por sua natureza de encontrar o caminho mais curto ou a rota mais eficiente, o algoritmo é muito implementado em sistemas de rotas como é o exemplo no clássico problema do caixeiro viajante;
- Otimização por Enxame de Partículas (PSO): é baseado no comportamento coletivo de um enxame de partículas, onde cada uma representa uma solução candidata, e elas se movem pelo espaço de busca com base em sua melhor posição anterior e na melhor posição encontrada por qualquer outra partícula no anexo. (KENNEDY E EBERHART, 1995);
- Otimização por Algoritmo de Vagalume (FA): é inspirado no comportamento de vagalumes na busca por alimentos, assim utilizam a intensidade da luz como fator atrativo ao acasalamento ou alimentação (YANG, 2009);

Esses avanços destacam como a natureza continua a servir de inspiração para a criação de algoritmos eficazes que abordam uma variedade de problemas de otimização.

Durante o desenvolvimento dos estudos da natureza aplicados a algoritmos, uma subcategoria foi elaborada: A inteligência de enxame (Swarm Intelligence - SI). (BONABEAU *et al*, 1999). Quando Beni e Wang (1993) introduziram este termo, buscavam descrever um comportamento adotado na robótica de padronização na execução, adaptação e homogeneidade das variáveis e inspiraram-se no coletivo de insetos que descrevia bem. Este conceito

recém-nomeado segmentou a categoria de bioinspirados em duas: Algoritmos com conceito de SI ou somente bioinspirados.

Os algoritmos bioinspirados que se apoiam na SI, como o PSO, são caracterizados pelo seu foco na colaboração e na interação entre agentes ou partículas, emulando o comportamento de criaturas sociais, como observado por Kennedy e Eberhart (1995). Por outro lado, algoritmos bioinspirados não baseados nessa abordagem, como o AG, tendem a seguir um paradigma diferente, com ênfase na seleção, recombinação e mutação de soluções candidatas, sem considerar diretamente a cooperação entre indivíduos (SAMPSON, 1976).

A SI refere-se ao comportamento coletivo dos agentes, que compartilham informações e influenciam seus pares à medida em que se alocam em posições mais favoráveis, emulando o comportamento de criaturas sociais (LIU E PASSINO, 2000). Este fator influencia positivamente um algoritmo pois acrescenta, além dos parâmetros fundamentais de função objetiva, variáveis e restrições, os conceitos de interatividade entre indivíduos e fator de aleatoriedade.

A interatividade entre variáveis permite que, durante o processamento dos dados, as variáveis do problema possam comunicar-se compartilhando dados e direcionando para uma possível solução ótima. Essa interação orienta a partícula a uma nova posição com base em seus dados e nos dados de partículas próximas, como é o caso do enxame de pássaros ou do cardume de peixes. Este processo, de benefício mútuo, potencializa o indivíduo e o coletivo (YANG, 2010).

Já o fator de aleatoriedade é inserido como uma constante a ser ajustada. Sua presença no algoritmo possibilita que, de tempos em tempos, sejam gerados novos valores de saídas para a mesma entrada, e isto auxilia no contorno de situações em que os algoritmos caem em mínimos ou máximos locais. (HASSANIEN, 2018).

Entretanto, além das classificações já mencionadas, os algoritmos podem ser ainda classificados quanto a sua natureza em determinísticos e estocásticos. Os métodos determinísticos são caracterizados por um modelo matemático que determina os resultados, exatamente, a partir das condições iniciais, ou seja, dada uma certa entrada o mesmo apresenta a única saída repetidamente, (Pereira, 2020). Em contraponto, algoritmos estocásticos estão

diretamente ligados à aleatoriedade com possibilidade na variação do resultado final para a mesma entrada. Yang (2010) atribui que essa mudança ocorre pois este tipo de algoritmo conta com números pseudo-aleatórios que geram mutações, interferindo diretamente no caminho que a variável irá percorrer.

2.4.2.1 Variáveis

As variáveis representam parâmetros que podem ser ajustadas para atender a uma determinada métrica. A origem das variáveis está diretamente relacionada às características do elemento a ser otimizado, como a espessura de um pilar, a altura ou a área da seção transversal. Para problemas de otimização, podem ser adotadas quantas variáveis necessárias para resolução do algoritmo, no entanto, a quantidade e complexidade dessas variáveis têm impactos no tempo de otimização e na complexidade da função objetivo e, por este motivo, os critérios de escolhas devem ser bem definidos de acordo com a afinidade da variável com o problema bem como o controle no quantitativo de variáveis envolvidas, evitando um sistema muito complexo. (SILVEIRA *et al*, 2014).

Além disso, é importante destacar que essas variáveis podem ser classificadas quanto ao valor que assumem. Variáveis do tipo contínua podem assumir qualquer valor real, como valores contábeis. Por outro lado, variáveis do tipo discreto são limitadas a valores pré-estabelecidos. Neste contexto, há também variáveis mistas, que combinam características de ambas as categorias. A representação das variáveis no algoritmo de otimização pode ser expressa por:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (10)$$

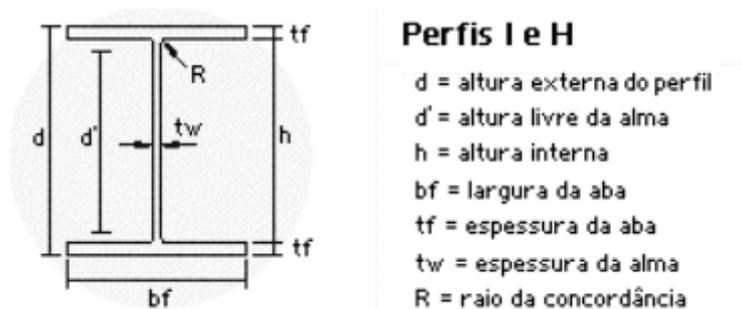
Onde:

n representa o número de variáveis envolvidas na otimização.

Pode-se citar como exemplo de variáveis, os fatores geométricos dos perfis metálicos, pois suas propriedades de acordo com suas dimensões

estabelecidas pelos fabricantes de aço influenciam em todo o seu processo de dimensionamento do elemento estrutural, conforme observado na Figura 20.

Figura 20 - Parâmetros geométricos de perfil metálico



Fonte: Gerdau (2018).

2.4.2.2 Função objetivo

A função objetivo é o componente central no algoritmo de otimização, sendo responsável por representar matematicamente a característica ou critério que será otimizado relacionando o conjunto de variáveis envolvidas, sendo representada conforme a Equação 10. De acordo com Arora, (2004), o primeiro passo na otimização de um problema é desenhar o escopo do produto deixando claro seu objetivo final e, para isso, a função objetiva é o parâmetro utilizado para mensurar o quão próximo o objetivo foi atingido.

Pode-se citar que o objetivo de um problema fosse ajustar a geometria das caixas que utilizam para transportar produtos em embalagens cilíndricas, nesta situação a função objetiva pode ser considerada como o volume da embalagem que deve ser minimizado. Para este caso a função objetiva é matematicamente clara, entretanto, para Deb, (2012) nem sempre é possível medir diretamente aquilo que se deseja otimizar, como o nível de acessibilidade ou satisfação de um cliente com atendimento. Para estes casos pode-se utilizar-se uma série de equações matemáticas envolvendo outros parâmetros a fim de consolidar um indicador que será usado para mensurar o desempenho de um conjunto de

configurações ou soluções candidatas em relação às variáveis definidas e das restrições impostas.

Outro importante ponto a se destacar é que em um problema de otimização real pode haver mais de uma função que se deseje otimizar simultaneamente. Neste caso a representação do problema passará a ser multicritérios, isto é, o objetivo será a maximização e/ou minimização de dois parâmetros simultâneos e sua função ficará:

$$f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n) \quad (11)$$

Onde:

f_1, f_2, \dots, f_n são as funções objetivas individuais, cada uma representando um critério específico que será otimizado e x permanece como variável da função.

2.4.2.3 Restrições e penalidades

Ao adaptar um algoritmo otimizador, um dos cuidados é a verificação das restrições do objeto uma vez que as restrições estão diretamente ligadas às características funcionais e devem ser satisfeitas. Analisar e entender as restrições é fundamental para o êxito da otimização.

Os tipos de restrições classificam-se em duas categorias: restrições de igualdade e restrições de desigualdades. As restrições de igualdade indicam que o valor da restrição devem corresponder exatamente a um valor, isto é:

$$f(x) = z \quad (12)$$

sendo $z \in \mathfrak{R}$

Em Deb (2012) é destacado que as restrições de igualdade elevam o grau de complexidade do problema e para isso podem ser convertidas em relações de desigualdades, adaptando a restrição (16) para duas outras restrições:

$$f(x) \geq z \text{ e } f(x) \leq z \quad (13)$$

sendo $z \in \mathfrak{R}$

Como regra prática na elaboração dos algoritmos, é essencial manter a quantidade de restrições de igualdade complexas o mais baixas possíveis.

Faz-se uso destas restrições sempre que necessário manter valores específicos dentro de certos mínimos ou máximos que não podem ser ultrapassados, como a resistência mínima de uma seção de aço. Ao ultrapassar a restrição é aplicado um coeficiente de ajuste ao valor a fim de garantir que a solução atenda às restrições e seja a mais próxima do ótimo quanto possível.

É possível extrair que o algoritmo considera a restrição imposta como um limitador (o que de fato é) porém, em termos de código de programação, a restrição é utilizada como um parâmetro para realizar pequenos ajustes, uma calibragem, no valor obtido para que permaneça dentro dos limites impostos inicialmente e, para isso, existem três maneiras de lidar com este ajuste: abordagem direta, multiplicadores de Lagrange e método de penalidade.

A abordagem direta pretende encontrar as regiões viáveis delimitadas pelas restrições. Isso geralmente é difícil, exceto em alguns casos especiais. Numericamente, pode-se gerar uma solução potencial e verificar se todas as restrições são satisfeitas. Se todas as restrições forem atendidas, então é uma solução viável e a avaliação da função objetivo pode ser realizada. Se uma ou mais restrições não forem satisfeitas, essa solução potencial é descartada e uma nova solução deve ser gerada. Em seguida, procedemos de maneira semelhante. Como podemos esperar, esse processo é lento e ineficiente. Uma abordagem melhor é incorporar as restrições de modo a formular o problema como irrestrito. O método do multiplicador de Lagrange tem base matemática rigorosa, enquanto o método da penalidade é simples de implementar na prática.

2.4.3 Algoritmo de vaga-lumes

O algoritmo de vagalumes, também conhecido como "*Firefly Algorithm*" ou FA, representa um dos vários algoritmos de otimização bioinspirados. Seu conceito de otimização foi idealizado por Yang (2009), em seu artigo *Firefly*

Algorithms for Multimodal Optimization, apresentando-o como uma forma mais eficiente de problemas multimodais em comparação ao algoritmo de PSO, agindo sob o conceito de inteligência de enxame.

Sua inspiração é baseada no comportamento dos vaga-lumes na natureza com sua busca por alimentação e no encontro de parceiros para o acasalamento utilizando sua bioluminescência. Este algoritmo faz parte do campo de otimização baseada em natureza, onde se busca soluções para problemas complexos, modelando o comportamento de organismos ou fenômenos naturais.

O conceito fundamental por trás do algoritmo de vaga-lumes é a simulação do comportamento de vaga-lumes em seu processo de atração mútua na busca por parceiros. Na natureza, os vaga-lumes emitem sinais de bioluminescência como um meio de comunicação e atração. Eles ajustam a intensidade de sua luz para atrair parceiros, com o objetivo de maximizar sua capacidade de reprodução ou de repelir predadores. Para isto Yang (2009) estabelece 3 regras básicas iniciais:

1. Todos os vaga-lumes serão atraídos por cada um dos outros, independente do seu sexo;
2. A atratividade dos vaga-lumes é diretamente proporcional ao seu brilho, e ambos se reduzem com o aumento da distância entre eles. Um vaga-lume de menor brilho irá se mover na direção de um vaga-lume de maior brilho. Em nenhuma hipótese um vaga-lume menos brilhante pode atrair um vaga-lume mais brilhante do que ele. Este brilho é determinado pela função objetivo;
3. Caso não haja um vaga-lume mais brilhante do que um determinado vaga-lume, este se moverá aleatoriamente.

Partindo destas 3 regras iniciais Yang (2009) ressalta 2 conceitos fundamentais na formulação deste algoritmo: A intensidade do brilho e a atratividade entre os vaga-lumes.

A atratividade do brilho de cada vaga-lume pode ser definido através da Equação (14):

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, m \geq 1 \quad (14)$$

Onde:

r é a distância entre dois vaga-lumes;

β_0 é a atratividade inicial em $r = 0$ e γ o coeficiente de absorção.

Vale ressaltar que a atratividade é relacionada à percepção do observador em relação à fonte luminosa e, portanto, sofre influência do meio em que está inserido. Yang (2009) aponta que a influência do meio nos efeitos luminosos está correlacionado com a atratividade e comunicação entre vaga-lumes, pois sua fonte luminosa sofre absorção do meio, que, no ponto de vista de outro observador, tem sua intensidade luminosa reduzida. A interferência do meio no grau de atratividade é representado pelo coeficiente de absorção γ .

Além do meio, a atratividade é influenciada pela distância entre a fonte e o observador. Este fato pode ser observado na Equação (15), onde se representa a intensidade luminosa que é inversamente proporcional à distância entre vaga-lumes.

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (15)$$

Onde:

I_s representa a intensidade da fonte;

r a distância entre dois vaga-lumes.

A Equação (15) pode ser ajustada adotando γ como uma constante e realizando uma aproximação gaussiana (YANG, 2010), tem-se:

$$I = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (16)$$

Onde:

I_0 representa a intensidade de luz inicial;

e representa o número de euler;

γ o coeficiente de absorção.

Já distância r entre vaga-lumes, que é dada por:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (17)$$

Onde:

$x_{i,k}$ representa o componente de coordenada espacial;

x_i representando vaga-lume.

2.4.4 População inicial

Além das características individuais de cada vaga-lume é importante destacar o conjunto dos indivíduos dentro do código que podem ser tratados como população inicial. Cada candidato gerado é tratado como um vaga-lume, isto é, um membro da população, e representa uma possível solução ao problema. Estes candidatos realizarão rodadas de interações, buscando sempre o candidato mais atraente, com base na função objetiva, na intensidade luminosa e no brilho emanado. Traduzindo para um conceito de otimização de pilares, cada vaga-lume representaria um pilar solução, e este é composto por 4 variáveis geométricas de um perfil W: to, tf, ho, bf.

É possível observar, nos estudos de Lukasik (2009), o relevante impacto positivo do aumento da população inicial no resultado final do algoritmo, todavia há, também, perda de processamento de dados.

2.4.5 Interação entre candidatos

A interação entre candidatos é a etapa central do algoritmo de vaga-lumes. Nesta etapa, cada vaga-lume (pilar candidato) é atraído por outro vaga-lume mais brilhante, isto é, o candidato mais atrativo. A atratividade de cada candidato foi calculado com base na equação proposta por YANG, 2008:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, m \geq 1 \quad (18)$$

Onde:

β_0 é a atratividade inicial, quando $r = 0$;

r é a distância entre dois vaga-lumes, que foi calculada a partir da Equação (17).

Cada interação funciona como um processo, onde o pior candidato percorre o espaço amostral dos vaga-lumes vizinhos buscando sempre o melhor candidato, isto é, o mais luminoso. A busca pelos melhores candidatos faz parte de um processo da inteligência de enxame onde a comunicação entre candidatos impacta e orienta diretamente ao melhor resultado.

2.4.6 Processo de otimização de pilar metálico via algoritmo de enxame

O processo de otimização via algoritmo de enxame envolve a criação de uma população inicial de soluções aleatórias para o problema que são avaliadas quanto ao seu desempenho em relação ao critério objetivo. O processo de otimização de pilares metálicos usando o algoritmo de enxame pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Definir o problema de otimização: estabelece qual é o objetivo da otimização, como maximizar a resistência à recuperação, minimizar o peso ou reduzir o custo de produção. Também é necessário definir as restrições e limitações do problema, como tamanho mínimo ou máximo do pilar, limitação de materiais, entre outros.
2. Modelar o problema: cria um modelo matemático que represente o problema de otimização. O modelo deve incluir todas as variáveis, restrições e objetivos do problema.
3. Escolher o algoritmo de enxame: dentre os vários algoritmos de enxame, como o PSO, o Algoritmo das Abelhas Artificiais (ABC) e o Algoritmo de Otimização do Vagalume (FA). É necessário escolher o algoritmo mais adequado para o problema em questão.
4. Definir os parâmetros do algoritmo: cada algoritmo de exame possui parâmetros específicos que precisam ser ajustados. Como por

exemplo: o tamanho do enxame, o número de iterações, o fator de inércia e os limites de velocidade e posição das partículas.

5. Implementar o algoritmo: o código do algoritmo deve ser capaz de ler o modelo matemático e executar o algoritmo para encontrar a solução ótima.
6. Avaliar a solução: por fim, é necessário avaliar a solução encontrada. É importante verificar se a solução é viável e atende a todas as restrições do problema. Também é necessário avaliar se a solução é a mais adequada.

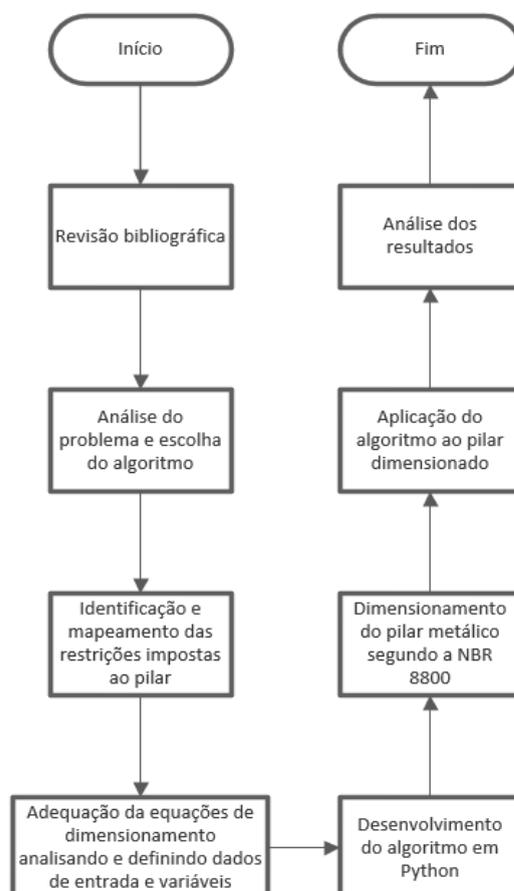
No dimensionamento de pilares metálicos, os parâmetros a serem minimizados podem incluir a geometria do perfil, a espessura das paredes, a seção da estrutura, peso ou mesmo maximizar a resistência, combinando parâmetros, com restrições relativas à segurança, normas técnicas, dimensões mínimas, condições de conforto etc. Assim, a seção encontrada (solução) seria a mais econômica e eficiente.

3 METODOLOGIA

Visando atingir ao objetivo proposto do trabalho é realizado a revisão bibliográfica e cálculos de dimensionamento de um pilar metálico para uma configuração pré-definida. Em seguida elabora-se um mapeamento dos principais pontos de impacto para a criação de um algoritmo, isto é, a seleção das principais variáveis envolvidas, as restrições normativas e a escolha da função objetivo a se otimizar (ARORA, 2004 e DEB, 2010). Desse modo é possível otimizar os perfis, pois quanto menor a área linear determinada do pilar, menor será o consumo e por conseguinte o seu custo.

O processo descrito pode ser melhor verificado através do fluxograma (Figura 21) a seguir:

Figura 21 - Fluxograma para a otimização de pilar metálico via algoritmo de enxame



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Entretanto, adaptar e aplicar um algoritmo de otimização requer conhecimento sobre as características do problema ou produto a ser otimizado, isto é, ter ciência de suas variáveis e restrições. É necessário certo planejamento e, para isso, Arora (2012) sugere um roteiro de etapas para que se organize o problema e adapte o algoritmo a realidade do produto a ser otimizado, que pode ser resumido nos seguintes pontos:

- Declaração do projeto;
- Coleta de dados e informações do projeto;
- Identificação das variáveis;
- Identificação do critério a ser otimizado;
- Identificação das restrições.

Já para Deb (2012) o roteiro do problema pode ser entendido como:

- Necessidade de otimização;
- Escolha das variáveis do projeto;
- Formulação das restrições;
- Formulação da função objetiva;
- Configuração dos limites de variáveis;
- Escolher um algoritmo de otimização;
- Obter resultados.

Ambos os modelos de roteiro apresentam semelhança com Deb (2012) introduzindo a etapa de escolha do algoritmo após o perfeito entendimento do problema enquanto Arora (2012) já sugere um roteiro partindo do pressuposto que já se sabe qual algoritmo utilizar. Para este trabalho, com o intuito de atingir aos objetivos, é adotado uma composição entre os dois roteiros, acrescentando alguns pontos, utilizando o seguinte processo:

- Definição do problema modelo;
- Identificação das variáveis;
- Identificação das restrições;
- Definição da função objetivo;
- Configuração dos limites;

- Pré-dimensionamento manual de um pilar metálico utilizando tabela de laminados;
- Dimensionamento do pilar metálico utilizando o código de algoritmos;
- Comparação entre ambos.

Em seguida, com uso do algoritmo de FA, realizou-se a otimização do pilar metálico apresentando quantas soluções possíveis para as condições impostas e, ao final, verifica-se o impacto, na redução de peso, do pilar inicial em comparação ao modelo otimizado. Yang (2009) resume o fluxo do algoritmo seguindo a lógica de programação vista na Figura 22.

Figura 22 - Código genérico do algoritmo de vaga-lumes

Algoritmo 5: Algoritmo do Vaga-lume

```

1 início
2   Definir o número de dimensões  $d$  do problema;
3   Definir a função objetivo  $f(x), x = (x_1, \dots, x_d)^T$ ;
4   Definir o número de indivíduos e o número máximo de gerações;
5   Gerar uma população inicial de  $n$  vaga-lumes  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ;
6   Definir o coeficiente de absorção de luz  $\gamma$ ;
7   Intensidade de luz  $I_i$  em  $x_i$  é determinada por  $f(x_i)$ ;
8   Avaliar os vaga-lumes da população inicial usando a função objetivo;
9   repita
10    para cada vaga-lume  $i$  faça
11      para cada vaga-lume  $j$  faça
12        se  $(I_i < I_j)$  então
13          | Mover o vaga-lume  $i$  em direção ao vaga-lume  $j$ ;
14        fim
15      Variar a atratividade com distância  $r$  por  $\exp[-\gamma r]$ ;
16      Calcular novas soluções e atualizar a intensidade de luz;
17    fim
18  fim
19  Ordenar os vaga-lumes e encontrar a melhor solução global;
20  até critério de parada ser atingido;
21 fim

```

Fonte: Adaptado pelo autor, YANG, 2009

3.1 Definição do problema modelo

Para desenvolvimento e teste do algoritmo foi desenvolvido uma situação modelo, com carga fictícia, altura e condição de apoio fixos, alternando parâmetros de entrada no algoritmo de vaga-lumes, conforme observado abaixo:

Problema modelo:

Esforço solicitante de cálculo $N_{sd} = 1172$ kN;

Comprimento do pilar $L = 3,6$ m;

Condição de apoio $K = 1,0$ (pilar birotulado);

População inicial = [25;50;75;100;200];

Quantidade de interações = [125;250;375;500;1000].

Os valores de entrada do esforço solicitante de cálculo, do comprimento do pilar e da condição do apoio visam criar situações diversificadas na situação inicial do elemento estrutural, enquanto as modificações na população inicial e número de interações buscam demonstrar o impacto na qualidade e convergência do algoritmo.

3.2 Identificação das variáveis

Reitera-se que por se tratar de um perfil W, o critério de seleção das variáveis seguiu os parâmetros geométricos responsáveis pela composição do elemento. Para isto, destacam-se as variáveis geométricas t_o , h_o , t_f e b_f e os componentes complementares de cálculo de A_g , I_x , I_y , i_x , i_y , λ .

Onde:

t_o representa a espessura da alma;

h_o representa a altura da alma;

tf representa a espessura da mesa;

bf representa a largura da mesa;

Ag representa a área calculada através da equação:

$$Ag = (to * ho) + (2 * tf * bf) \quad (20)$$

Ix representa o momento de inércia no eixo x, que foi calculado através da equação:

$$Ix = 2 * (bf * \frac{(tf^3)}{12} + 2 * bf * tf * \frac{(tf+ho)}{2} * \frac{(tf+ho)}{2} + \frac{to*ho^3}{12}) \quad (21)$$

Iy representa o momento de inércia no eixo y, que foi calculado através da equação:

$$Iy = 2 * (\frac{tf*bf^3}{12} + \frac{ho*to^3}{12}) \quad (22)$$

ix representa o raio de giração no eixo x, que foi calculado através da equação:

$$ix = \sqrt{\frac{Ix}{Ag}} \quad (23)$$

iy representa o raio de giração no eixo y, que foi calculado através da equação:

$$iy = \sqrt{\frac{Iy}{Ag}} \quad (24)$$

e λ representa o limite de esbeltez, que foi calculado através da equação:

$$\lambda = \frac{k*Lc}{Menor\ i} \quad (25)$$

Onde k representa o coeficiente de engaste e Lc o comprimento do pilar.

3.3 Restrições

Para execução do código foram impostos certos critérios de restrições geométricas para, inicialmente, reduzir o campo de busca e atender a padrões de fabricação de chapas metálicas. As variáveis de ho e bf foram utilizados os limites de restrições baseado na tabela de perfis comercializados no Brasil:

$$ho_{\min} \text{ e } bf_{\min} = 150mm$$

$$ho_{\max} \text{ e } bf_{\max} = 400mm$$

Já para variáveis de to e tf foram estabelecidos 3 valores de acordo com as espessuras de chapas metálicas utilizadas para a montagem de perfis soldados e comercializadas por fabricantes nacionais de aço. Na execução do código seus valores poderiam assumir quaisquer um dos 3 disponíveis:

$$to_{min} \text{ e } tf_{min} = [8, 0 ; 9, 5 ; 12, 5]$$

No algoritmo também foram incluídas verificações de flambagens locais e global, resistência e área da seção transversal para garantir que as soluções geradas fossem seguras e estáveis do ponto de vista estrutural. A penalização de soluções que violam essas condições foi uma estratégia importante para evitar que o algoritmo explore regiões do espaço de busca que resultam em pilares não classificáveis.

Já para restrições comportamentais o pilar deve resistir aos esforços solicitantes a que lhe são impostos, desse modo tem-se como obrigatório:

$$Nrd \geq Nsd \quad (26)$$

Além das restrições já citadas, incluiu-se, também, a restrição para evitar flambagens locais durante a seleção dos elementos como candidatos e após cada interação.

3.4 Definição da função objetivo

A função objetivo desempenha um papel crucial na otimização de pilares metálicos, pois reflete o critério principal que se pretende maximizar ou minimizar. No contexto deste trabalho, a escolha da função objetivo recai sobre a área da seção transversal do perfil, representada por Ag , e sua formulação é dada pela Equação 20:

$$Ag = (to * ho) + (2 * tf * bf) \quad (20)$$

Essa formulação abrange os principais parâmetros geométricos do perfil W , onde denota a espessura da alma, to e ho a altura da alma, tf a espessura da mesa e bf a largura da mesa. A área da seção transversal é um indicador direto da

quantidade de material utilizado na composição do pilar, sendo uma variável crucial na análise estrutural.

Ao escolher a área da seção transversal como a função a ser otimizada, busca-se encontrar um equilíbrio entre a eficiência estrutural e a minimização do peso do pilar. Dessa forma, a otimização visa alcançar soluções que satisfaçam os requisitos de segurança estrutural impostos pelas restrições, enquanto simultaneamente busca-se reduzir a quantidade de material necessário para a construção do pilar.

3.5 Dimensionamento manual de um perfil W do tipo I, H e HP

Antes de aplicar o algoritmo de vaga-lumes, foi conduzido um processo de pré-dimensionamento, conforme as condições previamente definidas no tópico "Definição do Problema". Este estágio tem como objetivo encontrar perfis laminados capazes de resistir às solicitações impostas. Para isso calculou-se a área de seção transversal como se não houvessem flambagens locais e global por meio da equação:

$$A_{g_{cal}} = \frac{(N_{sk} * C_{fs} * C_{fr})}{f_y} \quad (27)$$

Onde:

$A_{g_{cal}}$ Foi o valor da estimativa de área de aço necessária para resistir a carga, desconsiderando os efeitos de flambagem no elemento;

N_{sk} foi o esforço solicitante característico;

C_{fs} e C_{fr} representaram o fator de segurança da carga solicitante e fator redutor para flambagem global, com valores de 1,4 e 1,1, respectivamente;

f_y representa a tensão de escoamento do aço.

Após esta etapa, são escolhidos perfis laminados com áreas da seção transversal superior à calculada inicialmente e realiza-se a verificação da flambagem global. O objetivo desta etapa é encontrar perfis que atendam às

solicitações impostas no caso problema definido anteriormente a fim de realizar uma comparação com o perfil gerado através do algoritmo de vaga-lumes.

3.6 Dimensionamento do perfil W utilizando algoritmo

Para aplicar o algoritmo, utilizou-se o site Online GDB Python compiler para a execução do algoritmo e o programa Excel para cálculos e análise gráfica dos resultados. Essas ferramentas foram selecionadas por sua facilidade de manuseio, acessibilidade e atendimento às necessidades do estudo.

Por fim, o algoritmo é aplicado a um pilar metálico sob condições modelos de um problema de engenharia com variações de parâmetros no algoritmo. Essa aplicação permitirá explanar a cerca da influência do algoritmo na redução da seção transversal do pilar mantendo, ainda sim, a condição de segurança e estabilidade.

O código se inicia com o input de 3 dados pelo usuário:

- Nsd: a carga solicitante de cálculo em kN;
- L: O comprimento do pilar em mm;
- K: Valor para o tipo de vinculação do pilar.

Os dados de entrada são cruciais para determinar a área da seção transversal mínima para resistir ao esforço.

Durante a execução do código foram introduzidos comandos de *print* para que o usuário consiga verificar a relação de pilares candidatos gerados inicialmente e sua evolução ao longo de cada interação. Os resultados foram configurados dentro do *print* para facilitar a introdução dentro do excel para posteriores análises. Os dados de saída, resumidos, podem ser observados na Figura 23 enquanto um recorte dos dados de interação podem ser visualizados na Figura 24.

Figura 23 - Dados de saída do código compilado no Online GDB compiler - Python

```

RESULTADO FINAL:
=====
Área de seção transversal otimizada:
Área ótima: 61.20 cm2
=====
to, ho, tf, bf otimizados:
to: 8.00 mm
ho: 343.00 mm
tf: 8.00 mm
bf: 211.00 mm
=====
Momento de Inércia Ix: 13090.21 cm4
Índice de Esbeltez em x: 24.62
Momento de Inércia Iy: 1253.99 cm4
Índice de Esbeltez em y: 79.53
=====
Solicitante: 979.0000000000001
Carga Resistente Nrd: 991.95 kN

```

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 24 - Recorte dos dados de saída descritivos do código compilado no Online GDB compiler - Python

```

Iteração 50, Pilar 17: to=24.95, ho=150.00, tf=18.29, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 18: to=25.40, ho=157.95, tf=17.39, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 19: to=19.91, ho=189.47, tf=16.93, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 20: to=18.59, ho=150.00, tf=17.13, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 21: to=21.00, ho=152.60, tf=19.39, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 22: to=17.98, ho=150.00, tf=19.74, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 23: to=25.50, ho=150.00, tf=15.63, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 24: to=21.38, ho=150.00, tf=17.64, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 25: to=22.19, ho=150.00, tf=21.09, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 26: to=21.05, ho=150.00, tf=22.85, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 27: to=25.98, ho=150.00, tf=16.78, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 28: to=21.64, ho=150.00, tf=15.49, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 29: to=24.71, ho=195.35, tf=18.22, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 30: to=16.71, ho=150.00, tf=22.33, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 31: to=20.54, ho=150.00, tf=24.68, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 32: to=20.67, ho=150.00, tf=18.34, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 33: to=22.84, ho=150.00, tf=24.68, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 34: to=24.98, ho=150.00, tf=21.03, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 35: to=19.55, ho=226.75, tf=22.28, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 36: to=16.89, ho=150.00, tf=24.12, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 37: to=15.39, ho=150.00, tf=20.79, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 38: to=21.48, ho=150.00, tf=25.11, bf=150.00
Iteração 50, Pilar 39: to=20.27, ho=150.00, tf=21.97, bf=158.54

```

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.6.1 Parâmetros adotados do algoritmo de vaga-lumes

O coeficiente γ (gamma), responsável por controlar a taxa de absorção de luminosidade do meio, influenciando diretamente na atratividade de um candidato próximo - assim como uma neblina interfere na luminosidade de um vaga-lume que comunica-se com outro - foi adotado como $\gamma = 1$, conforme sugerido por YANG (2008) pois, entende-se, que para este tipo de problema o meio de inserção dos candidatos pode ser desconsiderado, relacionando o resultado da movimentação a uma maior dependência da distância entre os candidatos e de seu potencial luminoso.

Lukasik(2009) realizou uma série de estudos para verificar o impacto na alteração dos parâmetros nos resultados de benchmark do algoritmo. adotando valores de $alpha = 0,1$, $beta = 0,8$ e $gamma = 1$.

Nos estudos aplicados de Cunha(2019), é possível observar a adoção dos parâmetros de $alpha = 0,5$, $beta = 1$ e $gamma = 1$.

Já para De Sousa Fontes (2022) é possível observar uma melhoria significativa ao se utilizar os parâmetros em $alpha = 0,5$, $beta = 0,2$ e $gamma = 0,1$.

Para este trabalho foram realizados testes de população e interação fixa visando avaliar o desempenho à medida que se alteram os coeficientes buscando o melhor desempenho e, para isso, adotou-se os fatores de $alpha$, $beta$ e $gamma$ (Coeficiente de absorção, coeficiente de atração e fator de aproximação) de:

$Alpha = 0,5$ parâmetro de aleatoriedade;

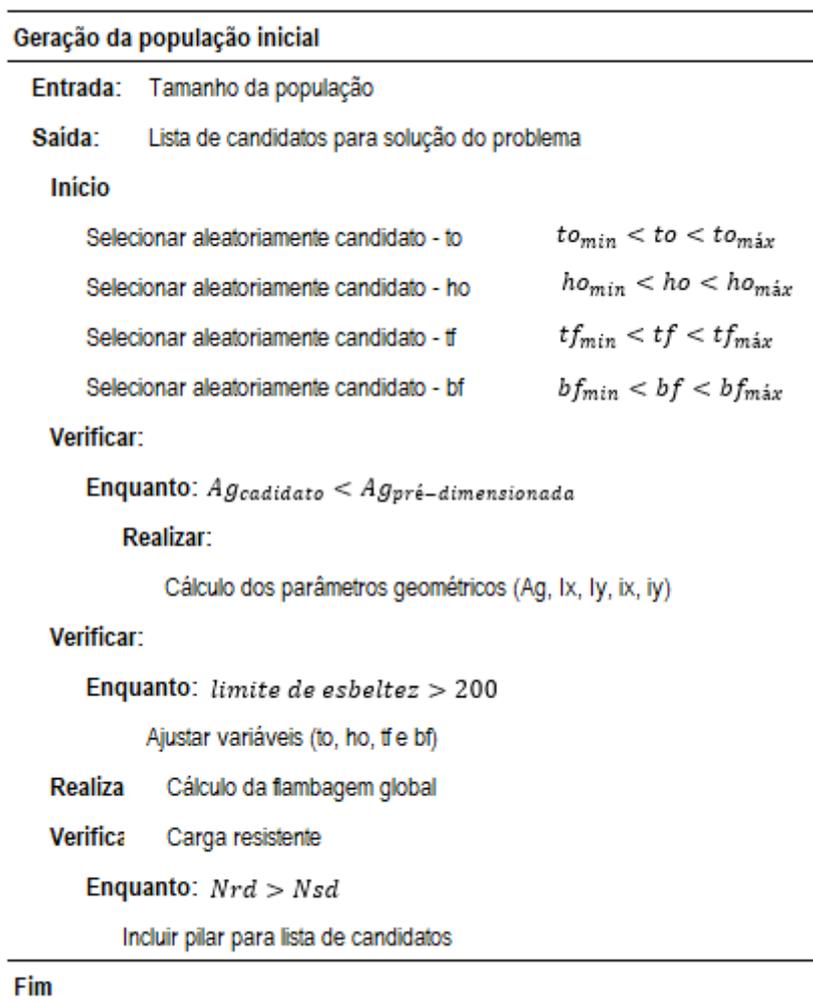
$Beta = 0,2$ parâmetro de atratividade;

$gamma = 0,1$ parâmetro de absorção de luz pelo meio.

3.6.2 População inicial e interações

A população inicial foi pré-estabelecida através do fluxograma abaixo:

Figura 25 - Fluxograma para gerar população inicial



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Os valores da população inicial são introduzidos manualmente pelo usuário do código, não sendo estabelecidos limites máximos para a quantidade de candidatos iniciais. Foi observado que o tempo de processamento do algoritmo é proporcional à quantidade de candidatos.

Cada candidato gerado é composto por 4 variáveis geométricas. Após a geração do pilar as devidas verificações de área da seção transversal, esbeltez e resistência. Caso o pilar obtenha efetividade nas verificações ele será incluído na lista de candidatos, nomeada `Pilares_candidatos []`, e um novo pilar será gerado. A lógica de programação do código pode ser verificada abaixo:

Figura 26 - Trecho do código - geração da população inicial

```
# Geração de pilares candidatos
pilares_candidatos = []
for _ in range(num_vagalumes):
    to_candidato = random.choice(Lista_Esp)
    ho_candidato = random.uniform(ho_min, (42.14 * to_candidato))
    tf_candidato = random.choice(Lista_Esp)
    bf_candidato = random.uniform(bf_min, (31.56 * tf_candidato))

    # Garanta que a expressão seja maior ou igual a Ag
    while fitness(to_candidato, ho_candidato, tf_candidato, bf_candidato) < (Nsd * 1.1) / fy:
        to_candidato = random.choice(Lista_Esp)
        ho_candidato = random.uniform(ho_min, (42.14 * to_candidato))
        tf_candidato = random.choice(Lista_Esp)
        bf_candidato = random.uniform(bf_min, (31.56 * tf_candidato))
```

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

É possível observar que a seleção das variáveis ocorre de forma aleatória dentro dos intervalos pré-estabelecidos e armazenados como listas, para as espessuras, e como limites de máximo e mínimo para as alturas e larguras de cada candidato.

Já o processo de interação entre candidatos e ajuste de seus parâmetros pode ser observado no fluxo de código genérico apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Fluxograma de interação entre candidatos

Interação entre candidatos

Entrada: Número de interações, lista de candidatos

Saída: Candidato ótimo

Início

Realizar:

Selecionar aleatoriamente um candidato (Pilar_i)

Selecione aleatoriamente outro candidato (Pilar_j)

Cálculo distância entre pilares

Cálculo da atratividade de cada candidato

Mover menor_atratividade (to, ho, tf e bf) para maior_atratividade (to, ho, tf e bf)

Realizar ajuste de variáveis (to, ho, tf e bf)

Verificar:

Enquanto: $Ag_{ajustada} > Ag_{prédimensionada}$

Verificar flambagem

Ajustar novos parâmetro (Ag, lx, ly, ix, iy)

Verificar:

Enquanto: $Nrd > Nsd$

Atualizar pilar na lista de candidatos

Fim

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Neste fluxo de interações são selecionados 2 pilares ($candidato_i$ e $candidato_j$) aleatoriamente que fazem parte da lista Pilares_candidatos []. Os pilares tem sua distância calculada através da equação 17, que foi adaptada para a quantidade de variáveis do problema, sendo representada pela Equação (28):

$$r_{ij} = \sqrt{(to_{i,k} - to_{j,k})^2 + (ho_{i,k} - ho_{j,k})^2 + (tf_{i,k} - tf_{j,k})^2 + (bf_{i,k} - bf_{j,k})^2} \quad (28)$$

Depois do cálculo da distância cada candidato tem sua atratividade quantificada utilizando a equação 14. Ajustando aos valores do algoritmo:

$$\beta = 0,5 * e^{-r^2} \quad (14)$$

Para depois ser analisado o pilar mais efetivo entre os selecionados e, só então, realizar o ajuste de seus parâmetros de to , ho , tf e bf através da movimentação do candidato de maior área ao de menor área, sendo observados nas Equações 29, 30, 31 e 32:

$$\Delta to = (1 - \beta) * to_j + \beta * to_i + alpha * (rand - 0,5) \quad (29)$$

$$\Delta ho = (1 - \beta) * ho_j + \beta * ho_i + alpha * (rand - 0,5) \quad (30)$$

$$\Delta tf = (1 - \beta) * tf_j + \beta * tf_i + alpha * (rand - 0,5) \quad (31)$$

$$\Delta bf = (1 - \beta) * bf_j + \beta * bf_i + alpha * (rand - 0,5) \quad (32)$$

Onde:

to_i , ho_i , tf_i e bf_i representam o melhor candidato ou o candidato de referência, dentro os dois selecionados, isto é, $\beta_i > \beta_j$;

to_j , ho_j , tf_j e bf_j representam o candidato que será movimentado;

$alpha * (rand - 0,5)$ representam a etapa de aleatoriedade do algoritmo, sendo $gamma = 1$ e $rand$ assumindo qualquer valor dentro do intervalo $[0,1]$ (YANG, 2010).

Por fim foi realizado uma verificação quanto às restrições quanto aos novos valores assumidos por $Candidato_j$, a fim de garantir a resistência ao esforço solicitante e a estabilidade quanto à esbeltez. Para cada candidato que conseguiu atingir os critérios e restrições estabelecidos, seu valor é atualizado dentro de $Pilares_candidatos []$ e uma nova rodada de interação inicial.

Um trecho do código de interação entre cada candidato pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Trecho do código - interação entre candidatos

```

for i in range(1, num_vagalumes):
    to_i, ho_i, tf_i, bf_i = pilares_candidatos[i]
    j = random.randint(0, i-1) if i > 0 else 0
    to_j, ho_j, tf_j, bf_j = pilares_candidatos[j]

    # Calcular a distância r entre os pilares candidatos i e j
    r_ij = math.sqrt((to_i - to_j)**2 + (ho_i - ho_j)**2 + (tf_i - tf_j)**2 + (bf_i - bf_j)**2)

    # Calcular a atratividade entre os vaga-lumes i e j
    atratividade = beta * math.exp(-gamma * r_ij**2)

    # Mover o pilar candidato i em direção ao pilar candidato j
    delta_to = (1 - atratividade) * to_j + atratividade * to_i + alpha * ( random.uniform(0, 1) - 0.5)
    delta_ho = (1 - atratividade) * ho_j + atratividade * ho_i + alpha * ( random.uniform(0, 1) - 0.5)
    delta_tf = (1 - atratividade) * tf_j + atratividade * tf_i + alpha * ( random.uniform(0, 1) - 0.5)
    delta_bf = (1 - atratividade) * bf_j + atratividade * bf_i + alpha * ( random.uniform(0, 1) - 0.5)

```

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Onde o primeiro trecho seleciona 2 candidatos aleatórios, realiza o cálculo da distância entre o conjunto de variáveis e da atratividade e, em seguida, realiza o ajuste das variáveis no candidato menos atrativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculo manual dos pilar metálico

Para o primeiro caso onde tem-se uma carga solicitante de $Nsd = 1172 \text{ kN}$, com comprimento do pilar de 3600 mm e considerando o coeficiente de apoio sendo $k = 1$, representando um pilar bi-apoiado, foi possível calcular a área mínima necessária a resistir ao esforço. Para este cálculo inicial desconsiderou-se o efeito da flambagem:

$$A_{g_{\min}} = \frac{Nsd * Cfr}{F_y} = \frac{1172 * 1,1}{25} = 51,56 \text{ cm}^2 \quad (5)$$

Com base na área inicialmente calculada foi adotado um perfil de área igual ou imediatamente superior. Utilizando como base a tabela de perfis laminados, foi selecionado o perfil W200 x 52 (tipo H), com $A_{g_{lam}} = 66,90 \text{ cm}^2$ atendendo ao primeiro requisito de área (Figura 27).

Figura 29 - Tabela de perfis laminados do tipo HP

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y			
				t _w mm	t _f mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Z _x cm ³	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	Z _y cm ³
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5.298	514,4	8,90	572,5	1.784	174,9	5,16	265,8

Fonte: Adaptado pelo autor, Mais Gerdau (2023).

Com base nos dados do perfil adotado é possível realizar a verificação da instabilidade global do elemento por meio das Equações 4, 6 e 8. λ_{ay} nos traz o limite de esbeltez do elemento enquanto, por meio de X , obtém-se o impacto da instabilidade global no elemento:

$$\lambda_y = \frac{l * k}{r_{\min}} = \frac{360 * 1}{5,16} = 69,76 \quad (4)$$

$$\lambda_{ay} = 0,00113 * \lambda_y = 0,0113 * 69,76 = 0,788 \quad (6)$$

$$X = 0,658^{\lambda_{ay}^2} = 0,658^{0,788} = 0,771 \quad (8)$$

E, por último, é possível calcular a resistência do perfil sob efeito da flambagem global, por meio da Equação 5:

$$N_{crd} = \frac{X * Q * A_g * F_y}{C_{fr}} = \frac{0,771 * 1 * 66,90 * 25}{1,1} = 1172,18 \text{ kN} \quad (5)$$

Observa-se que o perfil atende a situação-problema pois a afirmação de $N_{sd} < N_{rd}$, neste caso $1172 \leq 1172,18$ é verdadeira.

Levando em consideração o perfil adotado (W200 x 52) escolheu-se outros perfis de áreas semelhantes para realizar comparações, dentre eles citam-se: W310x52, W360x51 e W200x52, conforme observado na Figura 29:

Figura 30 - Tabela de perfis selecionados com base na área da seção transversal

PERFIS LAMINADOS			
	Resistência = N_{cr,d} (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4.2 Algoritmo de vaga-lumes

4.2.1 Hardware para execução do algoritmo

O algoritmo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python 3.0. O desenvolvimento e execução do código foi realizado no compilador de Python online Online GDB Beta. Seu processamento foi em uma máquina com sistema operacional Windows 10 Professional, e um processador Intel (R) Core (TM) i5 - 1135G7 2.40 GHz com 8,00 GB de memória RAM. O algoritmo de vaga-lumes foi desenvolvido sem a utilização de nenhuma API ou framework de terceiros para composição do projeto.

4.3 Resultados da Otimização

Caso 1:

Esforço solicitante de cálculo: 1172 kN

Comprimento do pilar: 3,6 m

Condição de apoio: 1,0

População Inicial: [25]

Quantidade de iterações: [125]

Para o Caso 1, com 3 execuções do Perfil 25/125 apresentou os seguintes resultados:

Figura 31 - Resultado da otimização para população de 25 vagalumes para 125 iterações

PERFIS GERADOS			
	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
Perfil 25/125	1225,07	64,06	19,12
	1234,33	67,02	18,42
	1573,71	79,87	19,70

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Os resultados foram compilados em uma planilha para comparativo, adicionando-se ainda outros 3 perfis de áreas similares à do primeiro perfil calculado W200, conforme observado na Figura 29. Os resultados podem ser observada na Figura 30:

Figura 32 - Resultado da otimização para população de 25 vagalumes para 125 iterações

PERFIS GERADOS	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
Perfil 25/125	1225,07	64,06	19,12
	1234,33	67,02	18,42
	1573,71	79,87	19,70
PERFIS LAMINADOS			
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Inicialmente, ao realizar uma análise mais seletiva, apenas com os perfis laminados, é possível notar uma baixa eficiência estrutural dos perfis W310x52 e

W360x51 em comparação com os perfis W200x52 e HP200,53 para esta situação. Existe uma queda de, aproximadamente, 18% na resistência por cm^2 . Esse fato demonstra o impacto da geometria dos componentes do perfil, pois, para perfis do tipo I que são assimétricos, com altura muito maior que largura, tem-se uma menor resistência inclusive não atendendo ao critério de resistência, com $N_{sd} > N_{rd}$, mesmo com a semelhança entre as áreas.

Para uma comparação entre o Perfil 25/75 com o W310 e W360 nota-se uma redução de área entre o melhor Perfil 25/75 e os outros dois perfis de, aproximadamente, 4%. Mesmo com uma área inferior o Perfil 25/75 ainda sim se mostrou mais resistente a esforços solicitantes, com uma resistência por cm^2 superior em 32% contra o W310 e 33% para o perfil W360.

Porém, quando se realiza a mesma análise entre o Perfil 75/125 com os perfis W200 e HP200 nota-se uma melhor aproximação no quesito resistência por cm^2 , com diferenças de 9%, entretanto o Perfil 75/275 ainda detém uma menor área de seção transversal, sendo 4% menor contra o W200 e 6% para o HP200. Este dado reforça, ainda, que o algoritmo busca montagens geométricas mais eficientes, apropriadas a casos de peças comprimidas. Além da priorização para buscar uma menor área, se mantém eficiente quanto a resistência esperada.

Caso 2:

Esforço solicitante de cálculo: 1172 kN

Comprimento do pilar: 3,6 m

Condição de apoio: 1,0

População Inicial: [50]

Quantidade de iterações: [250]

Para o Caso 2, com 3 execuções do Perfil 50/250 apresentou os seguintes resultados:

Figura 33 - Resultado da otimização para população de 50 vagalumes para 250 interações

PERFIS GERADOS	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
	1189,37	63,71	18,67
Perfil 50/250	1211,91	66,28	18,28
	1224,15	65,26	18,76
PERFIS LAMINADOS			
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Ao realizar uma análise entre os perfis 50/250 e o laminados nota-se, para o melhor caso de ambos, uma diferença significativa de área, girando em torno de 6% e resistência por cm² em 8%. Fazendo um breve comparativo entre os resultados obtidos no Caso 01 em relação ao Perfil HP200 nota-se um aumento na diferença entre as áreas e resistências. Enquanto o Perfil 25/125 apresentava uma área menor em 6% já o Perfil 50/250 apresentou uma área de 8% menor demonstrando uma maior eficiência ao aumentar a população/interação em 2x.

Outro fator a destacar com relação aos ajustes na população/interação é a redução do impacto da aleatoriedade do algoritmo. Enquanto na primeira situação as variações de área entre os perfis 25/125 foram de 19%, os perfis de 50/250 apresentaram variações de área de 2%.

Caso 3:

Esforço solicitante de cálculo: 1172 kN

Comprimento do pilar: 3,6 m

Condição de apoio: 1,0

População Inicial: [75]

Quantidade de Iterações: [375]

Para o Caso 3, com 3 execuções do Perfil 75/375 apresentou os seguintes resultados:

Figura 34 - Resultado da otimização para população de 75 vagalumes para 375 interações

PERFIS GERADOS	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
	1206,15	62,60	19,27
Perfil 75/375	1220,42	66,32	18,40
	1257,01	65,44	19,21
PERFIS LAMINADOS			
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Caso 4:

Esforço solicitante de cálculo: 1172 kN

Comprimento do pilar: 3,6 m

Condição de apoio: 1,0

População Inicial: [100]

Quantidade de Iterações: [500]

Para o Caso 4, com 3 execuções do Perfil 100/500 apresentou os seguintes resultados:

Figura 35 - Resultado da otimização para população de 100 vagalumes para 500 interações

PERFIS GERADOS	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
	1172,26	61,08	19,19
Perfil 100/500	1178,20	64,82	18,18
	1204,33	64,21	18,76
PERFIS LAMINADOS			
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Caso 5:

Esforço solicitante de cálculo: 1172 kN

Comprimento do pilar: 3,6 m

Condição de apoio: 1,0

População Inicial: [200]

Quantidade de Iterações: [1000]

Para o Caso 5, com 3 execuções do Perfil 200/1000 apresentou os seguintes resultados:

Figura 36 - Resultado da otimização para população de 200 vagalumes para 1000 iterações

PERFIS GERADOS	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
	1188,83	60,60	19,62
Perfil 200/1000	1236,75	63,27	19,55
	1237,02	63,29	19,55
PERFIS LAMINADOS			
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Ao unificar os melhores perfis candidatos de cada caso de iteração [25/125, 50/250, 75/375, 100/500 e 200/1000], tem-se a seguinte tabela:

Figura 37 - Resultado da otimização para população de 200 vagalumes para 1000 iterações

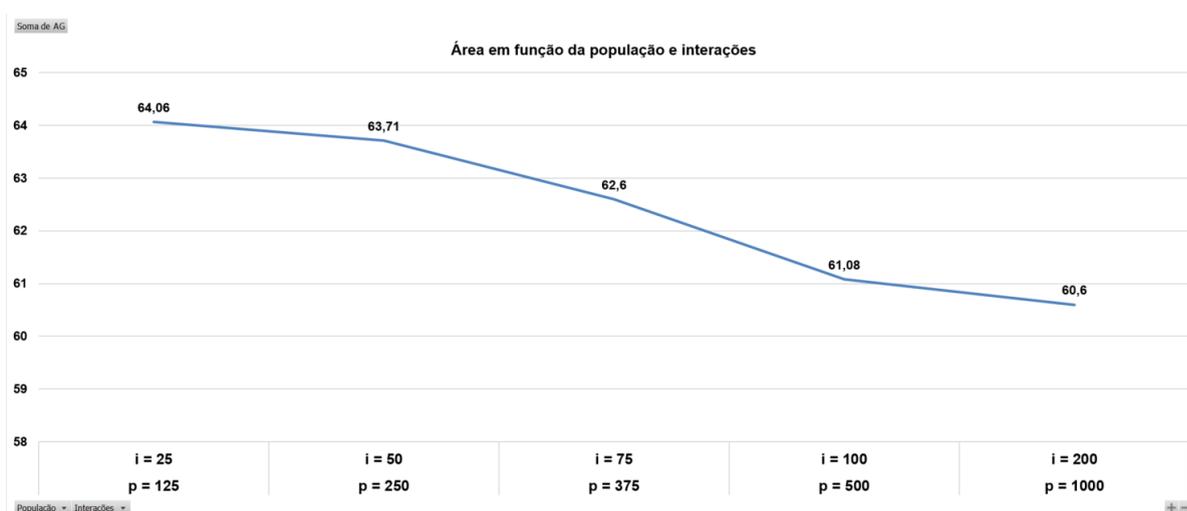
PERFIS LAMINADOS	Resistência = Ncr,d (kN)	Área (cm²)	Resist./Área (kN/cm²)
Perfil W310x52 (Tipo I)	969,41	67,10	14,45
Perfil W360x51 (Tipo I)	927,41	64,80	14,31
Perfil W200x52 (Tipo H)	1172,18	66,90	17,52
Perfil HP200x53	1166,61	68,10	17,13
PERFIS GERADOS			
Perfil 25/125	1225,07	64,06	19,12
Perfil 50/250	1189,37	63,71	18,67
Perfil 75/375	1206,15	62,60	19,27
Perfil 100/500	1172,26	61,08	19,19
Perfil 200/1000	1188,83	60,60	19,62

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A partir dos resultados expostos na Figura 34 é possível notar uma redução significativa na área da seção transversal à medida que a quantidade da população inicial e iterações aumenta, reforçando ainda mais a importância do espaço de trabalho (população) e o refinamento (iteração) e a tendência na

convergência do algoritmo, que pode ser melhor verificada na figura 35. Para tanto o Pilar Gerado 200/1000 se mostrou a melhor opção em termos da menor área da seção transversal, com $A_g = 60,60 \text{ cm}^2$, com uma área 12% menor em relação ao HP200, que seria nosso perfil ideal ao problema.

Figura 38 - Gráfico da área de perfis gerados por quantidade de interações e população



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Como citado no tópico "Restrições", o algoritmo foi programado para realizar as devidas verificações de resistência, visando garantir que todos os candidatos pudessem atender ao esforço solicitante. Esta condição foi atendida uma vez que, para todos os casos de perfis gerados por meio do algoritmo, as condições de $N_{sd} < N_{rd}$ se mostraram verdadeira.

Ainda analisando o critério de resistência é possível observa que a montagem do pilar com variações nas seções das geometrias de mesa e alma tiveram relevância pois, para o pilar de área menor (200/1000) apresentou, ainda sim, uma resistência por cm^2 superior ao um pilar de área maior. Este dado fica melhor visualizado ao comparar o perfil HP250 com o perfil 200/1000. Enquanto o perfil HP250 apresenta uma área de aço superior ao perfil 200/1000, tem-se uma diferença de, também, 12% em eficiência estrutural a favor do perfil 200/1000.

Para o critério de carga ou elemento mais leve, há, também, uma redução no peso da estrutura à medida que a população e interações aumentaram, o que era esperado uma hora que o peso, tratando-se de pilares constituídos de

elementos de mesma densidade, fossem diretamente proporcionais a área da seção transversal por metro.

Ainda na Figura 34 é possível observar, também, uma economia financeira no critério de seleção uma vez que, ao comparar o perfil 200/1000 com o perfil HP 250, tem-se uma redução de custos de, aproximadamente, 9% do valor total do material do elemento.

A eficiência do algoritmo se provou efetiva até em casos com baixos volumes de população inicial e quantidade de interações, como é o caso do pilar 25/125, que demandou uma baixa solicitação computacional para execução do código e, ainda sim, trouxe resultados de área, custo e resistência melhores que o perfil HP250.

O perfil de menor área (Perfil 200/1000) pode ser observado na Figura 39.

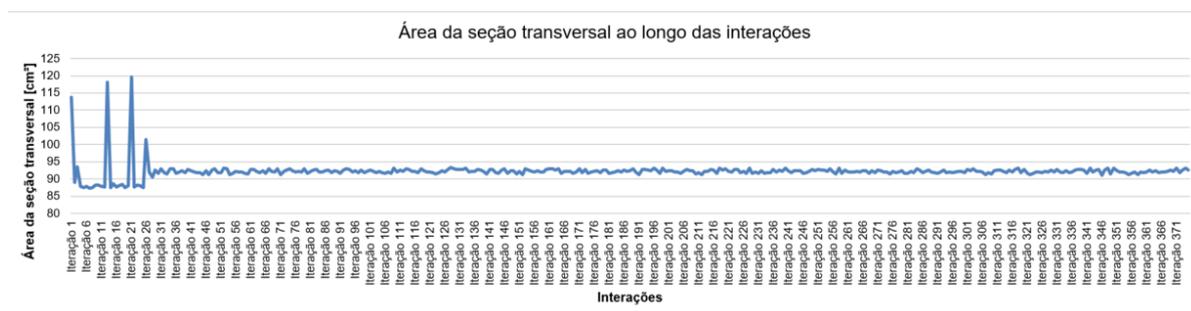
Figura 39 - Montagem de Perfil 200/1000 para produção

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4.3.1 Análise do processo de interação

Além dos resultados obtidos no tópico anterior, é importante realizar uma análise dos dados ao longo do processo. Ao escolher, aleatoriamente, um pilar dos candidatos, para este caso Pilar 75/375 de $Ag = 62,60$, e extrair os dados de execução até que se chegasse a este resultado através do código, foi possível estruturar os 75 pilares candidatos iniciais ao longo das 375 interações.

Figura 40 - Área da seção transversal candidato_P1 - Perfil 75/375



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Dentre os candidatos analisados, utilizou-se como base de análise os pilares 1. É possível identificar altas variações da área de seção transversal até a interação de número 30. Após a interação 30 o pilar tende a convergir para sua área final, com pequenas variações ao longo das execuções subsequentes.

Nota-se, nas primeiras iterações oscilações nos resultados, o que pode ser visto com mais frequência para casos em que o algoritmo foi executado com um pequeno espaço amostral, isto é, uma baixa população e pequena quantidade de iterações pois há, nestes casos, movimentos aleatórios do candidato. Para o caso citado na Figura 25, onde tem-se:

$$t_o = 8 \text{ mm}$$

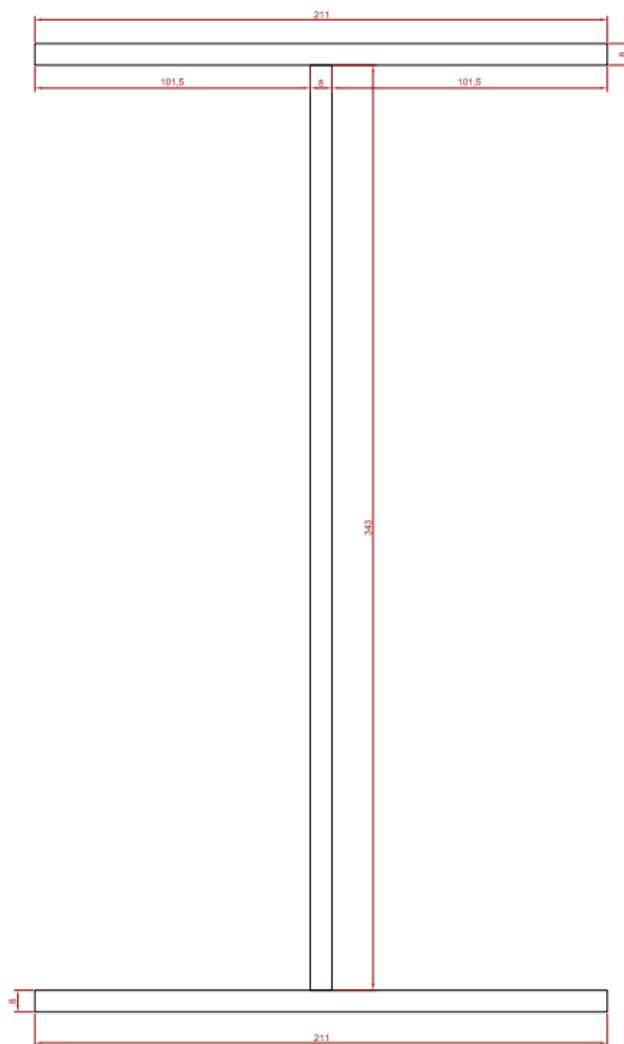
$$h_o = 211 \text{ mm}$$

$$t_f = 8 \text{ mm}$$

$$b_f = 231 \text{ mm}$$

pode-se observar a montagem do perfil na figura abaixo:

Figura 41 - Montagem do perfil metálico



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

5 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou integrar princípios tradicionais de dimensionamento estrutural com base no roteiro da NBR 8800 (ABNT, 2008) com técnicas inovadoras de otimização, explorando a eficácia do algoritmo de vaga-lumes na busca de soluções eficientes para o dimensionamento de pilares metálicos sujeitos a compressão.

Com base no problema-modelo desenvolvido teve-se como melhor escolha dentre os perfis laminados o W200x52 para uma carga solicitante de 1172 kN. A verificação de instabilidade global e a análise de resistência demonstraram que o perfil selecionado atendeu aos requisitos de segurança e desempenho.

O desenvolvimento e implementação do algoritmo de vaga-lumes introduziram uma abordagem inovadora para a otimização do dimensionamento estrutural. Os resultados obtidos revelaram que, ao variar a população inicial e as iterações, foi possível alcançar soluções mais eficientes, com destaque para o pilar gerado na condição 200/1000, que apresentou a menor área de seção transversal (60,60 cm²).

Notou-se que, embora o perfil inicialmente selecionado (W200x52) atendesse aos critérios, o algoritmo foi capaz de encontrar alternativas que reduziram significativamente a área da seção transversal, resultando em estruturas potencialmente mais eficientes, com menor peso e mais econômicas.

A eficiência estrutural pôde ser ressaltada com o caso do pilar 200/1000, que apesar de ter uma área menor, apresentou uma resistência superior por cm² em comparação com um pilar de área maior (HP 250 x 53), destacando a importância da geometria na eficiência estrutural.

Entretanto, o algoritmo desenvolvido apresenta limitações quanto sua aplicação a pilares de com ambos os eixos apoiados na mesma forma, limites de áreas disponíveis devido às restrições geométricas nas variáveis t_o , h_o , t_f e b_f . Apesar de sua limitação, a aplicabilidade para problemas de verificação e otimização de pilares isolados se mostrou eficiente, principalmente quando muito repetido em trechos de projetos.

REFERÊNCIAS

ABCEM. **Diferença entre o Light Steel Frame no Brasil e nos EUA**, 2021.

Disponível em:

<https://www.abcem.org.br/site/noticias/diferenca-entre-o-light-steel-frame-no-brasil-e-nos-eua> Acesso em: 02/06/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Anuário Mineral Brasileiro**, 2021. Ano base 2020 Disponível em:

<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>.

ALVES, Gabriel Padilha et al. **Otimização dimensional, geométrica e topológica de uma torre de linha de transmissão considerando diversos aspectos heurísticos**. 2018.

ANDRADE, Sebastião; VELLASCO, Pedro. **Comportamento e projeto de estruturas de aço**. Elsevier Brasil, 2016.

ARORA, Jasbir Singh. **Introdução ao design ideal** . Elsevier, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323:2003, **Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio**, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681:2003, **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**, 2003.

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

BARBOSA, Carlos Eduardo Martins. **Algoritmos bio-inspirados para solução de problemas de otimização**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios industriais em aço:projeto e cálculo**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2008.

- BENI, Gerardo; WANG, Jing. **Swarm intelligence in cellular robotic systems**. In: Robots and biological systems: towards a new bionics?. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993.
- BONABEAU, Eric; DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy. **Swarm intelligence: from natural to artificial systems**. Oxford university press, 1999.
- CHIAVERINI, V. **Aço e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.
- COELHO, Renato. **A Guerra da Ucrânia pode provocar uma reestruturação do comércio energético global**. Jornal da Unesp, 25/07/2022. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2022/07/25/guerra-da-ucrania-pode-provocar-uma-reestruturacao-do-comercio-energetico-global/>. Acesso em: 02/06/2023.
- CORTÊS, C. F. M. **Otimização do projeto da superestrutura de pontes pré-fabricadas pelo método dos algoritmos genéticos**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2010.
- COSTA, Verlaina Lia; ESCORSIM, Sérgio; COSTA, Deneuve Leonor. **Processo produtivo e produção de aço: a inserção do Grupo Gerdau SA no cenário mundial**, 2007.
- CUNHA, Hugo Gustavo Valin Oliveira da et al. **Algoritmo Genético e Algoritmo de Vaga-lumes aplicados ao Problema do Caixeiro Viajante**. 2019.
- DA PAZ, Rudinei Silvestre; BELLEI, Poliana; BARBISAN, Ailson Oldair. **COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE ESTRUTURAS DE AÇO E CONCRETO ARMADO EM XANXERÊ-SC**. Anais da Engenharia Civil/2595-1823, 2019.
- DEB, Kalyanmoy. **Optimization for engineering design: Algorithms and examples**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- DE SOUSA FONTES, Eliakim Alcântara et al. **Análise de parâmetros na otimização de vigas de concreto utilizando o algoritmo Colônia de Vagalumes**. Research, Society and Development. 2022.
- DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceito, técnicas e linguagem**. 4 ed. São Paulo: Zigurate editora, 1997.
- DORIGO, Marco; MANIEZZO, Vittorio; COLORNI, Alberto. **Ant system: optimization by a colony of cooperating agents**. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics), v. 26, n. 1, 1996.
- DORIGO, M.; DI CARO, G.; GAMBARDILLA, L. M. **Ant algorithms for discrete optimization**. Artificial Life, 1999.

EBERHART, Russell; KENNEDY, James. **Particle swarm optimization**. In: Proceedings of the IEEE international conference on neural networks. 1995.

FAKURY, Ricardo H.; SILVA, A. L. R. C. CALDAS, Rodrigo B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Person Education do Brasil, 2016.

FERREIRA, Rafael Guilherme Gomes. **O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**, 2021.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7 ed. Rio de Janeiro. Grupo GEN , 2022.

GERDAU, **Sobre nós: 120 anos de história**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/sobre-nos/> . Acesso em: 02/06/2023.

GERDAU, **Tabela de catálogo e manuais**. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/tabelas/>. Acesso em: 03/09/2023

GILL, Philip E.; MURRAY, Walter; WRIGHT, Margaret H. **Practical optimization**. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2019.

HASSANIEN, Aboul Ella; EMARY, Eid. **Swarm intelligence: principles, advances, and applications**. 2018.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Pearson Prentice Hall, 7a edição, São Paulo, 2015.

KADAVY, Tomas et al. **Multi-swarm optimization algorithm based on firefly and particle swarm optimization techniques**. In: International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing. Cham: Springer International Publishing, 2018.

KAPELINSKI, Kléber. **Algoritmo dos vaga-lumes com população não homogênea aplicado ao despacho econômico de carga**. 2018.

KENNEDY, J; EBERHART, R. C. **Particle swarm optimization**. IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ. 1995.

LIU, Yang; PASSINO, Kevin M. **Swarm intelligence: Literature overview**. Department of electrical engineering, the Ohio State University, 2000.

ŁUKASIK, Szymon; ŻAK, Sławomir. **Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks**. Wrocław, Poland. 2009.

OLIVIERI, B. P. **Otimização do projeto de pontes protendidas pré-moldadas pelo método dos algoritmos genéticos**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2004.

PAVEI, Juliana. **Análise do deslocamento vertical do aço em temperaturas elevadas**. 2014.

PEREIRA, L. L. M. et al. **Estudo de sensibilidade do algoritmo de colônia de vagalumes para um problema de engenharia envolvendo dimensionamento de treliças**. TEMA (São Carlos), 2020.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 9a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

QUEIROZ, Lucas Matheus Oliveira de. **Análise orçamentária comparativa entre estrutura metálica e estrutura de concreto pré-moldado para um caso específico de galpão industrial em João Pessoa-PB**, 2020.

RIZK-ALLAH, Rizk Masoud; ZAKI, Elsayed M.; EL-SAWY, Ahmed Ahmed. **Hybridizing ant colony optimization with firefly algorithm for unconstrained optimization problems**. Applied Mathematics and Computation, v. 224, 2013.

SAMPSON, Jeffrey R. **Adaptation in natural and artificial systems** (John H. Holland). 1976.

SERAPIÃO, Adriane Beatriz de Souza. **Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, 2009.

SILVA, Isabela Oliveira Maia da; RODRIGUES, Júlia Scalfoni. **Análise comparativa de uma edificação em estrutura metálica e em concreto protendido: estudo de caso**. 2020.

SILVEIRA, Ricardo et al. **APLICAÇÃO DO FIREFLY ALGORITHM PARA OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PARÂMETROS DE PÓRTICOS PLANOS SUBMETIDOS À FLEXÃO COMPOSTA COM IMPOSIÇÃO DE RESTRIÇÕES**. 2014.

SOARES, A. C. **Aço Brasil: uma viagem pela indústria do aço**. São Paulo: Edições Sesc, 2018.

YANG, Xin-She. **Firefly algorithms for multimodal optimization**. In: International symposium on stochastic algorithms. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

YANG, Xin-She. **Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms**. Luniver Press, 2010.

YANG, Xin-She. **Swarm intelligence based algorithms: a critical analysis**. Evolutionary Intelligence, 2014.