

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE - MESTRADO PROFISSIONAL
CAMPUS RIO VERDE**

***OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - TRELIÇA ÓTIMA -
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.***

Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

Coorientador: Prof. Dr. Wanderlei Malaquias Pereira Júnior

Discente: Eduardo Ramos Muniz

RIO VERDE - GO

2024

EDUARDO RAMOS MUNIZ

**OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - TRELIÇA ÓTIMA
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - PPGEAS, do Instituto Federal Goiano como parte das exigências para conclusão do curso Pós-graduação *Strictu Sensu* – Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales.

Coorientador: Prof. Dr. Wanderlei Malaquias Pereira Júnior.

RIO VERDE - GO

2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Muniz, Eduardo Ramos

M966o Otimização de estrutura metálica - treliça ótima -
utilizando o método dos elementos finitos / Eduardo Ramos
Muniz ; orientador Marcel Willian Reis Sales ; coorientador
Wanderlei Malaquias Pereira Júnior. -- Rio Verde, 2024.
82 f.

Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia
Aplicada e Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano,
Campus Rio Verde, 2024.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 65/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - "TRELIÇA ÓTIMA" - UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Autor: Eduardo Ramos Muniz
Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 08 de agosto de 2024.

Prof. Dr. Antover Panazzolo Sarmeto
Avaliador Externo - UFCAT / Catalão

Prof. Dr. Michell Macedo Alves
Avaliador Interno - IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Wanderlei Malaquias Pereira
Júnior
Avaliador Externo - UFCAT / Catalão

Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales
Presidente da banca - IFGOIANO / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/10/2024 12:55:23.
- Wanderlei Malaquias Pereira Junior, Wanderlei Malaquias Pereira Junior - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Catalão (35834377000120), em 01/10/2024 18:44:43.
- Antover Panazzolo Sarmeto, Antover Panazzolo Sarmeto - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Catalão (35834377000120), em 01/10/2024 18:16:25.
- Marcel Willian Reis Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/10/2024 18:04:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/07/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 614135
Código de Autenticação: 244937bee6



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 76/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 80
Data: 08/08/2024	Hora de início: 09:00h	Hora de encerramento: 12:00h
Matrícula do discente:	2022102331440001	
Nome do discente:	Eduardo Ramos Muniz	
Título do trabalho:	OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - "TRELIÇA ÓTIMA" - UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	
Orientador:	Marcel Willian Reis Sales	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e Ciência dos Materiais	
Projeto de pesquisa de vinculação	OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - "TRELIÇA ÓTIMA" - UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	
Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales (Orientador, Presidente da banca), Prof. Dr. Wanderlei Malaquias Pereira Júnior (Co-Orientador), Prof. Dr. Michell Macedo Alves (Avaliador Interno) e Prof. Dr. Antover Panazzolo Sarmento (Avaliador Externo) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de **EDUARDO RAMOS MUNIZ**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Marcel Willian Reis Sales, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Antover Panazzolo Sarmento, Antover Panazzolo Sarmento - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Catalão (35834377000120), em 08/08/2024 11:34:49.
- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/08/2024 11:23:46.
- Marcel Willian Reis Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/08/2024 11:19:48.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/07/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 634132
Código de Autenticação: c383a0fe85



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo: SOFTWARE

Nome completo do autor:

EDUARDO RAMOS MUNIZ

Matrícula:

2022102331440001

Título do trabalho:

OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - TRELIÇA ÓTIMA - UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS



RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 08 / 10 / 2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br
EDUARDO RAMOS MUNIZ
Data: 01/10/2024 13:41:40-0300
Verifique em <https://validar.if.gov.br>

RIO VERDE

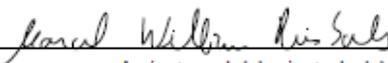
Local

23 / 09 / 2024

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)

DEDICATÓRIA

A Deus!

À minha mãe Kênia Leão;

À minha irmã Amanda;

Ao meu pai Divino;

Aos meus avós Izabel e José Leão (*In memoriam*); Rosa e Pedro;

À Amora, Maia, Mel e Lupita, minhas
companheiras;

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus Pai todo poderoso, que fez todas as coisas e me deu oportunidade de tornar real essa formação;

Aos familiares pelo apoio incondicional;

Aos colegas por estarem sempre dispostos a agregar conhecimento;

Aos amigos Anna Júlia, Déborah, Douglas e Pedro Henrique, por deixar essa trajetória mais leve;

Aos mestres por transmitirem todo conhecimento possível durante os anos de estudo;

Aos meus orientadores, por todo apoio, paciência e conhecimentos repassados;

Ao PPGEAS e IF Goiano por me proporcionar a oportunidade de cursar o Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade e por ceder espaços e laboratórios de informática para realizar todos os procedimentos necessários à execução deste projeto.

RESUMO

Para estruturas associadas à construção civil, busca-se sempre eficiência em termos de segurança e economia. Neste sentido, a engenharia, através de métodos analíticos, empíricos e numéricos tem buscado otimizar a estrutura em busca do menor custo e da maior segurança possível. Um elemento estrutural importante na construção de galpões, por exemplo, é a treliça, amplamente utilizada para vencer vãos e esforços consideráveis em estruturas, validando a busca por uma combinação ótima que vença solicitações e economize aplicação de material e tempo de dimensionamento. Neste trabalho pretende-se estudar a otimização de treliças metálicas com seção tubular utilizando métodos heurísticos, conhecidos como algoritmos genéticos (AG). Para o cálculo dos deslocamentos e tensões, será utilizado o método dos elementos finitos (MEF). Ao associar o MEF com o AG pode-se determinar a melhor configuração da treliça-tipo, que poderá gerar uma estrutura que associe segurança com menor custo possível. Para chegar aos resultados esperados, foi realizada uma densa revisão sistemática para determinar o estado da arte sobre a otimização estrutural de treliças. Este texto é dividido em três partes, sendo o projeto de pesquisa que representa o capítulo inicial, e dois capítulos representando artigos em periódico.

Palavras-chave: Heurística. Algoritmo genético. Galpão. Tubos.

ABSTRACT

Structures associated with civil construction are always looking for efficiency in terms of safety and economy. In this sense, engineering, through analytical, empirical, and numerical methods, has sought to optimize the structure in search of the lowest cost and greatest possible safety. An important structural element in the construction of warehouses, for example, is the truss, which is widely used to overcome considerable spans and stresses in structures, validating the search for an optimal combination that overcomes stresses and saves material application and design time. The aim of this work is to study the optimization of metal trusses with tubular sections using heuristic methods known as genetic algorithms (GA). The finite element method (FEM) will be used to calculate displacements and stresses. By combining the FEM with the GA, the best configuration of the truss type can be determined, which will generate a structure that combines safety with the lowest possible cost. To achieve the expected results, a thorough systematic review was carried out to determine the state of the art in structural truss optimization. This text is divided into three parts, with the research project representing the initial chapter, and two chapters representing journal articles.

Keyword: Heuristics. Genetic algorithm. Shed. Pipes.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
PROBLEMA	13
HIPÓTESES	13
OBJETIVOS	14
REVISÃO DE LITERATURA	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
CAPÍTULO I – UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.	18
RESUMO	18
1.1. INTRODUÇÃO	20
1.2. MATERIAIS E MÉTODOS	222
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
1.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	321
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	322
CAPÍTULO II – UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAR A ESTRUTURA DE UMA TRELIÇA METÁLICA TUBULAR – ESTUDO DE CASO.	35
RESUMO	35
2.1. INTRODUÇÃO	36
2.2. REVISÃO DE LITERATURA	42
2.3. MATERIAIS E MÉTODOS	55
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	688
APÊNDICE A	71
APÊNDICE B	81
CONSIDERAÇÕES FINAIS	86

INTRODUÇÃO GERAL

A engenharia está em constante evolução em busca por métodos que otimizem dimensionamentos e auxiliem na elaboração de projetos com menor custo e maior eficiência. Tangente a isto, existem diversas alternativas estruturais que podem ser utilizadas para aplicação em um projeto, cabendo ao projetista de estruturas estudar a melhor combinação possível para a realização. Nas diversas soluções em estruturas metálicas as treliças têm destaque, por causa do baixo peso, boa capacidade de vencer vãos e boa capacidade de suporte de cargas, o que a torna amplamente aplicável em soluções estruturais.

Entretanto, o projeto de treliças metálicas leva em conta muitas variáveis, que somado às diversas etapas distintas de verificação e dimensionamento dos elementos do sistema, tornando-o complexo. Portanto, além de variáveis de projeto, eficiência, compreensão dos elementos empregados e um processo iterativo (AZIZI *et al.*, 2022).

Do ponto de vista de projeto, a aplicação das técnicas de otimização torna-se uma ferramenta interessante, visto que pode reduzir o tempo de elaboração de um projeto (VASCONCELOS *et al.* 2013), possibilitando maior quantidade de análises, garantindo, de certa forma, que a estrutura pensada esteja o mais próximo da situação ótima.

Basicamente a aplicação dos conceitos de otimização estrutural de treliças divide-se em três grupos: (a) Otimização da seção; (b) Otimização da geometria; e (c) Otimização de topologia (AZAD *et al.* 2018, KRIPKA, *et al.* 2016).

Na primeira situação, as variáveis consideradas no projeto são apenas as dimensões das seções transversais dos membros, neste caso, é típico trabalhar com variáveis discretas (através de um grupo pré-definido de seções disponíveis) ou variáveis contínuas, quando qualquer valor de seção pode ser aceito em determinado intervalo.

Na otimização da geometria, a modificação de coordenadas nodais é permitida. Já neste caso, é comum permitir a modificação das características da seção transversal do elemento.

No caso de otimização de topologia, tanto o número de elementos e as posições na estrutura podem variar (KRIPKA *et al.* 2016).

Diversas aplicações de técnicas de otimização envolvendo estruturas metálicas podem ser encontradas em: Ho-Huu *et al.*, (2018); Techasen *et al.*, (2019) e Xu; Jin, (2014).

Para realizar os conceitos de otimização, utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF), verificando o deslocamento e os esforços internos de uma peça, comparando com a resistência da peça; portanto, auxilia na verificação da segurança das peças estruturais.

O algoritmo genético (AG), por sua vez, possui a capacidade de buscar a estrutura que tenha o menor custo, e se for associado com o MEF poderá auxiliar na busca da segurança, tendo uma estrutura ótima que seja segura e econômica.

PROBLEMA

Estudo de otimização de Estrutura Metálica - Treliça Ótima utilizando o Método dos Elementos Finitos impacta na escolha da melhor solução para vencer grandes vãos, tendo uma menor seção.

HIPÓTESES

A Estrutura metálica é um material muito utilizado na atualidade, uma vez que está entre os materiais com mais praticidade e com prazo de execução mais ágil, perdendo somente no que se refere à preço, uma vez que com o advento da pandemia, todos os produtos derivados do aço subiram consideravelmente.

Análogo à Estrutura de Concreto Armado, tem-se que a Estrutura Metálica surgiu com a necessidade de vencer grandes vãos, em pontes, por exemplo, surgindo cada vez mais estudos aprofundados na utilização do aço em perfis para diversos tipos de construções.

No que tange à execução, o que difere as duas estruturas, é simplesmente a mão de obra “especializada”, uma vez que no concreto, absorve-se a mão de obra mais barata, porém este fator não é o principal objetivo da peça.

Portanto, a hipótese deste projeto é: “A falta de otimização para execução de treliças metálicas impacta diretamente no alto peso e esbeltez da estrutura”

OBJETIVOS

Este plano tem como Objetivo Geral aplicar métodos de otimização multiobjetivo para o projeto de treliças tubulares, de acordo com as prescrições normativas das Normas Brasileiras - NBR 16239 (ABNT, 2013) e NBR 8800 (ABNT, 2008), associando o método dos elementos finitos com algoritmos genéticos para estruturas treliçadas, buscando a forma ótima que gere as menores seções dentro dos parâmetros aceitáveis por Norma em relação à segurança.

Além disso, tem-se os seguintes Objetivos Específicos:

- Realizar Revisão Integrativa de Literatura para embasar teoricamente o estudo de MEF em otimização de treliças tubulares;
- Criar um algoritmo genético (AG) que seja capaz de usar o MEF várias vezes para determinar a estrutura ótima que associe segurança com seções minimizadas;

REVISÃO DE LITERATURA

Engenheiros e projetistas são diretamente desafiados a resolver variedade de problemas, dos mais simples aos mais complexos, e, é de responsabilidade do profissional, principalmente na área de cálculos estruturais, utilizar todos os equipamentos matemáticos, teóricos e práticos necessários para garantir o sucesso da análise e prevenir possíveis falhas no projeto (ALVES FILHO, 2013).

Para os engenheiros desenvolverem com sucesso o cálculo estrutural, é necessário ter o conhecimento que envolve a análise matemática (equações diferenciais) e fundamentação teórica (resistência do material, teoria da elasticidade etc.) além de que, entender o comportamento das estruturas; em geral, soluções exatas para os problemas mais simples podem ser obtidas por métodos analíticos clássicos, porém, a maioria dos casos requer métodos mais sofisticados (BUDYNAS; MISCHKE; SHIGLEY, 2005).

Em termos de melhora de eficiência em sistemas estruturais, especialmente na engenharia civil, avanços tecnológicos estão permitindo o uso, cada vez mais recorrente, de sistemas computacionais inteligentes para determinação da combinação ótima de nós e barras que levariam ao peso ótimo, por exemplo.

A otimização tornou-se importante nos últimos tempos, quando se trata de estruturas, uma vez que as estruturas mais seguras e econômicas são as premissas básicas da engenharia. Para tanto, sabe-se que o peso de uma estrutura treliçada é usado para mensurar a eficiência, pois presume-se que a quantidade de material usado está diretamente relacionada ao custo final (CAMP; BICHON, 2004).

Problemas de otimização, normalmente buscam os valores mínimos de uma função para selecionar sistematicamente os valores das variáveis que levam ao menor valor. Os algoritmos metaheurísticos são otimizadores que combinam técnicas de busca global e local para obter as respostas o mais próximo possível da resposta ótima, ou seja, algoritmos de otimização aproximados são capazes de fornecer soluções aceitáveis e evitar aprisionamento em pontos ótimos locais (AZIZI *et al.*, 2022).

O Método dos Elementos Finitos (MEF), pode gerar resultados aproximados de tensão, deslocamento e deformação estrutural, levando a aplicação mais ampla na engenharia e produzindo resultados satisfatórios (ALVES FILHO, 2013).

A ideia básica do MEF é subdividir o domínio a ser analisado (contínuo) em subdomínios de dimensões finitas, chamados elementos, conectados entre si em pontos chamados nós (ALVES, 2007). Cada elemento exibe as mesmas propriedades de um meio contínuo, e, é analisado separadamente, os resultados são combinados para obter um resultado de domínio global. Esta aplicação consoante ao uso dos resultados obtidos inseridos no algoritmo genético, possibilita uma análise profunda da combinação ótima de elementos treliçados.

Nas últimas décadas, várias técnicas de inteligência computacional têm sido aplicadas para o projeto alcançar as dimensões ótimas para as treliças. Em termos de modelagem computacional com algoritmos de aprendizado, os mais frequentemente empregados são os otimização que consistem em um processo que busca maximizar ou minimizar uma função objetiva que, normalmente está associada ao peso e a esbeltez da estrutura (PEREIRA *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 16239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. Rio de Janeiro, 2013.

ALVES, L. M. **Métodos dos Elementos Finitos**. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

AZAD, S. K.; BYBORDIANI, M.; AZAD, S. K.; JAWAD, F. K. J., **Simultaneous size and geometry optimization of steel trusses under dynamic excitations**. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 58, n. 6, p. 2545-2563, 2018.

AZIZI, Mahdi; AICKELIN, Uwe; KHORSHIDI, Hadi A.; SHISHEHGARKHANEH, Milad Baghalzadeh. **Shape and size optimization of truss structures by Chaos game optimization considering frequency constraints**, *Journal of Advanced Research*, 2022.

BUDYNAS, R. G.; MISCHKE, C. R.; SHIGLEY, J. E. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE**. 6a. ed. São Paulo: Érica, 2013.

HO-HUU, V. et al. **An efficient combination of multi-objective evolutionary optimization and reliability analysis for reliability-based design optimization of truss structures**. *Expert Systems with Applications*, v. 102, 2018.

KANNAN, G. Padmasudha; NAGARAJA, K. V. **An Efficient Automatic Mesh Generator With Parabolic Arcs in Julia for Computation of TE and TM Modes for Waveguides**. *IEEE Access*, v. 8, p. 109508-109521, 2020.

KRIPKA, M.; PRAVIA, Z. C.; MEDEIROS, G. F.; DIAS, M. M., **Simultaneous geometry and cross-section optimization of aluminum trusses**. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, v. 12, n. 2, p.315-325, 2016.

VASCONCELOS, R. F.; ALMEIDA, S. R. M.; PRADO, A. A., **Otimização de lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido segundo as normas brasileiras**. In: XXXIV Iberian Latin.

VASILKIN, Andrey. **Possibilities of applying structural optimization in building structures computer-aided design systems.** In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. p. 03017.

XU, Bin; JIN, Yu Jia. **Multiobjective dynamic topology optimization of truss with interval parameters based on interval possibility degree.** Journal of Vibration and Control, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 66–81, 2014.

ZHOU, Guangyou; YUAN, Shangda; LUO, Sumei. **Mesh Simplification Algorithm Based on the Quadratic Error Metric and Triangle Collapse.** IEEE Access, v. 8, p. 196341-196350, 2020.

CAPÍTULO I – UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA – UMA REVISÃO INTEGRATIVA.

(Normas de acordo com a Revista Interação Interdisciplinar (on-line); ISSN 2526-9550; Qualis B1 – Engenharias I)

RESUMO

No campo do estudo estrutura há busca incessante por melhores métodos, desempenho, economia e segurança. Neste sentido treliças metálicas têm sido muito utilizadas para galpões por ser um modelo estrutural que agrega os requisitos mencionados, validando a busca por uma combinação que seja otimizada, ou seja, a melhor forma dessa peça que se enquadrar no termo ótima, que vença solicitações e economize aplicação de material e tempo de dimensionamento. Com objetivo de desenvolver o processo estrutural, soluções ótimas podem ser encontradas utilizando métodos heurísticos, e, por isso, neste estudo é feita a revisão bibliográfica do tipo integrativa sobre o tema; revisou-se literariamente artigos que estudam a otimização de treliças metálicas com seção tubular utilizando métodos heurísticos. Ao associar o MEF com os algoritmos pode-se determinar a melhor configuração da treliça-tipo, que poderá gerar uma estrutura que associe segurança com menor custo possível. Utilizou-se uma treliça plana de 10 barras para que pudesse discernir qual(is) o(s) método(s) mais eficiente para a otimização da peça, dentre os métodos e resultados de cada autor revisado; realizada a constatação entre os métodos utilizados para cada autor e o seu respectivo algoritmo, é perceptível que o algoritmo que detém o menor desvio padrão, menor número de interações e melhor peso médio da peça foi o CHT Híbrido.

Palavras-chave: Heurística. Algoritmo genético. Treliças. Treliças tubulares.

CHAPTER I - USE OF GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF STRUCTURE – AN INTEGRATIVE REVIEW.

(Standards according to the Interdisciplinary Interaction Journal (on-line); ISSN 2526-9550;
Qualis B1 – Engenharias I)

ABSTRACT

In the field of structural studies, there is an incessant search for better methods, performance, economy, and safety. In this sense, metal trusses have been widely used for warehouses because they are a structural model that combines all these requirements, validating the search for a combination that is optimized, in other words, the best shape of the part that fits the term optimal, that overcomes demands and saves material application and design time. To develop the structural process, even more optimal solutions can be found using heuristic methods, which is why this study is an integrative literature review about the subject; articles that study the metal trusses with tubular sections optimization using heuristic methods were reviewed. By associating the FEM with the algorithms, the best configuration of the truss type can be determined, which can generate a structure that combines safety with the lowest possible cost. A 10-bar flat truss was used to discern the most efficient method(s) for optimizing the piece, among the methods and results of each author reviewed; when the methods used by each author and their respective algorithm were compared, it was clear that the algorithm with the lowest standard deviation, lowest number of interactions and best average part weight was Hybrid CHT.

Keyword: Heuristics. Genetic algorithm. Trusses. Tubular trusses.

1.1.INTRODUÇÃO

Como no mercado há enorme volatilidade quando se trata de técnica, demanda e valores, busca-se sempre inovação e execução de métodos cada vez mais eficazes para suprir as necessidades do cliente, bem como entregar o produto com qualidade, custo minimizado e seguindo o que preconizam as Normas Técnicas.

Portanto, a engenharia precisa estar em constante evolução na busca por métodos que otimizem dimensionamentos e auxiliem a elaboração de projetos com menor custo e maior eficiência; tangente a isto, existem diversas alternativas estruturais que podem ser utilizadas para aplicação em um projeto, cabendo ao projetista de estruturas estudar a melhor combinação possível para a realização.

A otimização estrutural tem o objetivo de projetar estruturas ótimas considerando as características desejadas e seguindo um conjunto de restrições (KOZIEL & YANG, 2011).

Define-se otimização como sendo a minimização ou maximização de uma função objetivo (FO), a mesma pode ser classificada em dois gêneros de funções: otimização restrita, quando a função apresenta variáveis de projeto restritas delimitando o espaço de busca, ou otimização irrestrita, quando não há restrições para os valores das variáveis de projeto. (SILVA, 2015; SOUZA, 2016; PEREIRA JUNIOR, 2020)

A função geral da FO é vincular os parâmetros do problema de otimização, as variáveis de projeto, sendo que estes parâmetros podem ser alterados, a fim de aperfeiçoar a função objetivo; e as restrições aplicadas às variáveis de projeto (VANDERPLAATS, 1999).

Christensen e Klarbring (2009) elucidam que, o método de otimização (encontrar a solução ótima) consiste em três passos: (1) sugerir uma configuração inicial; (2) verificar o atendimento aos requisitos baseados na função; (3) se eles não forem satisfeitos, uma nova configuração deve ser testada, e mesmo quando os requisitos são satisfeitos, pode não ser a configuração ótima, então, sugere-se nova configuração; (4) sugerir nova configuração e submeter ao passo 2.

Nas diversas características que se pode otimizar, as soluções em estruturas treliçadas tem destaque, visto o seu baixo peso, boa capacidade de vencer vãos e boa capacidade de suporte de cargas, torna-a amplamente aplicável em soluções estruturais. (PAIVA, *et al.* 2009)

Entretanto, o projeto de treliças metálicas leva em conta muitas variáveis, e somado às diversas etapas distintas de verificação e dimensionamento dos elementos do sistema, tornando-

o complexo. Portanto, além de variáveis de projeto, eficiência, compreensão dos elementos empregados e um processo interativo (AZIZI *et al.*, 2022).

Portanto do ponto de vista de projeto, a aplicação das técnicas de otimização torna-se uma ferramenta interessante, visto que podem reduzir o tempo de elaboração de um projeto (VASCONCELOS *et al.* 2013), como também possibilita maior quantidade de análises, garantindo de certa forma que, a estrutura pensada esteja o mais próximo da situação ótima.

Basicamente a aplicação dos conceitos de otimização estrutural de treliças divide-se em três grupos: (a) Otimização da seção; (b) Otimização da geometria; e (c) Otimização de topologia (AZAD *et al.* 2018, KRIPKA, *et al.* 2016).

Na primeira situação, as variáveis consideradas no projeto são apenas as dimensões das seções transversais dos membros, neste caso, é típico trabalhar com variáveis discretas (através de um grupo pré-definido de seções disponíveis) ou variáveis contínuas, quando qualquer valor de seção pode ser aceito em determinado intervalo (Zargham, Ward, Ramli, & Badruddin, 2016).

Na otimização da geometria, a modificação de coordenadas nodais é permitida. Já neste caso, é comum permitir a modificação das características da seção transversal do elemento.

No caso de otimização de topologia, tanto o número de elementos e as posições na estrutura podem variar (KRIPKA *et al.* 2016).

Uma aplicação pode focar em uma única categoria ou combiná-las na otimização de duas ou três categorias, sendo a combinação de tamanho, forma e topologia a mais complexa (Miguel, Lopez, ELHami, & Miguel, 2012).

Diversas aplicações de técnicas de otimização envolvendo estruturas metálicas podem ser encontradas em: Ho-Huu *et al.*, (2018); Techasen *et al.*, (2019) e Xu; Jin, (2014).

Para realizar os conceitos de otimização, utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF), verificando o deslocamento e os esforços internos de uma peça, comparando com a resistência da peça; portanto, auxilia na verificação da segurança das peças estruturais.

A abordagem probabilística tem algumas vantagens e desvantagens; apontando as vantagens tem-se que não é necessário apresentar a representação matemática da função objetivo, tampouco as restrições, além de ser possível usar variáveis contínuas, discretas, lógicas, e até mesmo combinar esses tipos de variáveis; a função objetivo oferece bastante flexibilidade, e permite que seja modificada de forma simples; além de ser possível otimizar grande volume de variáveis (PEREIRA JUNIOR, 2020).

Ainda de acordo com o mesmo autor, podendo citar como principais métodos probabilísticos de otimização: Método de Algoritmos Genéticos (AG), Método de Recozimento Simulado (SA), Método de Busca Harmônica (HS), Método de Colônia de Formigas (ACO), Método do Enxame de Partículas (PSO), e Método de Colônia de Vagalumes (ACV).

Considera-se que, neste trabalho, consiga discernir qual(is) o(s) método(s) mais eficiente(s) para a otimização, comparando o trabalho de autores selecionados pelo processo metodológico escolhido, de forma a determinar os métodos e resultados obtidos por cada autor.

1.2.MATERIAIS E MÉTODOS

O mapeamento da literatura apresentado neste trabalho tem como objetivo identificar as tendências em trabalhos de otimização de treliças publicados na última década; incluem-se as categorias de otimização estudadas e os algoritmos empregados (RENKAVIESKI, PARPINELLI, 2021).

O plano de trabalho do mapeamento literário, quando se trata de revisão integrativa, inicia-se por um mapeamento sistemático de referências, o que permite obter um panorama mais detalhado sobre as aplicações do problema de otimização, juntamente com treliças tubulares.

Nesta seção será abordado os procedimentos metodológicos utilizados na revisão integrativa, que se resume *a priori* em uma revisão sistemática, com intuito de alcançar o objetivo da pesquisa, que é, descobrir com a análise do uso da metaheurística, qual o método de otimização mais eficiente, sintetizando os resultados encontrados, a fim de buscar a resposta para o questionamento principal, sendo esta, a segunda etapa da revisão integrativa, diferenciando da revisão sistemática, em si.

Inicialmente, para o desenvolvimento desta revisão integrativa da literatura (RIL), foi utilizado o software *State of the Art through Systematic Review (StArt)*. A ferramenta *StArt* dispõe das seguintes etapas para o desenvolvimento da revisão: Planejamento, Execução e Sumarização. O planejamento é a etapa mais importante, nele é elaborado um protocolo que contém o objetivo de pesquisa, critérios de seleção, palavras-chave, pergunta de pesquisa e bases de dados. Sendo assim, tendo um protocolo bem modelado, minimiza-se os erros na condução e investigação do estado da arte do objetivo da pesquisa (DEMERVAL, 2019).

Então, tomando por base essas três etapas, será detalhado mais especificamente o que cada uma abrange:

- *Fase de planejamento*: nesta fase são inseridos na plataforma a descrição, os objetivos, a questão principal, os critérios, as palavras-chave e as plataformas que os artigos serão buscados;
- *Fase de execução*: nesta etapa, os artigos selecionados previamente na fase de planejamento passam por uma “peneira”, e são excluídos os artigos duplicados em várias bases, que não possuem relação com o tema (após a leitura do resumo);
- *Fase de extração*: nesta etapa, os artigos são escolhidos e ainda podem ser excluídos por falta de resumo, artigo não completo e estudos que não correlacionam diretamente com a linha de pesquisa.

Na primeira etapa do desenvolvimento deste estudo, foi montado um protocolo planejado minuciosamente com o objetivo de minimizar possíveis erros futuros e exclusão de muitos artigos na fase de extração, portanto, inseriu-se objetivos gerais, pergunta de pesquisa, palavras-chave, critérios de seleção de trabalhos, idiomas, métodos de pesquisa, critérios de qualidades, formulários de extração, bases de dados e critérios de aceitação e exclusão.

Figura 01 – Tela inicial de protocolo software StArt.

Systematic Review information

Title: OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA METÁLICA - "TRELIÇA ÓTIMA" - UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

Researchers: Eduardo Ramos Muniz
Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales
Prof. Dr. Wanderlei Meloque Pereira Júnior

Description: Para estruturas associadas a construção civil, busca-se sempre eficiência em termos de segurança e economia. Neste sentido, a engenharia, através de métodos analíticos e inovação, tem buscado otimizar a estrutura em busca do menor custo e da maior segurança possível. Um elemento estrutural importante na construção de estruturas de galpões, por exemplo, é a treliça, que são amplamente utilizadas para vencer vãos e esforços consideráveis em estruturas, validando a busca por uma combinação ótima que vença solicitações e economize aplicação material e tempo de dimensionamento. Para otimizar estruturas podemos utilizar um algoritmo heurístico conhecido como algoritmo genético. E para calcular a estrutura geralmente se o método dos elementos finitos. Então, o presente trabalho tem objetivo de associar o MEF (Método dos Elementos Finitos) em conjunto ao algoritmo genético para produzir uma estrutura de galpões treliçados de dimensões ótimas conciliando resistência e economia de recursos.

Status of the Protocol: All the required fields of the protocol are filled in!
Number of search sessions: 0

Edit

Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 01 nota-se que é necessário o correto preenchimento dos campos, para que a revisão deslinda da melhor forma possível; na Figura 02, 03, 04 e 05, observa-se a mesma

atenção, porém neste caso, é necessário que os dados de pesquisa estejam bem definidos para realizar a inserção no protocolo.

Figura 02 – Montagem do Protocolo (Objetivo, Questão Principal, Palavras-chave).

Fonte: Autor, 2024.

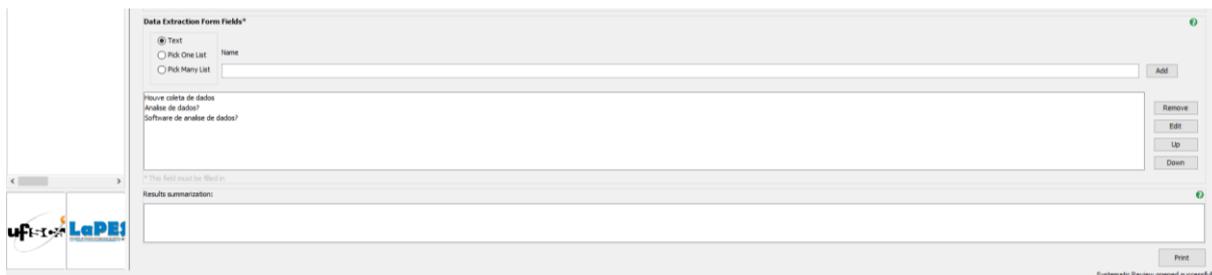
Figura 03 – Montagem do Protocolo (Critérios de definição, Linguagem, Métodos de busca e Base de Periódicos).

Fonte: Autor, 2024.

Figura 04 – Montagem do Protocolo (Critérios de Exclusão e Inclusão, Definição do Estudo, Formulários da Qualidade).

Fonte: Autor, 2024.

Figura 05 – Montagem do Protocolo (Critérios de Exclusão e Inclusão, Definição do Estudo).



Fonte: Autor, 2024.

Desta maneira (Figura 03), foram cadastradas cinco bases de buscas no protocolo, sendo elas, *Springer* (*Springer Nature Group*), periódicos CAPES (Portal de Periódicos da CAPES), *Scopus* (*Scopus Prewiew*), *Science Direct* e *Engineering Village*. As bases de dados são diversificadas contendo maior número de trabalhos relacionados ao objetivo de pesquisa.

Após a seleção das bases de dados, foram desenvolvidas “strings” de busca com palavras-chave para cada base de dados conforme a Tabela 01.

Tabela 01 – Strings por bases de dados.

Base de Dados	Strings de Busca
Science Direct	“truss” AND “structure” AND “engineering” AND “FEM OR finite element method” OR “frame” AND “heuristic” AND “genetic algorithm OR ag” AND “civil engineer” AND “firefly colony”
Periódicos Capes	
Engineering Village	
Scopus	
Springer	

Fonte: Autor, 2024.

Na etapa de *Execução* com software StArt, como foi dito acima, é a etapa responsável pela identificação dos estudos previamente selecionados nas bases de dados, seleção de todos os trabalhos “aceitos”, “rejeitados” e “duplicados”, extraíndo somente os trabalhos selecionados para a leitura completa do Artigo.

Nesse critério de seleção, os artigos devem estar relacionados ao uso de MEF na otimização de estruturas, rotina de otimização ideal para estruturas metálicas, importância da otimização de estruturas, utilização de algoritmo genético na otimização de estruturas, algoritmo da colônia de vagalumes para otimização de estruturas, para serem incluídos, além de estarem publicados entre 2015 e 2023 (já aceitos para publicação), contendo resumo, palavras-chave, ser escrito com coesão e coerência em línguas limitadas: português, inglês, espanhol e russo.

Ressalta-se que, de acordo com o protocolo montado, os trabalhos que não obtêm todos os critérios de seleção, estão rejeitados, além disso, a plataforma StArt tem a função de localizar os trabalhos duplicados e separá-los em pasta distinta, para que não entrem na contagem geral.

Como resultado desse trabalho sistemático, obteve-se a Tabela 02 abaixo, que elenca os trabalhos escolhidos a serem analisados e compilados na próxima etapa da revisão integrativa.

Tabela 02 – Autores escolhidos como referencial.

Autor	Título	F.I.
Kaminski & Solecka, 2012	Otimização das estruturas do tipo treliça usando o Método de Elementos Finitos Estocásticos baseado em perturbações generalizadas.	2.618
Renkavieski & Parpinelli, 2021	Algoritmos meta-heurísticos para otimização de treliças: mapeamento e aplicação da literatura.	8.665
Jiepeng Liu & Yi Xia, 2022	Um algoritmo genético inteligente híbrido para otimização de treliças baseado em redes neutras profundas.	10.267
Cao <i>et al.</i> , 2022	Dimensionamento e otimização de forma de treliça empregando uma técnica híbrida de manipulação de restrições e otimização de forrageamento de arraia manta.	8.665
The-Viet Há, <i>et al.</i> , 2022	Uma evolução diferencial paralela com estratégia de busca múltipla cooperativa para otimização de dimensionamento de treliças.	8.263

Fonte: Autor, 2024.

O estudo está estruturado em tópicos que avalia o melhor peso, o peso médio, desvio padrão e a quantidade de iterações que cada algoritmo estruturado realizou para que chegasse ao resultado na condição ótima. Para entender melhor, o processo iterativo é aquele que progride através de refinamentos sucessivos, ou seja, o próprio algoritmo irá executar o mesmo código certa quantidade de vezes, até o resultado ser um número satisfatório. A Tabela 03 demonstra os métodos utilizados por cada autor.

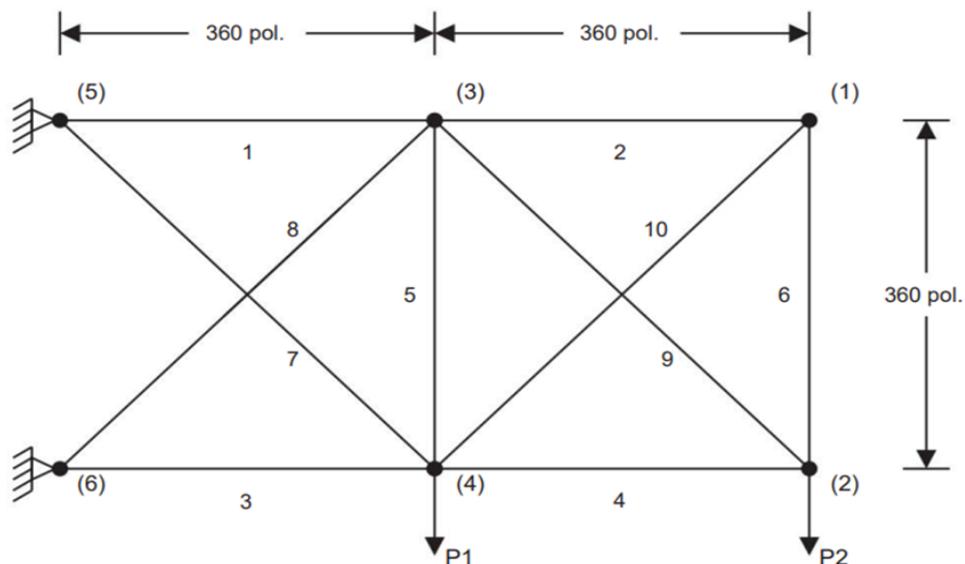
Tabela 03 – Autores e Métodos de Otimização.

Autor	Método de Interação
Kaminski & Solecka, 2012	
Renkavieski & Parpinelli, 2021	Algoritmo EB-A-SHADE
Jiepeng Liu & Yi Xia, 2022	HIGA - Algoritmo Genético (AG) + Rede Neural Algoritmo Genético (AG)
Cao <i>et al.</i> , 2022	CHT Híbrido DEB Mapeamento
The-Viet Há, <i>et al.</i> , 2022	PDECMS Algoritmo Genético (AG)

Fonte: Autor, 2024.

Para esta análise, foi considerada uma estrutura de treliça plana de 10 barras, conforme mostrado na Figura 05. Este problema de otimização foi resolvido por vários pesquisadores, como Ho-Huu, *et al.* 2016 usando evolução diferencial, Rajeev e Krishnamoorthy, 1992 usando Algoritmo Genético, Jawad, *et al.* 2021 usando o algoritmo heurístico da libélula e diversos outros. As propriedades do problema incluem a densidade do material de 0,1 lb/in.³ e o módulo de elasticidade de 104 ksi. As barras estão sujeitas às limitações de tensão de 25 ksi, enquanto as limitações de 2,0 pol. são usadas para deslocamentos nodais nas direções x e y.

Figura 05 – Modelo de Treliça Plana com 10 barras.



Fonte: Autor, 2024.

1.3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram tabulados os dados (Tabela 04) advindos de cada autor em um mesmo modelo (Figura 05), sendo ele a Treliça de 10 barras e separando cada um pelos métodos utilizados já informados na Tabela 03; realizadas as tabulações, passou-se a aplicações do problema de otimização juntamente com estruturas treliçadas pelo panorama teórico.

Tabela 04 – Autores e Métodos de Otimização.

Renkavieski & Parpinelli, 2021			
Melhor Peso	Peso Médio	Desvio Padrão	Interações
Algoritmo EB-A-SHADE			
2.581,89	2.581,89	1,72x10-11	30,00

Jiepeng Liu & Yi Xia, 2022			
Melhor Peso	Peso Médio	Desvio Padrão	Interações
Algoritmo Genético (AG)			
5.649,30	6.020,50	306,90	10,00
HIGA - Algoritmo Genético (AG) + Rede Neural			
5.499,30	5.547,10	25,20	10,00

Cao <i>et al.</i> , 2022			
Melhor Peso	Peso Médio	Desvio Padrão	Interações
CHT Híbrido			
5.060,86	5.066,57	7,58	10,00
DEB			
5.061,23	5.068,79	8,32	10,00
Mapeamento			
5.060,85	5.066,87	7,67	10,00

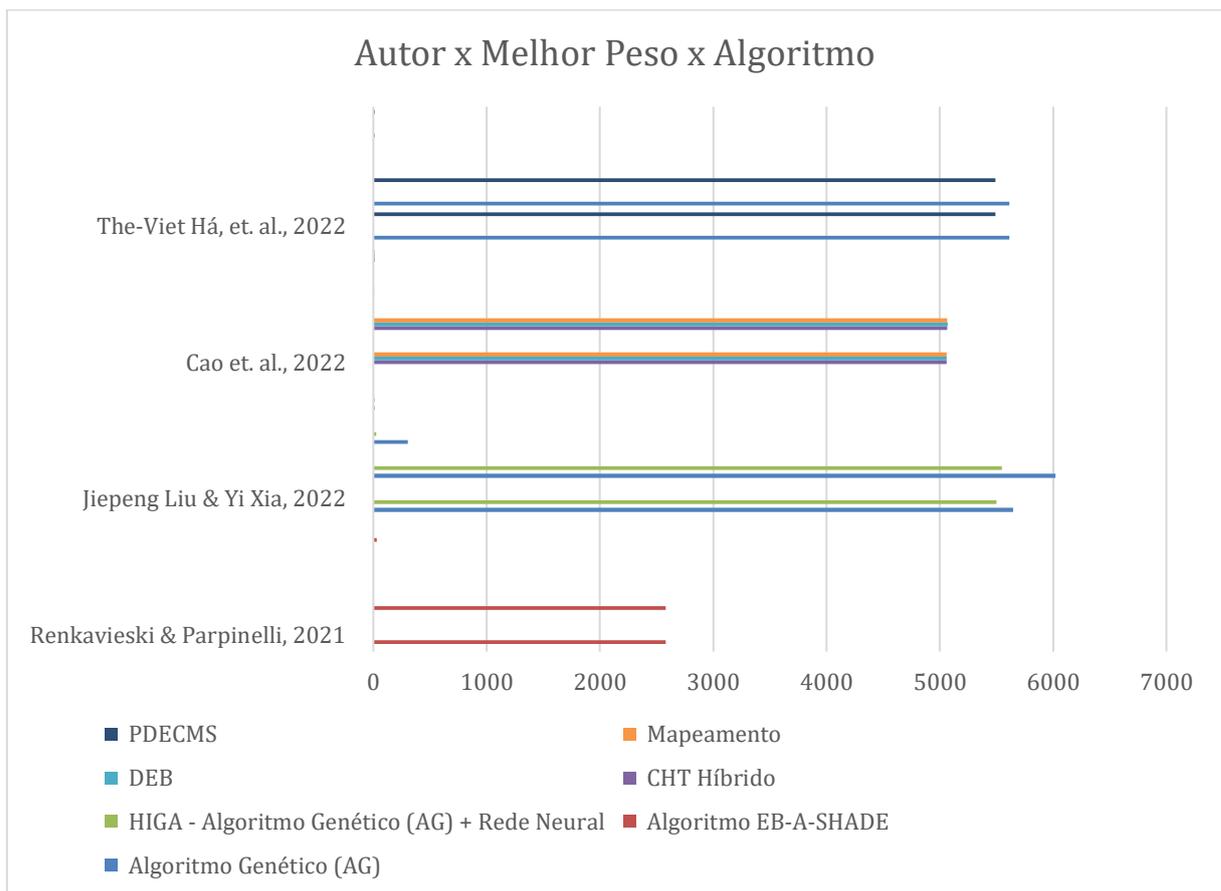
The-Viet Há, <i>et al.</i> , 2022			
Melhor Peso	Peso Médio	Desvio Padrão	Interações
Algoritmo Genético (AG)			
5.613,84	5.613,84	0,00	10,00
PDECMS			
5.490,74	5.490,74	0,00	10,00

Fonte: Autor, 2024.

As estruturas podem ser otimizadas de diferentes maneiras, por exemplo, na otimização de tamanho de estruturas treliçadas, a área da seção transversal dos membros da peça é otimizada.

Kaveh e Talatahari (2009) propuseram um método para otimizar tamanhos de treliças; na otimização da forma, as coordenadas dos nós da treliça são utilizadas como variáveis de ajuste para a geometria da treliça. A existência de membros da mesma é utilizada na otimização da topologia, como pode ser observado na Tabela 02.

Figura 06 – Gráfico comparativo entre os dados compilados da Tabela 04.



Fonte: Autor, 2024.

É perceptível a partir da Tabela 04 e Figura 06 que, o número de iterações interfere no resultado para o melhor peso, uma vez que de todos os autores, somente Renkavieski & Parpinelli, 2021 obtiveram resultados discrepantes em relação aos outros. O número de iterações é triplicado, podendo ou não explicar esse resultado, uma vez que são da ordem de 50% inferiores aos outros algoritmos.

Martinez e Cols (2011) criaram um método para otimizar o tamanho, a topologia e a forma das treliças, utilizando a otimização integrada de estruturas treliçadas.

Atualmente, vários métodos metaheurísticos de otimização têm sido investigados na otimização de treliças, como dito mais acima; na Tabela 04, pode-se observar qual autor estudado utilizou, e na Tabela 03 os resultados de cada um, seguindo o mesmo modelo (treliça plana de 10 barras).

Algoritmos genéticos (AG) inspirados na teoria da evolução natural foram adotados em 04 (quatro) dos 05 (cinco) autores estudados. O método de otimização por enxame de partículas motivado pelo comportamento coletivo inteligente dos animais é outro método usado na otimização de treliças, e pode ser observado em trabalho elencado, em que utilizou vários métodos para comparação.

Melhor Peso

A relação entre o melhor peso da treliça modelo é uma situação ótima no quesito de otimização de seção, uma vez que o algoritmo, seja qual for utilizado, realiza as interações solicitadas pelo programador, a fim de encontrar o melhor peso, neste caso, o menor peso, sem que a seção modelo seja modificada.

Pode-se verificar que dentre os autores estudados, o que alcançou o melhor peso para a estrutura de 10 barras foi Renkavieski & Parpinelli, 2021, utilizando o algoritmo EB-A-SHADE. O valor do peso *ótimo* encontrou-se na casa de 2.581,89 lbs.

Ademais, é notório afirmar que a discrepância entre os resultados deste autor com a dos outros é imensa, causando dúvidas em relação ao modelo, haja vista que os outros algoritmos deduziram valores bem próximos, com desvios padrão bem reduzidos, podendo indiciar erro na compilação, ou mesmo quantidade exorbitante de iterações em relação aos outros resultados.

Portanto, considera-se o melhor peso o valor de 5.060,86 lbs utilizando o CHT híbrido (Cao *et al.*, 2022), que é a junção de vários algoritmos naturais, como será descrito mais adiante.

Peso Médio

O peso médio é o valor final da otimização estrutural em que se está trabalhando, uma vez que as interações acontecem de forma aleatória, buscando o melhor peso, porém com desvio padrão minimizado, reduzindo as discrepâncias que podem prejudicar os resultados.

Tangente a isso, o autor que encontrou o peso médio *ótimo* foi o mesmo que elencou o melhor peso; não obstante, do que foi citado acima, podendo comparar os demais autores e

métodos utilizados, e é notório verificar que o peso médio mais baixo está na casa dos 5.066,57 lbs utilizando o CHT híbrido (Cao *et al.*, 2022), que é a junção de vários algoritmos naturais (colônia de vagalumes, colônia de formigas, etc), o que é extremamente natural, uma vez que os algoritmos trabalham de forma parecida, mudando somente a ordem de interações, porém mantendo a quantidade delas, o que é importante para que as comparações sejam cada vez mais homogênea.

Desvio Padrão e Interações

O desvio padrão e a quantidade de interações interferem diretamente na qualidade dos resultados, sendo que, cada uma dessas duas informações ligadas uma à outra, informam a confiabilidade da compilação dos dados.

Sendo assim, o menor desvio padrão, com a menor quantidade de interações, foi encontrado utilizando o CHT híbrido, sendo o valor de 7,58 no total de 10 interações.

Portanto, o melhor algoritmo para otimização de treliça plana, contendo 10 barras entre os autores elencados nos métodos desta revisão integrativa, é o CHT Híbrido proposto por Cao *et al.*, 2022.

1.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A otimização é um problema de engenharia popular, seja ela em estruturas treliçadas ou não, pois há múltiplas variações e abordagens. É um problema desafiador, com espaço de busca não linear, multimodal e multidimensional, justificando a aplicação de algoritmos metaheurísticos.

Este trabalho apresentou um mapeamento da literatura de forma integrativa, que busca responder a uma pergunta de pesquisa claramente formulada, utilizando métodos sistemáticos e explícitos para recuperar, selecionar e avaliar os resultados de estudos relevantes, sobre algoritmos metaheurísticos aplicados à otimização de treliças, e o resultado demonstra que a otimização não é apenas um campo de pesquisa ativo, mas em extrema ascendência.

O mapeamento também elenca grande variedade de técnicas que estão sendo aplicadas para a concepção de peças *ótimas*. Isso, combinado com o fato de se ter múltiplas abordagens para o problema, com graus variados de complexidade, significa que esse campo de pesquisa é desafiador.

Como o objetivo principal é discernir qual(is) o(s) método(s) mais eficientes para a otimização, comparando o trabalho de autores selecionados, de forma a determinar os métodos e resultados obtidos por cada autor, pode-se afirmar que o melhor método foi o CHT híbrido, que, nada mais é que a junção de vários algoritmos naturais.

Ainda é válido lembrar que, a pesquisa foi elaborada levando em consideração o método que cada autor utilizou nos respectivos resultados.

1.5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 16239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. Rio de Janeiro, 2013.

ALVES, L. M. **Métodos dos Elementos Finitos**. Março 2007. 438 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

AZAD, S. K.; BYBORDIANI, M.; AZAD, S. K.; JAWAD, F. K. J., **Simultaneous size and geometry optimization of steel trusses under dynamic excitations**. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 58, n. 6, 2018.

AZIZI, M.; AICKELIN, U.; KHORSHIDI, H. A.; SHISHEHGARKHANEH, M. B. **Shape and size optimization of truss structures by Chaos game optimization considering frequency constraints**, *Journal of Advanced Research*, 2022.

CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An introduction to Structural Optimization**. Springer, Linköping, 2009.

RENKAVIESKI, C.; PARPINELLI, R. S. **Meta-heuristic algorithms to truss optimization: Literature mapping and application**, *Expert Systems with Applications*, Volume 182, 2021, 115197, ISSN 0957-4174.

CV CAMP, BJ BICHON, SP STOVALL, **Projeto de armações de aço usando otimização de colônia de formigas**, *J. Struct. Eng.* 131 (3) (2005) 369–379.

FKJ JAWAD, M. MAHMOOD, D. WANG, O. AL-AZZAWI, A. AL-JAMELY, **Algoritmo de libélula heurística para projeto ideal de estruturas de treliça com variáveis discretas**, *Estruturas* 29 (2021) 843–862.

HO-HUU, V. et al. **An efficient combination of multi-objective evolutionary optimization and reliability analysis for reliability-based design optimization of truss structures.** Expert Systems with Applications, [s. l.], v. 102, p. 262–272, 2018.

HONGYOU CAO, WEN SUN, YUPENG CHEN, FAN KONG, LIUYANG FENG, **Sizing and shape optimization of truss employing a hybrid constraint-handling technique and manta ray foraging optimization,** Expert Systems with Applications, Volume 213, Part B, 2023, 118999, ISSN 0957-4174.

JIEPENG LIU, YI XIA, **A hybrid intelligent genetic algorithm for truss optimization based on deep neural network,** Swarm and Evolutionary Computation, Volume 73, 2022, 101120, ISSN 2210-6502.

KOZIEL, S., & YANG, X.-S. **Otimização computacional. Métodos e algoritmos: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.**

KRIPKA, M.; PRAVIA, Z. C.; MEDEIROS, G. F.; DIAS, M. M., **Simultaneous geometry and cross-section optimization of aluminum trusses. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures,** v. 12, n. 2, p.315-325, 2016.

KAMIŃSKI, M. SOLECKA, M. **Optimization of the truss-type structures using the generalized perturbation-based Stochastic Finite Element Method, Finite Elements in Analysis and Design,** Volume 63, 2013, Pages 69-79, ISSN 0168-874X.

MIGUEL, LFF. MIGUEL, LFF. **Shape and size optimization of truss structures considering dynamic constraints through modern metaheuristic algorithms.** Expert Systems with Applications, 39 (2012), DOI 9458-9467.

PEREIRA JÚNIOR, W. M. **Identificação Paramétrica do Concreto Simples e Reforçado com Fibras Utilizando Computação Bioinspirada.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Unidade Acadêmica Especial de Física e Química, Catalão, 2020.

RENKAVIESKI, C., & PARPINELLI, RS. **L-shade com tamanho de população alternativo redução para otimização contínua irrestrita.** Em XI Computador na Praia (págs. 351–358), 2020.

S. KATOCH, SS CHAUHAN, V. KUMAR, **Uma revisão sobre algoritmo genético: passado, presente e futuro, Multimed.** Ferramentas Appl. 80 (5) (2021) 8091–8126.

S. RAJEEV, CS KRISHNAMOORTHY, **Otimização discreta de estruturas usando algoritmos genéticos,** J. Struct. Eng. 118 (5) (1992) 1233-1250.

SILVA, F. E. de C. **Otimização dimensional, de forma e topológica de estruturas treliçadas utilizando um algoritmo híbrido.** Dissertação Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

SOUZA, R. **A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line towers.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

TECHASEN, T. et al. **Simultaneous topology, shape, and size optimization of trusses, taking account of uncertainties using multi-objective evolutionary algorithms.** Engineering with Computers, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 721–740, 2019.

THE-VIET HA, QUOC-HUNG NGUYEN, TAN-TIEN NGUYEN, **A parallel differential evolution with cooperative multi-search strategy for sizing truss optimization, Applied Soft Computing**, Volume 131, 2022, 109762, ISSN 1568-4946.

V. HO-HUU, T. NGUYEN-THOI, T. VO-DUY, T. NGUYEN-TRANG. **Uma evolução diferencial elitista adaptativa para otimização de estruturas treliçadas com variáveis de projeto discretas,** Comput. Estrutura. 165 (2016) 59–75

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design.** Vanderplaats Research & Development Inc., Colorado Springs, 1999.

VASCONCELOS, R. F., ALMEIDA, S. R. M.; PRADO, A. A. (2013, Novembro). Otimização de lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido segundo as normas brasileiras. Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Pirenópolis. CD-ROM.

XU, B.; JIN, Y. J. **Multiobjective dynamic topology optimization of truss with interval parameters based on interval possibility degree.** Journal of Vibration and Control, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 66–81, 2014.

ZARGHAM, S., WARD, T. A, RAMLI, R., & BADRUDDIN, I. A. **Otimização da topologia: uma revisão para projetos estruturais sob problemas de vibração.** Otimização Estrutural e Multidisciplinar, 53, 1157–1177, 2016.

CAPÍTULO II – UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAR A ESTRUTURA DE UMA TRELIÇA METÁLICA TUBULAR – ESTUDO DE CASO.

(Normas de acordo com a International Journal of Solids and Structures; ISSN 0020-7683;
Qualis A1 – Engenharias I)

RESUMO

A otimização estrutural é uma área em constante desenvolvimento, focada na melhoria do desempenho e eficiência das estruturas em termos de peso, custo e resistência. Apresentando uma abordagem para otimização de treliças planas em aços tubulares circulares utilizando algoritmos genéticos – AG, técnica que busca otimizar a estrutura por meio da evolução natural. Inicia-se o processo de otimização abordando uma população, funções objetivo (FO) e operadores genéticos como seleção, cruzamento e mutação. O método proposto envolve a função objetivo – Peso, que é formulada para minimizar o peso total da estrutura, sujeitando às restrições de resistência e de deslocamentos máximos permitidos segundo a norma brasileira. A população é retirada de um catálogo de fabricante de aço tubular denominada Vallourec para perfis tubulares (anéis) e inserida na plataforma de métodos computacionais para que seja inserida na FO e processada de acordo com os critérios de iteração. Para o estudo, analisou-se 02 tipos de treliça – Pratt e Howe, para 03 dimensões de Galpão (12m, 15m e 21m); para cada tipo de treliça e galpão foram realizados 10 processamentos e os resultados “ótimos” para cada processamento tabulado em tabelas para compilação dos resultados. Foram processados 10 resultados para a população fixa de 10, variando somente as iterações entre 01, 10 e 100, totalizando 30 processamentos. O mesmo processo foi realizado para a população de 100 indivíduos. Cada indivíduo representava uma treliça com as variáveis de projeto. E, as variáveis foram diâmetros externos e espessura do banzo, diagonal e montante, totalizando seis variáveis. Observou-se que a quantidade de população inicial é diretamente ligada ao bom resultado no processo de otimização, já que esta primeira geração é que irá atribuir maior ou menor variabilidade genética dos indivíduos. Contudo, o número de iterações é importante para a determinação dos melhores indivíduos adaptados, ou seja, do resultado ótimo, sendo que uma população inicial considerável tem maiores chances de possuir genes mais fortes para cruzamento, conseguindo chegar até 100% de resultados iguais para todos os processamentos.

Palavras-chave: Heurística. Iteração. Vallourec. Otimização.

CHAPTER II - USE OF GENETIC ALGORITHM TO OPTIMIZE THE STRUCTURE OF A TUBULAR STEEL TRUSS - CASE STUDY.

(Standards according to the International Journal of Solids and Structures; ISSN 0020-7683;
Qualis A1 – Engenharias I)

ABSTRACT

Structural optimization is an area in constant development, focused on improving the performance and efficiency of structures in terms of weight, cost and resistance. Presenting an approach to optimize circular tubular steel flat trusses using genetic algorithms (GA), a technique that seeks to optimize the structure through natural evolution. The optimization process begins with a population, objective functions (OF) and genetic operators such as selection, crossover, and mutation. The proposed method involves the objective function - Weight, which is formulated to minimize the total weight of the structure, subject to the restrictions of resistance and maximum displacements allowed according to the Brazilian standard. The population is taken from a tubular steel manufacturer's catalog called Vallourec for tubular profiles (rings) and inserted into the computational methods platform so that it can be inserted into the FO and processed according to the iteration criteria. For the study, two types of trusses were analyzed - Pratt and Howe, for three shed dimensions (12m, 15m and 21m); for each type of truss and shed, 10 processes were carried out and the “optimal” results for each process were tabulated in tables to compile the results. Ten results were processed for a fixed population of 10, varying only the iterations between 01, 10 and 100, totaling 30 processes. The same process was carried out for a population of 100 individuals. So, each individual represented a truss with its design variables. The variables were the outer diameters and thicknesses of the flange, diagonal and upright, totaling six variables. It was observed that the amount of initial population is directly linked to the good result in the optimization process, since this first generation is what will attribute greater or lesser genetic variability of the individuals. However, the number of iterations is important to determine the best adapted individuals, i.e. the optimum result, since a sizable initial population is more likely to have stronger genes for crossing, achieving up to 100% of the same results for all the processes.

Keyword: Heuristics. Iteration. Vallourec. Optimization.

2.1.INTRODUÇÃO

A estrutura metálica é um sistema estrutural muito utilizado no mercado da construção civil, seja pela versatilidade, capacidade em vencer grandes vãos, ou pela agilidade na execução, minimizando o prazo de obra, que levando a economia financeira. A história é uma jornada de inovação e engenhosidade que atravessa os séculos, uma vez que desde os primórdios da humanidade, o homem tem explorado o potencial dos metais para construir estruturas que desafiam as limitações impostas cada vez mais.

Ao longo do tempo, a metalurgia refinou-se, possibilitando a criação de estruturas cada vez mais leves, resistentes e elegantes. Assim como a própria história, a história das estruturas metálicas é uma narrativa de inovação e adaptação às demandas do tempo.

Quando se aborda o tema estruturas metálicas, é comumente e notório a assimilação às peças de aço carbono retangulares, uma vez que elas são mais vistas comercialmente, bem como peças laminadas e/ou soldadas em perfil I ou J, no termo comum, “vigas de alma cheia”, porém as estruturas metálicas tubulares representam uma faceta importante e versátil da engenharia estrutural contemporânea, oferecendo uma série de vantagens em variedade de aplicações.

Dentre as variedades na escolha do aço tubular, podendo destacar a versatilidade e adaptabilidade, são altamente adaptáveis a variedade de projetos arquitetônicos e de engenharia. A forma tubular permite a distribuição eficiente de cargas e forças, tornando-as ideais para uma ampla gama de estruturas, desde edifícios até pontes e torres. (McCormac e Csernak, 2011)

McCormac e Csernak, (2011) ainda tecem sobre a resistência, os tubos de aço conferem resistência excepcional à tração e compressão, tornando-os capazes de suportar grandes cargas e resistir a condições ambientais adversas, como ventos fortes. A forma tubular também proporciona excelente relação entre resistência e peso, resultando em estruturas mais leves em comparação com outras formas de construção; isso não apenas facilita o transporte e a montagem, mas a manutenção.

Essas estruturas tubulares oferecem amplas possibilidades estéticas e de design, permitindo a criação de formas orgânicas, esbeltas e modernas que seriam difíceis de alcançar com outros materiais. Essa flexibilidade permite que arquitetos e engenheiros explorem novas abordagens criativas na concepção de edifícios, como pode ser visto nas Figuras 01-a, 01-b, 02-a e 02-b.

Figura 01-a: Estrutura do Shopping Passeio das Águas – Goiânia GO

Figura 01-b: Estrutura do Aeroporto Santa Genoveva – Goiânia GO



Fonte: Galeria da Arquitetura, 2024.

Figura 02-a: Aço tubular.

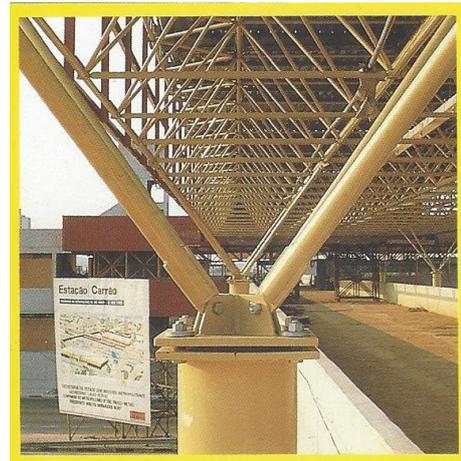


Fonte: INFRAERO, 2022.

Figura 02-b: Estrutura da Estação Carrão do Metrô de São Paulo SP.



Fonte: ASM Engenharia, 2022.



Fonte: Cabrini Soluções Metálicas, 2021.

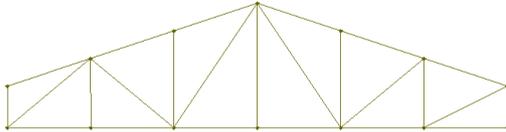
As peças metálicas abrangem boa parte da construção, a área estrutural é sem dúvidas uma das mais onerosas de todo o processo construtivo; tomando por base essa informação, fica claro que a otimização é um processo bastante positivo, para não dizer, necessário.

A estrutura do tipo treliça, dentre todas as outras, é a mais versátil e mais utilizada, porém deve atentar sempre as condições pré-estabelecidas para o projeto, uma vez que é necessário o mínimo de entendimento para realizar o cálculo estrutural correto, a fim de que a estrutura desempenhe seu devido papel. (Azizi, *et. al.*, 2022)

Tangente a isto, pode-se caracterizar essa versatilidade como treliças de banço paralelo, triangulares e trapezoidais. Quando se trata de racionalidade, é essencial comparar essas diferentes tipologias e selecionar a mais adequada para cada caso específico. A inteligência computacional, incluindo processos de otimização, pode e deve ser empregada para auxiliar no projeto e verificação desses sistemas.

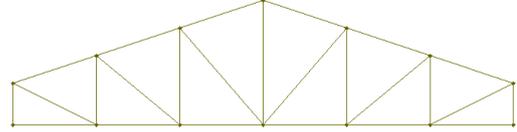
As treliças trapezoidais apresentam ligeira inclinação no banzo superior, tornando-as particularmente adequadas para aplicações em telhados, uma vez que há inclinação direta, facilitando a fixação de telhas. Tais modelos são mostrados nas Figuras 03-a, 03-b, 04-a e 04-b.

Figura 03-a: Treliça Fan



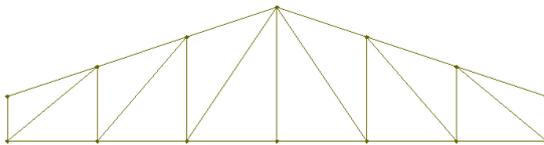
Fonte: Autor, 2024.

Figura 03-b: Treliça Howe



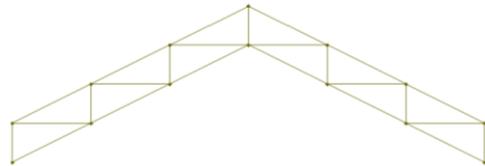
Fonte: Autor, 2024.

Figura 04-a: Treliça Pratt



Fonte: Autor, 2024.

Figura 04-b: Treliças de banzos paralelos



Fonte: Autor, 2024.

No Brasil, a ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, é a regente da descrição de princípios fundamentais e aceitáveis à concepção e projeto de estruturas metálicas. No que tange ao tópico de aços aprovados a serem utilizados nas estruturas metálicas, tem-se que o escoamento máximo deve ser 450MPa e a relação entre resistência a ruptura (f_u) e ao escoamento (f_y) não deve ser inferior a 1,18.

Além dessas definições, a mesma NBR ainda considera vários itens, julgados necessários à concepção de quaisquer projetos de estruturas, como ELS – Estado Limite de Serviço; ELU – Estado Limite Último, em que é explícito o enfoque principal da otimização estrutural, que é abranger as necessidades, bem como suprir as exigências normativas, o foco é encontrar uma solução ótima para o problema, ou seja, a minimização de peso juntamente com a maximização de resistência.

A aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) na otimização de treliças é um campo de estudo em engenharia estrutural que tem ganhado destaque nas últimas décadas. O MEF é uma técnica numérica utilizada para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais que descrevem o comportamento físico de estruturas complexas. Ao modelar uma treliça com

o MEF, a estrutura é dividida em elementos finitos, como barras ou vigas, e cada elemento é analisado individualmente. Esta abordagem permite a avaliação detalhada das tensões, deformações e deslocamentos em toda a treliça (Kim, *et. al*, 2010).

A otimização de treliças através do MEF busca encontrar a configuração geométrica que minimize o peso da estrutura, mantendo a resistência e a estabilidade necessárias para suportar as cargas aplicadas. Estudos recentes têm explorado algoritmos de otimização, como algoritmos genéticos e algoritmos de enxame de partículas, para encontrar a configuração ótima da treliça, levando em consideração restrições de projeto e critérios de desempenho. (Smith, J., & Johnson, R., 2020).

Destaca-se que a transição do projeto manual de sistemas treliçados para métodos computacionais, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), na engenharia estrutural é de grande relevância, no que tange à complexidade e a morosidade associadas ao projeto manual, que frequentemente envolve abordagem de tentativa e erro. A dependência de software de análise estrutural para auxiliar nesse processo, seja por meio da análise de matrizes ou do MEF é necessária para minimizar tal morosidade; é observado que os resultados obtidos por ambos os métodos tendem a ser semelhantes, como a matriz de rigidez e o vetor de forças nodais equivalentes.

As dimensões das geometrias de seção transversal são estabelecidas por meio de tentativas sucessivas, levando em consideração as restrições do projeto e usando respostas como deslocamento, cargas e tensões como guias para melhorias no projeto.

Dada a complexidade intrínseca do problema e a ampla gama de variáveis envolvidas, o método tradicional de cálculo manual está sendo gradualmente substituído por abordagens computacionais no projeto de estruturas. A integração da ciência computacional desempenha papel essencial em agilizar o processo de desenvolvimento das estruturas, facilitando a reprodução em escala e aprimorando a capacidade de testar e refinar os projetos (Moraes, *et al.*, 2022).

Contextualizando a otimização com as ciências computacionais, tem-se os algoritmos determinísticos e probabilísticos que representam duas abordagens distintas na solução de problemas computacionais. Algoritmos determinísticos seguem uma sequência predefinida de passos para alcançar uma solução conhecida, enquanto os algoritmos probabilísticos utilizam o conceito de probabilidade para tomar decisões durante o processo de resolução. Essas duas abordagens têm aplicações em variedade de campos, desde ciência da computação até matemática aplicada.

Os algoritmos determinísticos são altamente previsíveis e garantem a mesma saída para um dado conjunto de entradas. Eles são amplamente utilizados em problemas em que a solução é precisa e única. Já os algoritmos probabilísticos utilizam a aleatoriedade para alcançar soluções aproximadas para problemas complexos. Eles introduzem elementos de incerteza em seus cálculos e podem produzir resultados diferentes em diferentes execuções, dependendo das probabilidades associadas. Algoritmos probabilísticos são úteis em problemas em que encontrar uma solução exata é computacionalmente difícil ou impossível. Um exemplo clássico de algoritmo probabilístico é o algoritmo de Monte Carlo, amplamente utilizado em simulações e otimizações (Aho *et. al.*, 1983).

Os modelos de otimização são divididos em três tipos: otimização dimensional, otimização de forma e otimização topológica, porém, neste artigo trata apenas da otimização dimensional (De Souza, *et. al.*, 2016).

A abordagem da otimização probabilística abarca uma gama de métodos meta-heurísticos, os quais são subdivididos em técnicas bioinspiradas, cujos modelos matemáticos derivam da observação da natureza. Essas metaheurísticas, em geral, podem ser categorizadas em dois grupos principais: métodos centrados em soluções únicas e métodos centrados em populações (Blum, C.; Roli, A., 2003)

Os algoritmos genéticos (AGs) são classe de algoritmos de otimização e busca inspirados no processo evolutivo da natureza, como descrito por Charles Darwin. Uma definição sucinta de algoritmos genéticos é dada por Melanie Mitchell (1996): "Os algoritmos genéticos são métodos de busca e otimização baseados em princípios da seleção natural e da genética."

A resultante desse processo é ganho a favor da minimização do desperdício de materiais usados em uma estrutura, além ainda, de auxiliar na escolha de perfis mais esbeltos, bem como o posicionamento perfeito da peça dentro do ambiente.

Pode-se pressupor que, uma função objetivo (FO) maximizada ou minimizada é sinônimo de otimização; para tanto, a função da mesma é associar todos os parâmetros de projeto, plano de necessidade do problema de otimização, bem como todas as restrições de otimização (Souza, 2016; Silva, 2015; Pereira Junior, 2020)

O principal objetivo deste artigo é comparar diferentes tipologias para minimizar o peso da estrutura, não deixando de obedecer às especificações normativas de segurança. Além disso, outros objetivos deste estudo incluem:

- Analisar as restrições de projeto para cada tipologia.

- Avaliar as tensões da treliça otimizada nas verificações do Estado Limite Último (ELU).
- Verificação das condições do Estado Limite de Serviço (ELS) após a otimização.

2.2.REVISÃO DE LITERATURA

Função Objetivo

Define-se otimização como sendo a minimização ou maximização de uma função objetivo (FO), a mesma pode ser classificada em dois gêneros de funções: otimização restrita, quando a função apresenta variáveis de projeto restritas delimitando o espaço de busca, ou otimização irrestrita, quando não há restrições para os valores das variáveis de projeto. (Silva, 2015; Souza, 2016; Pereira Junior, 2020)

A função geral da FO é vincular os parâmetros do problema de otimização, as variáveis de projeto, sendo que estes parâmetros podem ser alterados, a fim de aperfeiçoar a função objetivo; e as restrições aplicadas às variáveis de projeto (Vanderplaats, 1999).

A abordagem probabilística tem algumas vantagens e desvantagens; apontando as vantagens tem-se que não é necessário apresentar a representação matemática da função objetivo, tampouco para as restrições, além de ser possível usar variáveis contínuas, discretas, lógicas, e até mesmo combinar esses tipos de variáveis; a função objetivo oferece bastante flexibilidade, permitindo que seja modificada de forma simples; além de ser possível otimizar grande volume de variáveis (Pereira Junior, 2020).

Suponha que a treliça seja representada por um conjunto de barras conectadas em nós, e cada barra possui uma determinada densidade de material (ρ) e comprimento (L). A função objetivo para minimizar o peso da treliça pode ser expressa da seguinte forma:

$$P = \sum_{i=0}^n \cdot \rho_i \cdot A_i \cdot L_i \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Em que:

n é o número de barras na treliça;

ρ_i é a densidade do material da i -ésima barra;

A_i é a área transversal da i -ésima barra;

L_i é o comprimento da i -ésima barra.

O objetivo é encontrar as dimensões ideais das barras (como área transversal) que resultam em uma treliça leve e eficiente, mantendo a integridade estrutural necessária para o seu propósito. Ressalta-se que o desenvolvimento de uma função objetivo específica pode variar dependendo das características e dos requisitos do projeto da treliça, bem como das restrições de tipologias aplicáveis; porém para este estudo, considera-se apenas o peso final da treliça como objeto a otimizar.

Algoritmo Genético (AG)

A definição de Algoritmo Genético proposta por Yang (2008) baseia-se em uma classe de algoritmos de otimização e em conceitos da teoria da evolução e genética. Esses algoritmos são inspirados no processo de seleção natural e na teoria genética de Darwin. Eles operam com população de soluções candidatas representadas por "indivíduos" que evoluem ao longo de gerações, utilizando operadores genéticos, como seleção, crossover e mutação, para gerar novas soluções e explorar o espaço de busca de forma eficiente.

Eles são amplamente utilizados para resolver problemas de otimização em variedade de domínios de aplicação pela capacidade de encontrar soluções de alta qualidade em espaços de busca complexos e multidimensionais.

O cruzamento e recombinação, mutação e seleção no estudo de sistemas adaptativos e artificiais são operadores genéticos que formam a parte essencial do algoritmo, sendo a estratégia para resolução de problemas. Há muitas vantagens dos algoritmos genéticos sobre algoritmos de otimização tradicionais, sendo duas das mais perceptíveis: a capacidade de lidar com problemas complexos e o paralelismo.

Os algoritmos genéticos podem lidar com vários tipos de otimização, quer a função objetivo seja estacionária ou não estacionária, linear ou não linear, contínua ou descontínua, ou com ruído aleatório. Como múltiplas proles em uma população atuam como agentes independentes, a população pode explorar o espaço de busca em muitas direções simultaneamente, por isso, os algoritmos genéticos continuam sendo um dos algoritmos de otimização mais amplamente utilizados na otimização não linear moderna.

A essência dos algoritmos genéticos envolve a codificação de uma função de otimização como matrizes de bits para representar os cromossomos, as operações de manipulação pelos

operadores genéticos, e a seleção de acordo com a aptidão e o objetivo de encontrar solução para o problema em questão, como pode ser observado na Figura 05.

A cada rodada é realizada uma iteração para criar nova população, que é chamada de geração; os operadores genéticos incluem crossover, mutação e seleção da população. O crossover de duas *strings* parentais é o operador principal com probabilidade mais alta e é realizado trocando um segmento de um cromossomo com o segmento correspondente em outro cromossomo em posição aleatória, realizando, assim a chamada mutação.

A probabilidade de mutação geralmente é pequena. A seleção de um indivíduo em uma população é realizada pela avaliação de sua aptidão, e pode permanecer na nova geração se atingir determinado limite de aptidão.

Para a minimização de uma função usando algoritmos genéticos, uma maneira simples de construir uma função de aptidão é usar a forma mais simples de função, assim o objetivo é maximizar a função de aptidão e subsequentemente minimizar a função objetivo $F(x)$.

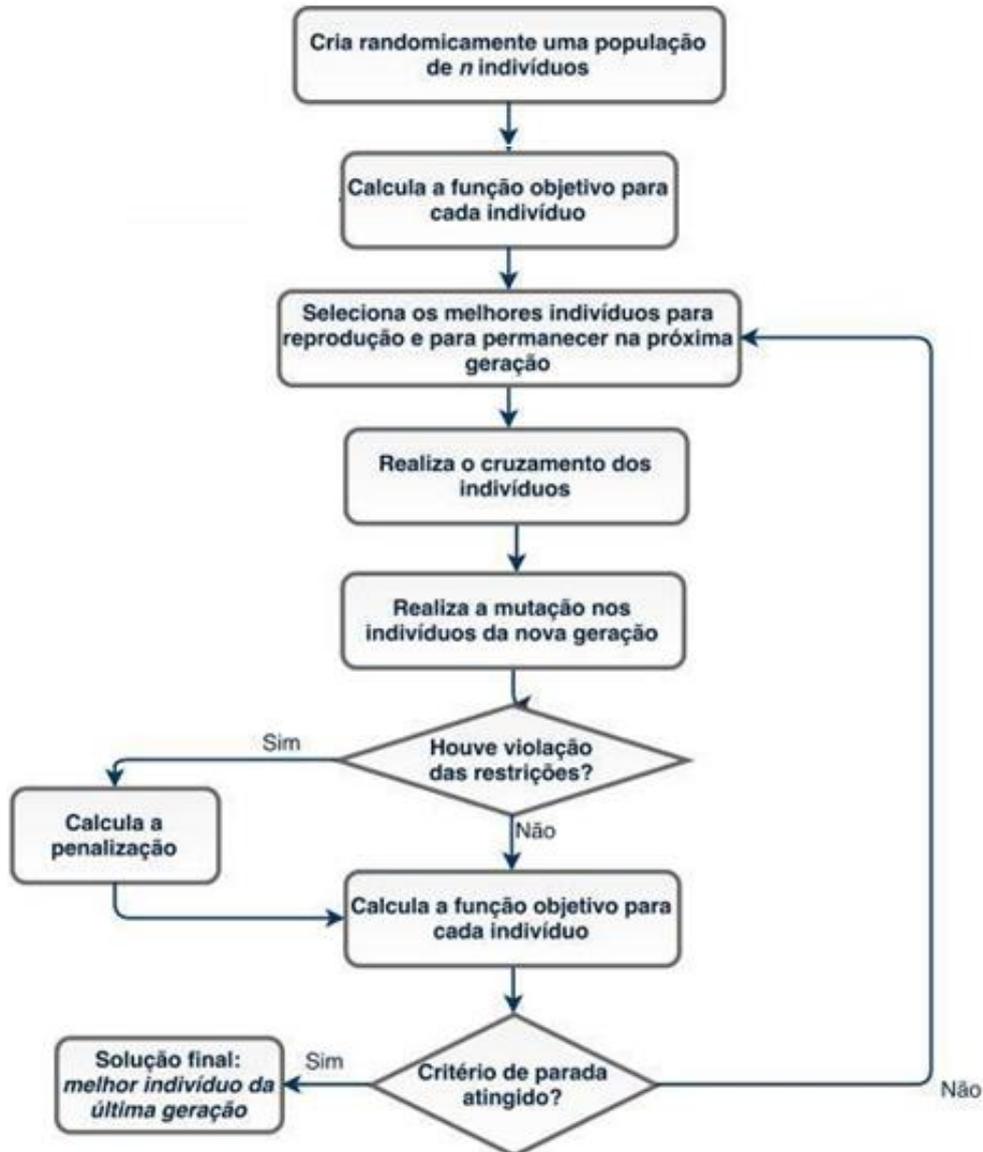
$$F(x_i) = \frac{f(\xi_i)}{\sum_{i=1}^N f(\xi_i)} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

A equação 2.2, acima descrita é um tipo de equação de aptidão em que ξ_i é o valor fenotípico do indivíduo i , e N é o tamanho da população.

Agora, adentrando à etapa de soluções, é notório saber que um critério adequado para selecionar as melhores soluções também é importante, uma vez que selecionar a população atual para que os melhores indivíduos com maior aptidão sejam preservados e passados para a próxima geração. Isso é frequentemente realizado em associação com algum elitismo. O elitismo básico é selecionar o indivíduo mais apto (em cada geração) que será passado para a nova geração sem ser modificado pelos operadores genéticos. Isso garante que a melhor solução seja alcançada mais rapidamente.

Os algoritmos genéticos são amplamente utilizados e existem muitos pacotes de software em quase todas as linguagens de programação. Neste trabalho, os códigos são genuínos e foram criados pelos autores, utilizando a correlação entre o AG e uma plataforma de elementos finitos chamado FINITO.

Figura 05: Fluxograma de um Algoritmo Genético (AG)



Fonte: Autor, 2024.

Restrições com modelo de Penalidade

Na busca por variáveis de projeto é comum a aplicação de restrições em um espaço viável, em que é minimizada a FO. Existem duas formas de obter essas avaliações das funções restritas, as que possuem abordagem indireta clássica ou as abordagens diretas. No trabalho em questão serão abordados a forma indireta clássica, que consiste em transformar a função objetivo restrita em uma função pseudo-objetivo irrestrita, as funções de penalidades só tornam-se ativas quando os problemas violarem as restrições (Carvalho; Figueiredo Filho, 2014).

Existem quatro tipos de métodos de penalizar usando esta função, sendo eles Métodos de Penalidade; Métodos de Barreira; Método de Lagrange e Métodos Híbridos. Todos obedecem a Equação 2.3, abaixo descrita, em que FO é a função objetivo do problema, rp é o coeficiente da função de penalidade e P é uma função de penalidade que contém as restrições de igualdade ou desigualdade do problema.

$$\phi(\vec{x}, rp) = FO(\vec{x}) + rp.P(\vec{x}) \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Os métodos de penalidade são baseados em encontrar solução viável através da distância até a região viável da função objetivo, ou até mesmo com o intuito de reparar “a solução” dentro do espaço viável de busca (Shoenauer; Michalewicz, 1996). As funções de penalidade geral, podem ser descritas pelas Equações abaixo descritas:

$$\phi = FO(\vec{x}) \quad \text{Se } \vec{x} \in \text{Região viável} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

$$\phi = FO(\vec{x}) + P(\vec{x}) \quad \text{Se } \vec{x} \notin \text{Região viável} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

A função $P(\vec{x})$ igual a zero, determina que não houve violação das restrições; diferentemente, em situações que seja positiva, houve violação das restrições e desta maneira, adiciona-se a penalidade ao equacionamento. Uma das principais vantagens deste método com relação aos métodos de barreira ou penalidade interior, é que não há necessidade de iniciar o processo de otimização para determinar uma região viável do espaço de busca (Haftka; Gurdal, 1992).

Restrições de Projeto

A NBR 8800 (2008), estabelece os requisitos básicos a serem seguidos em projetos, levando em consideração a temperatura ambiente do aço, tanto para execução de obras com estrutura de aço, seja total ou parcial, quanto para estruturas mistas, de aço e concreto.

Deve ser considerado os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS), ambos estão relacionados com a segurança das estruturas sujeitas às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil. Estas condições podem ser descritas como:

O Estado Limite Últimos (ELU) é expresso pelas desigualdades:

a) Condições usuais de segurança:

$$\theta(S_d, R_d) \geq 0 \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Em que S_d representa os valores de cálculo dos esforços atuantes (em alguns casos específicos, das tensões atuantes) e R_d representa os valores de cálculo dos correspondentes esforços resistentes (em alguns casos específicos, das tensões resistentes).

- b) Casos em que a verificação ocorre isoladamente em relação a cada um dos esforços atuantes, deve ser considerado:

$$R_d \geq S_d \quad \text{Eq. (2.7)}$$

O Estado Limites de Serviço (ELS) é expresso pela desigualdade:

$$S_{serv.} \leq S_{lim} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Em que $S_{serv.}$ representa os valores dos efeitos estruturais de interesse e S_{lim} representa os valores limites adotados para esses efeitos, fornecidos no Anexo C da NBR 8800 (2008).

Neste trabalho serão consideradas apenas as forças de tração e compressão das barras de uma treliça, portanto, após vislumbrar as definições de ELS e ELU, serão definidos a seguir os ELU's para barras tracionadas e barras comprimidas.

Para barras tracionadas podem ocorrer dois tipos de ELU: o escoamento da seção bruta (plastificação) e a ruptura da seção líquida. Para aprofundar, o escoamento da seção bruta ocorre quando a força de tração atuante na barra é igual à força axial de escoamento da seção bruta, vide equação abaixo:

$$N_y = A_g \cdot F_y \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Em que N_y é a força axial de escoamento de seção bruta; A_g é a área bruta de seção transversal; e F_y é a resistência ao escoamento do aço. Para que não o escoamento não ocorra, a NBR 8800 (2008) estabelece que se atenda a equação abaixo, em que $N_{t, sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo e γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10 para estados-limites últimos relacionados ao escoamento:

$$N_{t, sd} \leq \frac{A_g \cdot F_y}{\gamma_{a1}} \quad \text{Eq. (2.10)}$$

Quando se trata da condição de garantir que as barras não sofram ruptura da seção líquida, é necessário garantir a área líquida efetiva das peças tracionadas, como demonstrado na equação abaixo, sendo que A_e remete à área efetiva, A_g à área bruta e C_t o coeficiente de redução da resistência associado à excentricidade na transmissão de carga.

$$A_e = A_g \cdot C_t \quad \text{Eq. (2.11)}$$

Nas barras com seção tubular circular, que é o caso neste trabalho, em que o comprimento de ligação é l_c (comprimento da solda na direção da força axial) for igual ou superior a $1,3 \times D$ (diâmetro externo da barra), o coeficiente C_t , de acordo com a NBR 8800, deve ser igual a 1,0. Para critério de dimensionamento, deve ser considerado o coeficiente de ruptura do aço F_u , conforme equação abaixo:

$$N_{t, sd} \leq \frac{A_e \cdot F_u}{\gamma_{a2}} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

Quando se remete a barras comprimidas, considera que a instabilidade global por flexão no ELU das peças, devendo obedecer a equação abaixo, em que $N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo, $A_g \cdot F_y$ é a força de escoamento da seção bruta, o χ é o fator redução associado à resistência à compressão e o γ_{a1} é o coeficiente de ponderação resistência, igual a 1,10 para estados-limites últimos relacionados ao escoamento.

$$N_{c,Rd} = \frac{(\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot F_y)}{\gamma_{a1}} \quad \text{Eq. (2.13)}$$

A NBR 16239: 2013, determina que para encontrar os valores do fator χ deve considerar as equações abaixo, sendo que λ_0 trata-se do índice de esbeltez reduzido e N_e é a força axial de flambagem elástica, obtida conforme a ABNT NBR 8800; isso, para perfis tubulares com ou sem costura:

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{\frac{1}{2,24}}} \quad \text{Eq. (2.14)}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Para que possa calcular o N_e , deve-se escolher entre o menor resultado de duas equações, abaixo descritas, em que E_a trata-se do módulo de elasticidade do aço, I_x e $(K_x \cdot L_x)^2$, bem como I_y e $(K_y \cdot L_y)^2$ são os momentos de inércia da seção transversal e o comprimento de flambagem por flexão da barra em relação ao eixo de referência.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

Quando se fala de fator de redução total associado à flambagem local, Q , das seções tubulares comprimidas, depende do tipo de seção, como neste trabalho, é remetido à seções tubulares do tipo circular, tem-se as equações abaixo, em que D é o diâmetro externo da seção transversal tubular, e o t é a espessura da seção. Lembrando que é necessário enquadrar nos parâmetros exigidos.

$$Q = 1 \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,11 \cdot \frac{E}{F_y} \quad \text{Eq. (2.18)}$$

$$Q = \frac{0,038}{D/t} \cdot \frac{E}{F_y} + \frac{2}{3} \quad \text{para} \quad 0,11 \cdot \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \cdot \frac{E}{F_y} \quad \text{Eq. (2.19)}$$

A ABNT NBR 8800 (2008) também determina a verificação do limite do índice de esbelteza para barras comprimidas que é dada pela equação abaixo, em que K é o coeficiente de flambagem, L o comprimento e r o raio de giração.

$$\lambda = \left(\frac{K \cdot L}{r}\right)_{\max} \leq 200 \quad \text{Eq. (2.20)}$$

Para o deslocamento limite deve ser respeitado o Anexo C, tabela C.1 da NBR 8800:2008, em que é descrito o deslocamento máximo de uma viga de cobertura pela equação 2.21:

$$\delta = \left(\frac{L}{250}\right) \quad \text{Eq. (2.21)}$$

2.3. MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de projeto seguiu-se as diretrizes normativas da ABNT NBR 8800:2008 para dimensionar elementos sujeitos à compressão e tração e na etapa de otimização, o Algoritmo Genético (AG) foi empregado. Serão detalhados os métodos para calcular a função objetivo (FO) e o método de penalidade utilizados para realizar o estudo.

Com relação ao Algoritmo genético, utilizou-se o AG tradicional, sendo escolhida a função ‘roulette’, também de forma tradicional. A roleta seleciona proporcionalmente soluções parentais aleatoriamente com distribuição uniforme, portanto a probabilidade de ser selecionado depende da aptidão de uma solução. O processo evolucionista parte do método randômico Hill Climbing, que é um processo iterativo, em que ocorre a geração de vizinhos aleatórios à solução atual; essa taxa mutacionária está na ordem de 12%, bem como a covariância da mutação está na ordem de 15%.

A função ‘crossover’ remete ao cruzamento ou combinação de soluções para gerar novo indivíduo. Adotou-se o crossover do tipo linear, em que acontece a combinação linear entre os genes dos pais, gerando um novo indivíduo. Essa função é uma maneira de explorar novas áreas do espaço de soluções, sendo a ordem de fixação de 82% de chances da ocorrência.

Ademais, importa destacar que a abordagem tradicional de análise matricial foi utilizada, incluindo a derivação da matriz de rigidez para os seguintes elementos: barra com dois nós e quatro graus de liberdade. A partir da solução do sistema de equações de equilíbrio, que considera o equilíbrio entre as cargas nodais internas e externas, foram obtidos os deslocamentos, tensões e cargas normais em cada barra da treliça.

O plano de trabalho será executado de forma a iniciar as aplicações do problema de otimização juntamente com estruturas treliçadas do tipo Pratt e Howe para 03 (três) tipos de galpões, como será detalhado à frente. Para a análise final, é necessário compatibilizar o AG juntamente com a Função Objetivo e inserir um laço de repetição em 10 processamentos,

tabulando os resultados das melhores barras no software MS Excel e calculando o peso da treliça supra.

Cada aglomerado de processamento será analisado isoladamente da seguinte forma:

- Mantendo número de população inicial em 10 indivíduos e modificando o número de iterações entre o AG (01, 10 e 100);
- Mantendo número de população inicial em 100 indivíduos e modificando o número de iterações entre o AG (01, 10 e 100);
- O “melhor” resultado de cada processamento é dado em índices, que correspondem à linha do catálogo da Vallourec, inserido e lido dentro do AG; nessas linhas, contém o diâmetro externo e a espessura da barra, portanto é possível o cálculo do peso da treliça através dela.

Nas tabulações, poderão ser observados os “melhores” índices que o AG indica para a Função Objetivo da treliça dada, em consonância ao catálogo de referência da Vallourec, bem como a incidência deles nas barras do tipo “banzo”, “diagonal” e “montante”. Sendo assim, a partir dos índices “ótimos” é possível calcular o peso da estrutura e a incidência com que esse resultado foi encontrado, alterando a população e/ou a quantidade de iteração.

A partir da análise, será possível saber quais características são imprescindíveis para essa otimização.

Função Objetivo

A Função Objetivo (FO) de uma treliça tubular pode ser descrita como sendo o somatório dos pesos de todas as barras da treliça. Para tanto, deve-se saber as áreas externas e internas dos tubos, uma vez que isso é determinante para o problema de otimização do peso da treliça, que será o foco do estudo; observe que a equação (3.3) descreve o peso total dos tubos:

$$A_{s1} = \frac{D_e^2 \cdot \pi}{4} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

$$A_{s2} = \frac{(D_e - 2 \cdot t)^2 \cdot \pi}{4} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

$$w = \sum_{i=1}^n (A_{s1i} - A_{s2i}) \cdot \rho_i \cdot L_i \quad \text{Eq. (3.3)}$$

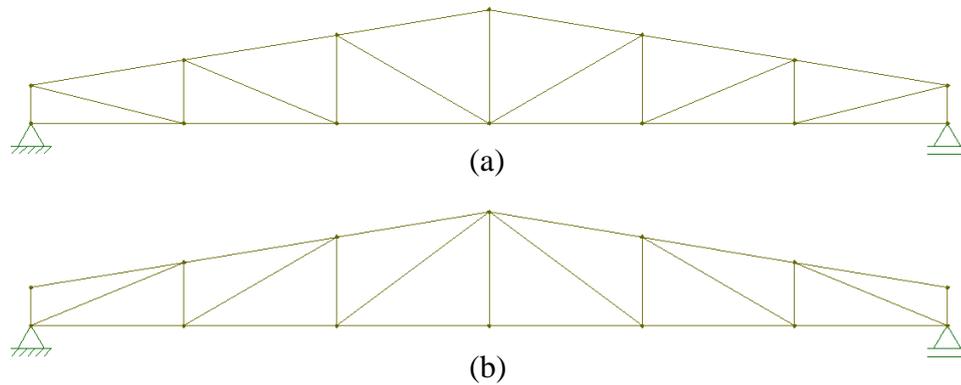
em que:

A_{s1} é área externa do tubo;	w é o peso dos tubos;
D_e é o diâmetro externo do tubo;	n é o número de barras;
A_{s2} é a área interna do tubo;	ρ é o peso específico do material;
t é a espessura do tubo;	L é o comprimento do tubo.

Parâmetros

No caso deste trabalho, as variáveis de projeto são representadas pelo diâmetro externo do tubo da treliça como, também a espessura deste tubo. Para tanto, serão admitidos dois tipos de treliça e três dimensionamentos de galpões comerciais.

Figura 06 - Tipos de treliça a serem utilizadas. (a) Howe; (b) Pratt;



Fonte: Autor, 2024.

As treliças admitidas para o estudo são: Howe e Pratt, como pode ser visto na Figura 06, bem como as dimensões para os três tipos de galpões a serem estudados estão descritos na Figura 07 e Tabela 01.

Tabela 01 - Variáveis e Tipos de Galpões a serem estudados.

	Galpão A	Galpão B	Galpão C
Comprimento (C)	30,0	30,0	30,0
Largura (L)	12,0	15,0	21,0
Pé-direito (H₀)	6,00	6,00	6,00
Altura da treliça (H)	1,50	1,875	2,625
Altura montante a menor (h)	0,5	0,625	0,875
Largura banzo inferior (b)	2,00	2,50	3,50

Fonte: Autor, 2024.

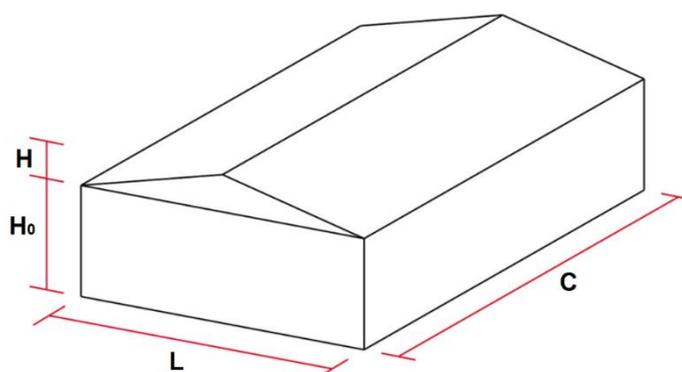
Ademais, tendo ainda os parâmetros fixos de variáveis de entrada para o problema de otimização, isto é, não mudam no decorrer das iterações do algoritmo. Conforme a NBR 8800 (2008), tendo as propriedades mecânicas gerais do aço escolhido, como segue na Tabela 02.

Tabela 02 Parâmetros fixos do projeto de treliças.

Parâmetro	Valor
Módulo de Elasticidade (E)	200.000 MPa;
Coefficiente de Poisson (ν):	0,3;
Módulo de Elasticidade transversal (G)	77.000 MPa
Coefficiente de dilatação térmica (β)	$1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Massa específica (ρ)	7.850 Kg/m ³

Fonte: Autor, 2024.

Figura 07 – Dimensões do Galpão



Fonte: Autor, 2024.

Carregamentos

As definições das ações atuantes nas treliças seguem os requisitos das normas NBR 6120, NBR 6123, e NBR 8681 e estão descritas no Apêndice “A” desta peça.

Restrições de Projeto

As restrições consideradas neste problema de otimização seguem as Normas Brasileiras Regulamentadoras – NBR 8800:2008 – Projeto de Estrutura de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios; e NBR 16239:2013 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares. As equações abaixo descritas

possuem características adimensionais, para tanto, a equação 3.7 apresenta resultados relacionados à força normal resistente no elemento de barra, e, os demais resultados relacionados às restrições construtivas (3.8) e de esbeltez (3.9).

$$\frac{\sigma_{b,t}}{\sigma_{max}} - 1 \leq 0 \quad g_j, j = 1 a n_{bar} \quad \text{Eq. (3.6)}$$

$$\frac{a}{a_{lim}} - 1 \leq 0 \quad g_j, j = 1 \quad \text{Eq. (3.7)}$$

$$\frac{D}{t} > 0,45 \frac{E}{f_y} \quad \text{Eq. (3.8)}$$

$$\frac{L}{r} < 300 \quad \text{Eq. (3.9)}$$

Em que:

$\sigma_{b,t}$	é a tensão normal nas barras;	t	é a espessura;
σ_{max}	é a tensão máxima;	E	é o módulo de elasticidade
g_j	é as restrições de desigualdade;	f_y	é a resistência ao escoamento;
a	é a deflexão das barras;	L	é o comprimento;
a_{lim}	é a deflexão máxima;	r	é o raio de giração.
D	é o diâmetro;		

Para calcular os esforços e deslocamentos de projeto, bem como as ações permanentes, as ações variáveis foram consideradas separadamente, considerando os seguintes fatores de combinação (ψ_0) e fatores de redução (ψ_1 e ψ_2) para carregamento variável conforme NBR 8681.

Portanto, para o estudo, considera-se conforme NBR 8800 as combinações abaixo descritas na Tabela 03, para o ELU e ELS.

Tabela 03: Combinações a serem utilizadas de acordo com os Estados Limites.

Estado Limite	Equação para Cálculo
	$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{0j} \cdot F_{Qj,k})$

ELU	$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{0j,ef} \cdot F_{Qj,k})$
ELS	$F_{serv.} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} \cdot F_{Qj,k})$
	$F_{serv.} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \Psi_1 \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{2j} \cdot F_{Qj,k})$

Fonte: ABNT NBR 8800, 2008.

Em que:

$F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ representa o valor da ação variável principal/especial para a combinação;

$F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;

$\Psi_{0j,ef}$ representa os fatores de combinação efetivos de cada uma das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável especial F_{Q1} ;

2.4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados dos processamentos de cada modelo de treliça. Na Tabela 04-a são apresentados os resultados da Treliça Pratt – Galpão 12 m. Esta tabela contém um grupo de 3 processamentos, em forma de subtabelas. As três subtabelas são resultados de processamentos com população igual a 10 indivíduos, variando o número de iterações, sendo 1, 10 e 100 iterações, respectivamente.

Na Tabela 04-b são apresentados os outros três processamentos, utilizando a população de 100, variando ainda, entre 1, 10 e 100 iterações.

Nestas tabelas as abreviações Pc, Bz, Dg e Mt, significam: número do processamento, o índice da linha do catálogo Vallourec (ANEXO A) para o banzo, para a diagonal e para o montante, respectivamente.

As Tabelas 04-a e 04-b referem-se ao processamento de dados em 10 vezes de uma treliça do tipo Pratt para um Galpão de 12 m de largura (Galpão A). As linhas destacadas por cor referem-se ao conjunto de dados que são idênticos, ou seja, toda treliça teve a repetição inteira do resultado. Todas as outras Tabelas que forem inseridas seguem o mesmo padrão de apresentação de resultados.

Cada processamento gerou um resultado de índice de linha do catálogo da Vallourec, e para cada linha, deste catálogo, é possível encontrar o diâmetro externo e a espessura do tubo. Assim, como o tamanho de cada elemento (banzo, diagonal e montante) são conhecidos, foi possível determinar o peso total da treliça, disponível para cada processamento, como pode ser visto nas Tabelas 04-a e 04-b.

Tabela 04-a– Treliça Pratt (Galpão 12m).

Treliça Pratt - Galpão 12 m														
Iteração: 01					Iteração: 10					Iteração: 100				
População: 10					População: 10					População: 10				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	108	99	72	1.985,01	1	141	105	141	7.634,80	1	118	102	135	5.312,16
2	93	93	100	2.850,53	2	114	107	120	3.096,91	2	141	105	139	7.256,87
3	91	85	71	1.821,15	3	87	74	71	1.326,78	3	105	81	123	3.564,85
4	95	73	59	1.219,69	4	106	91	135	4.246,85	4	138	123	125	4.753,24
5	108	99	72	1.985,01	5	81	69	98	2.079,91	5	103	88	120	2.807,36
6	78	81	91	2.058,67	6	94	81	88	2.770,24	6	141	135	137	7.017,38
7	78	81	91	2.058,67	7	97	44	95	1.498,66	7	141	114	137	6.973,48
8	141	141	101	8.202,65	8	98	53	121	1.721,28	8	121	91	109	2.434,15
9	95	73	59	1.219,69	9	110	57	109	2.109,88	9	141	105	137	1.985,01
10	69	77	32	1.432,71	10	125	78	95	2.823,87	10	141	135	138	7.114,41
%	20	20	20		%	10	10	10		%	50	20	30	

Fonte: Autor, 2024.

Nota-se que na primeira subtabela (Iteração igual a 01 e população igual a 10) houve, em linhas, 03 tipos de treliça que repetiram completamente duas vezes cada, sendo que para o banzo encontraram dois resultados com o índice de linha do catálogo Vallourec igual a 108 (20% dos resultados), outros dois resultados de índice igual 95 (20% dos resultados), e, também, índice igual a 78 (20% dos resultados). Os outros processamentos apresentaram índices diferentes entre si, resultando em 10% dos resultados para cada um. Como 20% foi o maior resultado encontrado para o montante, para um mesmo índice, este valor foi adotado como resultado para esta coluna.

Para iteração igual a 10, segunda subtabela, e mantendo a população igual a 10, observa-se que todos os resultados foram da ordem de 10%.

A terceira subtabela, apresenta o resultado do processamento com população igual a 10 e número de iterações igual a 100. Os resultados foram iguais a 50% para banzo, 20% para diagonal e 30% para montante.

Quando se analisa entre as linhas as três subtabelas da Tabela 04-a, observa-se que na primeira, alguns processamentos geraram resultados iguais para o conjunto banzo, diagonal e montante. Isso pode ser observado para os processamentos 1 e 5, que foram destacados na cor verde. O mesmo pode ser observado para os processamentos 4 e 9 (destacados na cor laranja), e, por fim, nos processamentos 6 e 7 (destacados na cor amarela).

Isso não ocorreu para a segunda e terceira subtabelas, que entre processamentos o grupo banzo, diagonal e montante obtiveram resultados diferentes entre si.

Dessa forma, observa-se que ao aumentar o número de iterações de 1 até 100, para uma população de 10 indivíduos, não apresentou tendência de convergência dos resultados entre processamentos. Contudo, apresentou tendência de convergência dos resultados isoladamente do banzo e isoladamente do montante, quando se utilizou 100 iterações.

Provavelmente, os resultados tenderam a ser divergentes pela baixa variabilidade genética do número de população escolhida, que foi de apenas 10 indivíduos. Isso quer dizer que, poucos índices da tabela Vallourec foram escolhidos para determinar diâmetros e espessuras das barras, devido a população ser de apenas 10 indivíduos.

Para verificar esta hipótese, a mesma variação de iterações (1, 10 e 100) foram processadas, agora para população 10 vezes maior, ou seja, população igual a 100. Os resultados podem ser vistos na Tabela 04-b.

Tabela 04-b– Treliça Pratt (Galpão 12m).

Treliça Pratt - Galpão 12 m														
Iteração: 01 População: 100					Iteração: 10 População: 100					Iteração: 100 População: 100				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	141	105	141	7.634,80	1	128	81	133	4.179,23	1	137	109	132	4.062,42
2	141	104	136	6.842,76	2	141	135	137	7.017,38	2	137	121	132	3.783,63
3	127	90	124	3.794,62	3	137	121	132	4.106,31	3	127	120	132	3.765,95
4	141	114	141	7.525,06	4	139	132	134	5.046,36	4	137	109	132	4.062,42
5	141	116	141	7.799,41	5	141	114	137	6.973,48	5	137	121	132	3.783,63
6	141	116	135	7.079,30	6	141	135	137	7.017,38	6	137	121	132	3.783,63
7	141	115	141	7.678,70	7	138	122	133	4.606,94	7	137	109	132	4.062,42
8	141	105	141	7.634,80	8	139	112	134	5.080,38	8	136	90	132	3.680,47
9	141	105	141	7.634,80	9	137	121	132	4.106,31	9	137	109	132	4.062,42
10	141	106	141	7.931,11	10	139	111	134	4.993,68	10	137	109	132	4.062,42
%	90	30	70		%	30	20	30		%	80	50	100	

Fonte: Autor, 2024.

A mesma observação é feita quando a iteração é variada de 1 para 10 e para 100, mas a população é mantida em 100 para a mesma Treliça Pratt - Galpão 12m. Sendo assim, com a iteração igual a 1, nota-se que para a treliça completa foram 30% de tendência para o índice 141, 105 e 141 para banzo, diagonal e montante respectivamente e de 10% para os demais.

Ao mudar a interação para 10 e mantendo a população igual ao caso anterior, observa-se a redução do perfil metálico mantendo a taxa de 20% de aproveitamento nos índices 141, 135 e 137, bem como nos índices 137, 121 e 132, representando da mesma forma banzo, diagonal e montante respectivamente, e de 10% para os demais índices. No entanto, ao analisar a tabela com 100 iterações para a mesma população das iterações anteriores, nota-se que aumentou o índice de convergência, mantendo 50% dos resultados no perfil 137, 109 e 132 e 30% no perfil 137, 121 e 132 para banzo, diagonal e montante respectivamente, deixando 10% para os demais.

Quando a análise é realizada em colunas, percebe-se que os dados estão tendo maior convergência, uma vez que na primeira subtabela, o banzo teve 80% de incidência no perfil 141, seguido de 70% do mesmo perfil para montante e 30% do perfil 105 para a diagonal. Na segunda subtabela, é notório que não houve melhora, porém já na terceira subtabela observa-se que a variância de índices do catálogo diminui bastante, mostrando índice de 80% para o banzo de perfil 137, 50% para diagonal de perfil 105 e 100% de montante com perfil 132 do catálogo supracitado.

Ademais, abaixo será demonstrado para a treliça do tipo “Howe”, os dados extraídos, com a mesma aparência das tabelas anteriores.

Tabela 05-a– Treliça Howe (Galpão 12m).

Treliça Howe - Galpão 12 m														
Iteração: 01					Iteração: 10					Iteração: 100				
População: 10					População: 10					População: 10				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	120	68	82	1.753,60	1	97	75	64	1.520,65	1	139	124	134	5.101,16
2	57	42	56	1.032,96	2	141	135	140	7.236,50	2	141	126	137	6.966,02
3	56	68	58	1.076,44	3	80	69	85	1.839,35	3	129	123	124	4.481,26
4	120	68	82	1.753,60	4	141	126	138	7.063,06	4	141	105	137	7.005,21
5	57	42	56	1.032,96	5	88	67	82	1.441,75	5	141	126	137	6.966,02
6	120	68	82	1.753,60	6	116	111	125	4.058,38	6	126	79	121	3.259,36
7	72	53	82	887,31	7	141	138	128	7.485,23	7	128	100	134	4.238,17
8	120	68	82	1.753,60	8	141	115	138	7.135,04	8	141	135	137	6.935,17
9	72	53	82	887,31	9	106	101	109	4.059,29	9	129	101	124	4.526,42

10	57	42	56	1.032,96	10	130	103	136	5.363,82	10	114	81	109	3.223,30
%	40	50	60		%	40	10	20		%	40	20	40	

Fonte: Autor, 2024.

Nota-se na Tabela 05-a que houve algumas diferenças em relação às porcentagens vistas na Tabela 04-b; ocorrendo pela geometria da treliça, uma vez que as diagonais mudam de tamanho, mudando o cálculo dos esforços internos, bem como do peso. Pois, as diagonais da treliça do tipo Howe são menores que a treliça do tipo Pratt.

Percebe-se na primeira subtabela (Iteração igual a 01 e população igual a 10), em linhas, 03 tipos de treliça que repetiram completamente, sendo uma delas em 04 processamentos e as demais duas vezes cada, tendo 40% dos resultados para os índices 120, 68 e 82 do catálogo Vallourec para banzo, diagonal e montante, respectivamente. Os outros processamentos apresentaram índices diferentes entre si, resultando em 10% dos resultados para cada um. Como 20% foi o maior resultado encontrado para o montante, para o mesmo índice, este valor foi adotado como resultado para esta coluna.

Nas demais subtabelas é notório a percepção feita na Tabela 04-a, justificada pela similaridade entre vãos e a diferença geométrica somente nas diagonais. A segunda subtabela apresentou ordem de 10% para cada tipo de treliça completa, porém separadamente para banzo, diagonal e montante, houve incidência de 40%, 10% e 20% respectivamente. Quando observada, a terceira subtabela está com similaridade integral na ordem de 20% e isoladamente em 40%, 20% e 40% respectivamente para banzo, diagonal e montante.

Diferentemente da tabela analisada, na Tabela 05-b subtabela 01, houve a redução no afinamento de repetições de treliça completas, ficando na ordem de 10%, porém na subtabela 02 este índice sobe para 40% e na subtabela 03 sobe para 50%, tendo um secundário com 20%. Verificando as colunas, as repetições ficam mais interessante, uma vez que na subtabela 01, quando há somente iteração, os valores ficam repetidos na ordem de 30%, 10% e 20% para banzo, diagonal e montante; já na subtabela 02 esses índices aumentam para 40%, 40% e 60%, também na ordem respectiva, anteriormente citada. Para a última subtabela esses índices afinam em 80%, 50% e 100%, podendo observar a diminuição na variância entre os índices do catálogo quando há população maior.

Tabela 05-b– Treliça Howe (Galpão 12m).

Treliça Howe - Galpão 12 m														
Iteração: 01					Iteração: 10					Iteração: 100				
População: 100					População: 100					População: 100				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	129	112	135	4.727,27	1	136	120	132	3.664,93	1	136	108	132	3.618,66
2	141	135	141	7.486,75	2	141	114	137	6.894,04	2	136	90	132	3.638,20
3	105	110	109	3.463,50	3	126	108	121	3.286,10	3	106	122	132	4.148,04
4	129	122	139	4.955,31	4	127	109	122	3.709,81	4	136	120	132	3.664,93
5	141	129	117	7.474,81	5	115	98	132	3.492,43	5	136	120	132	3.664,93
6	141	116	141	7.702,70	6	115	98	132	3.492,43	6	136	120	132	3.664,93
7	113	90	112	3.027,65	7	106	81	132	4.031,83	7	136	120	132	3.664,93
8	90	55	120	1.783,66	8	139	132	134	4.985,99	8	136	120	132	3.664,93
9	111	67	121	2.295,55	9	115	98	132	3.492,43	9	136	108	132	3.618,66
10	106	109	123	4.014,88	10	115	98	132	3.492,43	10	115	98	132	3.492,43
%	30	10	20		%	40	40	60		%	80	50	100	

Fonte: Autor, 2024.

Neste interim, abaixo serão apresentados os resultados, no mesmo layout que foi apresentado para o vão de 12 metros (Galpão A), para o vão de 15 metros, representado pelo Galpão B na Tabela 01. Os resultados estão demonstrados nas Tabelas 06-a, 06-b, 07-a e 07-b, sendo que as duas primeiras estão com a Treliça do tipo Pratt e as demais com a Treliça do tipo Howe.

Tabela 06-a– Treliça Pratt (Galpão 15m).

Treliça Pratt - Galpão 15 m														
Iteração: 01					Iteração: 10					Iteração: 100				
População: 10					População: 10					População: 10				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	92	69	111	2.955,70	1	129	134	126	6.255,34	1	141	136	136	8.876,17
2	118	90	125	6.151,57	2	141	126	137	8.806,52	2	141	136	136	8.876,17
3	114	122	74	2.655,43	3	141	129	136	9.328,21	3	140	134	135	7.255,94
4	75	64	48	1.300,92	4	140	124	136	7.215,53	4	141	136	136	8.876,17
5	118	90	125	6.151,57	5	141	137	141	9.906,31	5	141	136	136	8.876,17
6	112	88	127	3.707,18	6	141	137	141	9.906,31	6	141	136	136	8.876,17
7	75	64	48	1.300,92	7	141	136	137	8.984,60	7	141	136	136	8.876,17
8	75	64	48	1.300,92	8	139	101	136	6.382,94	8	141	136	136	8.876,17
9	118	90	125	6.151,57	9	128	103	124	5.701,91	9	117	101	132	5.238,70
10	94	102	69	3.747,35	10	141	127	137	9.025,69	10	140	134	135	7.255,94
%	30	30	30		%	60	20	30		%	70	70	70	

Fonte: Autor, 2024.

Na subtabela 01 da Tabela 06-a percebe-se a recorrência de dois perfis, montando em 30% cada um, somando mais da metade dos processamentos, sendo eles 02, 05 e 09 – destacados na cor verde e 04, 07 e 08 – destacados na cor amarela; na análise entre colunas é notório que não houve modificações em relação ao já observado, montando em 30% cada uma das peças, banzo, diagonal e montante.

Quando se altera a iteração de 1 para 10 (segunda sub tabela), nota-se que somente dois processamentos resultaram em recorrência, sendo eles 05 e 06, porém entre colunas houve significativa melhora para o banzo, uma vez que houve a taxa de 60% na permanência do índice 141. Os outros processamentos para essa subtabela foram mantidos.

Em relação à terceira subtabela, em que as iterações sobem para ordem de 100, tem 70% de incidência em um perfil completo, sendo banzo, diagonal e montante definidos com os mesmos índices do catálogo da Vallourec. Ademais, houve também 70% em cada peça isoladamente, mantendo assim, o índice baixo de variância entre os resultados.

Dessa forma, observa-se que ao aumentar o número de iterações de 1 até 100, para uma população de 10 indivíduos, apresentou tendência de convergência dos resultados entre processamentos, bem como apresentou tendência de convergência dos resultados isoladamente do banzo diagonal e montante, quando utilizou 100 iterações.

Verificando agora, a mudança no número de população inicial e mantendo a variabilidade do número de iterações, os resultados estão apresentados na Tabela 06-b.

Tabela 06-b– Treliça Pratt (Galpão 15m).

Treliça Pratt - Galpão 15 m														
Iteração: 01 População: 100					Iteração: 10 População: 100					Iteração: 100 População: 100				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	141	139	116	2.955,70	1	139	133	133	6.336,29	1	140	104	135	7.283,34
2	141	128	136	2.955,70	2	140	134	135	7.255,94	2	140	104	135	7.283,34
3	114	80	133	2.955,70	3	141	136	136	8.876,17	3	140	104	135	7.283,34
4	141	136	141	9.673,44	4	140	134	135	7.255,94	4	130	103	134	6.621,97
5	141	139	141	2.955,70	5	140	125	135	7.242,24	5	140	104	135	7.283,34
6	141	136	141	9.673,44	6	141	136	136	8.876,17	6	140	104	135	7.283,34
7	141	104	141	2.955,70	7	139	124	134	6.456,83	7	138	112	133	5.906,59
8	141	128	126	2.955,70	8	141	136	136	8.876,17	8	140	104	135	7.283,34
9	141	136	141	9.673,44	9	139	124	133	6.373,27	9	140	104	135	7.283,34
10	141	139	138	2.955,70	10	140	125	135	7.242,24	10	140	104	135	7.283,34
%	100	30	50		%	40	30	40		%	80	80	80	

Fonte: Autor, 2024.

Quando a iteração é variada de 1 para 10 e para 100, mas, a população é mantida em 100 para a Treliça Pratt - Galpão 15m, tem que a recorrência geral do perfil treliçado é de 30% (índices 04, 06 e 09 do processamento), porém é sabido que o banzo conseguiu atingir 100% de convergência, diferentemente da diagonal que ficou com 30% e a montante com 50%. Isso implica que, com a iteração igual a 1, houve melhora significativa na recorrência destinada ao perfil do banzo.

Ao mudar a interação para 10 e mantendo a população igual ao caso anterior, observa-se redução do perfil metálico mantendo a taxa de 30% de aproveitamento nos índices 141, 136 e 136, representando banzo, diagonal e montante respectivamente, e a variação maior para os demais índices. No entanto, ao analisar a tabela com 100 iterações para a mesma população das iterações anteriores, nota-se que aumentou o índice de convergência, mantendo 80% dos resultados no perfil 140, 104 e 135 para banzo, diagonal e montante respectivamente, deixando 10% para os demais.

Para contextualizar, serão apresentadas as Tabelas 07-a e 07-b, cujo resultados são compilados para a treliça do tipo “Howe”, os dados extraídos, com a mesma aparência das tabelas anteriores.

Tabela 07-a– Treliça Howe (Galpão 15m).

Treliça Howe - Galpão 15 m														
Iteração: 01 População: 10					Iteração: 10 População: 10					Iteração: 100 População: 10				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	78	75	34	1.771,56	1	140	126	134	7.265,85	1	138	94	133	5.863,83
2	66	41	52	1.146,16	2	141	117	139	9.394,17	2	141	127	136	8.799,19
3	66	41	52	1.146,16	3	130	132	135	6.410,98	3	105	91	121	4.296,94
4	78	75	34	1.771,56	4	141	139	137	9.524,06	4	141	127	136	8.799,19
5	46	40	21	1.000,53	5	138	124	136	6.182,57	5	141	136	136	8.760,66
6	64	50	121	1.300,52	6	129	124	132	5.807,82	6	129	124	132	5.807,82
7	54	76	29	1.224,05	7	130	122	134	6.244,45	7	141	116	136	8.824,87
8	88	73	74	1.776,29	8	141	138	140	9.707,73	8	140	124	136	7.131,16
9	86	82	22	1.369,32	9	141	141	136	10.365,98	9	97	86	72	1.949,66
10	78	75	34	1.771,56	10	94	78	108	3.238,28	10	141	136	136	8.760,66
%	30	30	30		%	40	20	20		%	50	20	60	

Fonte: Autor, 2024.

Em relação à Treliça Pratt, os resultados apresentados na Tabela 07-a são mantidos, uma vez que, como dito anteriormente, a mudança geométrica acontece somente nas diagonais. No entanto, há algumas divergências, as quais pode-se analisar.

Na subtabela 01 da Tabela 07-a, é possível verificar que o perfil com mais repetições (30%) é menor do que o perfil apresentado na recorrência da Tabela 06-a, fazendo com que a peça fique menos pesada, o que realmente é muito importante. O índice manteve-se para análise entre as colunas, uma vez que a repetição gerou em torno destes processamentos.

Para iteração igual a 10, segunda subtabela, e mantendo a população igual a 10, observa-se que todos os resultados foram da ordem de 10%.

A terceira subtabela, apresenta o resultado do processamento com população igual a 10 e número de iterações igual a 100. Os resultados foram iguais a 50% para banzo, 20% para diagonal e 60% para montante.

Quando se analisa linearmente as três subtabelas da Tabela 07-a, observa-se que na primeira, alguns processamentos geraram resultados iguais para o conjunto banzo, diagonal e montante. Isso pode ser observado para os processamentos 01, 04 e 10, que foram destacados na cor verde. O mesmo pode ser observado para os processamentos 02 e 03 (destacados na cor amarela). Já na segunda, todos os índices mantiveram-se na ordem de 10%, reafirmando a hipótese da importância entre o aumento do número de população, não somente de iterações. Na última subtabela houve somente 02 índices em repetição (processamento 02 e 04 – cor verde e 05 e 10 – cor amarela), mantendo-se em 20%; diferentemente da análise entre as colunas, que, por sua vez, ficou na ordem 50%, 20% e 60% para banzo, diagonal e montante.

Tabela 07-b– Treliça Howe (Galpão 15m).

Treliça Howe - Galpão 15 m														
Iteração: 01 População: 100					Iteração: 10 População: 100					Iteração: 100 População: 100				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	107	107	108	2.337,70	1	141	127	136	8.799,19	1	140	135	135	7.291,10
2	111	108	108	3.098,64	2	141	127	136	8.799,19	2	140	135	135	7.291,10
3	141	118	137	9.639,64	3	118	113	134	6.629,56	3	140	135	135	7.291,10
4	141	140	141	10.212,90	4	141	127	136	8.799,19	4	140	104	135	7.188,36
5	105	112	114	4.860,10	5	141	127	136	8.799,19	5	140	114	135	7.239,73
6	141	135	141	9.352,44	6	138	102	133	5.840,72	6	140	135	135	7.291,10
7	94	90	108	3.374,41	7	129	112	133	5.758,01	7	140	135	135	7.291,10
8	128	94	132	5.229,84	8	140	135	135	7.291,10	8	140	135	135	7.291,10
9	141	135	134	8.389,35	9	139	94	133	6.219,55	9	140	114	135	7.239,73
10	141	136	138	8.990,27	10	140	104	135	7.188,36	10	140	114	135	7.239,73
%	50	10	30		%	40	40	40		%	100	60	100	

Fonte: Autor, 2024.

No passo em que se analisa a Tabela 07-b, nota-se que a primeira subtabela não teve nenhuma repetição de treliça completa, e as três peças possuem dimensões iguais em processamentos, porém, é notório verificar a manutenção de índices isoladamente para banzo, diagonal e montante, na ordem de 50%, 10% e 30% respectivamente.

Quando é aumentado as iterações, mantendo o número de população alto (100), há melhora no afinamento das repetições da peça, porém com dimensões mais robustas, implicando no aumento do peso da estrutura. Houve 04 processamentos em que os índices mantiveram-se, sendo eles 01, 02, 04 e 05 – destacados na cor verde, repetindo na análise entre colunas da subtabela 02.

Já quando o número de iterações aumenta, percebe-se grande melhora no afinamento das repetições dos índices do catálogo Vallourec, uma vez que, com alta população, os indivíduos são cada vez mais capazes de gerar genes fortes, sobrepondo à população baixa, em que ocorre o contrário. Percebe-se pelo índice de 100% para banzo e montante e 60% de repetição para diagonal, além de ter a totalidade de 60% para o índice 140, 135, 135 e 30% para o índice 140, 114 e 135, representando banzo, diagonal e montante, respectivamente.

Finalizando a análise proposta inicialmente, passa-se aos resultados do Galpão C – vão de 21 metros, sendo as demais configurações idênticas aos outros resultados, como quantidade de população e variância de iterações entre as subtabelas das Tabelas 08-a, 08-b, 09-a e 09-b.

Tabela 08-a– Treliça Pratt (Galpão 21m).

Treliça Pratt - Galpão 21 m														
Iteração: 01 População: 10					Iteração: 10 População: 10					Iteração: 100 População: 10				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	129	124	108	7.999,18	1	111	85	120	4.003,11	1	130	103	135	9.361,42
2	141	136	141	13.545,06	2	106	101	125	7.567,33	2	128	123	132	7.597,99
3	129	124	108	7.999,18	3	126	109	120	5.898,24	3	140	135	135	10.351,55
4	129	124	108	7.999,18	4	105	103	110	6.758,93	4	141	137	137	12.906,28
5	129	124	108	7.999,18	5	101	90	107	4.345,46	5	118	104	135	9.666,84
6	141	136	141	13.545,06	6	94	93	107	5.163,40	6	141	128	137	12.963,81
7	141	136	141	13.545,06	7	137	112	135	7.845,87	7	128	103	132	7.883,73
8	141	116	141	13.640,95	8	92	99	108	4.333,25	8	137	112	133	7.639,51
9	141	141	141	15.942,25	9	98	87	86	3.134,98	9	138	113	124	8.515,07
10	129	124	108	7.999,18	10	108	57	56	2.919,91	10	115	92	122	6.461,81
%	50	50	50		%	10	10	20		%	20	10	30	

Fonte: Autor, 2024.

Na Tabela 08-a, nota-se que a primeira subtabela teve reincidência de 50% em índices completos, ou seja, as três peças da treliça, banzo, diagonal e montante (processamento 01, 03, 04, 05 e 10 – destacados na cor verde) e 30% também em índice completo, só com perfil diferente, destacado no processamento 02, 06 e 07, na cor amarela. Ainda é possível ver que para o banzo e montante, houve apenas duas possibilidades de índices do catálogo da Vallourec (129 e 141) e (108 e 141) respectivamente, e cada um teve afinco de 50% de repetição.

Para diagonal, o índice maior ainda fica nos 50%, porém houve diferentes índices do catálogo com 10% de repetição.

Quando se altera somente o número de iterações (subtabela 02 e 03) é notório que não altera em nada para a melhora da estrutura, uma vez que a população continua baixa, ou seja, os genes têm a mesma força para o cruzamento, deixando grande variância de perfis.

Da mesma forma, pode ser percebido na Tabela 09-a, em que é mostrado os resultados para a Treliça Howe, mudando apenas a subtabela 03 que já possui 02 índices completos de treliça, elencados nos processamentos 05 e 10, 08 e 09 respectivamente destacados nas cores verde e amarelo.

Tabela 08-b– Treliça Pratt (Galpão 21m).

Treliça Pratt - Galpão 21 m														
Iteração: 01 População: 100					Iteração: 10 População: 100					Iteração: 100 População: 100				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	102	121	132	5.169,69	1	139	125	134	9.221,13	1	139	125	134	9.221,13
2	141	116	141	13.640,95	2	128	123	132	7.597,99	2	139	125	134	9.221,13
3	106	122	122	7.279,24	3	140	105	135	10.466,62	3	139	125	134	9.221,13
4	141	105	135	12.093,69	4	139	125	134	9.221,13	4	139	125	134	9.221,13
5	102	121	132	5.169,69	5	141	137	138	13.076,01	5	139	125	134	9.221,13
6	141	139	141	14.523,11	6	141	137	137	12.906,28	6	139	125	134	9.221,13
7	106	122	122	7.279,24	7	140	135	135	10.351,55	7	139	125	134	9.221,13
8	141	128	141	13.928,61	8	140	135	136	10.494,48	8	139	125	134	9.221,13
9	128	91	133	7.321,05	9	139	125	134	9.221,13	9	139	125	134	9.221,13
10	114	108	134	5.929,59	10	139	125	134	9.221,13	10	139	125	134	9.221,13
%	40	20	30		%	40	40	40		%	100	100	100	

Fonte: Autor, 2024.

Já quando se analisa as Tabelas 08-b e 09-b é possível afirmar que houve significativa melhora nos resultados, uma vez que com a população de 100 indivíduos é muito mais

suscetível a proliferação de genes fortes, fazendo com que, a cada iteração, fique somente os melhores.

Corroborando com essa hipótese, verifica-se que na subtabela 01 da Tabela 08-b há índice de permanência de 40% no banzo, 20% na diagonal e 30% no montante, além de 20% linearmente nos processamentos 01 e 05 destacados na cor amarela e 03 e 07 destacados na cor verde. Quando é aumentada a quantidade de iteração de 01 para 10, os resultados passam a ser mais claros e mais incisivos, mesmo que com perfis mais espessos. Na subtabela 02 vê-se que os índices sobem para a faixa de 40% em todas as peças, deixando 04 processamentos em evidência (01, 04, 09 e 10).

Já quando passa a análise para última subtabela, verifica o resultado 100%, ou seja, a definição exata e mais adequada de todos os perfis para a concepção do elemento treliçado.

Tabela 09-a– Treliça Howe (Galpão 21m).

Treliça Howe - Galpão 21 m														
Iteração: 01 População: 10					Iteração: 10 População: 10					Iteração: 100 População: 10				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	97	86	120	3.057,61	1	141	128	136	12.625,78	1	131	116	136	11.526,00
2	101	89	46	3.938,89	2	127	93	112	6.881,07	2	139	125	134	9.091,41
3	98	95	81	3.306,99	3	125	92	121	5.593,88	3	129	113	134	8.385,86
4	97	86	120	3.057,61	4	141	138	135	12.770,47	4	108	69	84	3.063,86
5	79	54	78	2.796,77	5	124	79	99	4.880,25	5	141	137	137	12.723,72
6	98	95	81	3.306,99	6	114	92	99	5.782,55	6	98	76	46	2.937,87
7	97	86	120	3.057,61	7	106	101	122	7.214,43	7	96	84	45	2.396,96
8	97	86	120	3.057,61	8	141	117	134	12.465,42	8	137	132	133	7.475,09
9	103	76	88	4.571,58	9	103	80	99	5.106,40	9	139	125	134	9.091,41
10	97	86	120	3.057,61	10	125	90	108	5.216,10	10	141	137	137	12.723,72
%	50	50	50		%	30	20	30		%	20	20	30	

Fonte: Autor, 2024.

Do mesmo modo, analisando as subtabelas da Tabela 09-b, é notório ver que a quantidade de iterações com população consideravelmente grande, aumenta as chances de ter resultado melhor a cada processamento. De uma taxa de 70% de resultados reincidentes na primeira subtabela, houve piora quando aumentou o número de iterações para 10; porém quando dobra novamente o número de iterações é notório ver a significativa melhora nos resultados, chegando novamente a 100% de certeza, definindo também a exata e mais adequada treliça para esse tipo de carregamento e vão livre a ser vencido.

Tabela 09-b– Treliça Howe (Galpão 21m).

Treliça Howe - Galpão 21 m														
Iteração: 01					Iteração: 10					Iteração: 100				
População: 100					População: 100					População: 100				
Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)	Pc	Bz	Dg	Mt	Peso (Kg)
1	106	103	122	7.590,14	1	141	137	137	12.723,72	1	139	134	134	9.109,39
2	106	103	122	7.590,14	2	141	137	137	12.723,72	2	139	134	134	9.109,39
3	130	124	124	8.995,56	3	140	126	135	10.262,56	3	139	134	134	9.109,39
4	106	103	122	7.590,14	4	138	124	133	8.307,33	4	139	134	134	9.109,39
5	106	103	122	7.590,14	5	141	137	137	12.723,72	5	139	134	134	9.109,39
6	139	136	133	9.459,75	6	141	137	137	12.723,72	6	139	134	134	9.109,39
7	139	136	133	9.459,75	7	141	137	137	12.723,72	7	139	134	134	9.109,39
8	106	103	122	7.590,14	8	137	102	132	7.471,06	8	139	134	134	9.109,39
9	106	103	122	7.590,14	9	140	135	136	10.351,56	9	139	134	134	9.109,39
10	106	103	122	7.590,14	10	140	126	135	10.262,56	10	139	134	134	9.109,39
%	70	70	70		%	50	50	50		%	100	100	100	

Fonte: Autor, 2024.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É sabido que a estrutura é o cerne da construção civil; também é notório que a estrutura metálica vem ganhando espaço no mundo moderno, oferecendo diversas vantagens significativas, como a celeridade na execução e a flexibilidade no design arquitetônico, sem ressaltar a longevidade dos materiais.

Com o desenvolvimento, cada vez mais é necessário que as estruturas sejam mais leves e vençam grandes vãos, uma vez que quanto mais leve a estrutura for, menor fica o custo da obra, envolvendo obviamente o material metálico, ligas e mão de obra especializada.

Em suma, para que essas estruturas sejam cada vez mais leves, é necessário que haja otimização estrutural, verificando as restrições e normativos vigentes, para que a estrutura metálica possa continuar exercendo a função a qual foi projetada. Para realizar essa otimização, o uso de algoritmos genéticos - AG demonstrou ser eficaz para encontrar soluções próximas ao “ótimo global”, uma vez que tem a capacidade de explorar o espaço de busca, integrando conceitos biológicos e métodos computacionais.

Ao analisar as treliças estudadas, pode-se observar que o aumento da variabilidade genética, que está envolvida com o tamanho da população, tende a melhorar a convergência dos resultados. Associado a isso, o número de iterações vem somar nesse resultado positivo para a incidência massiva de um índice do catálogo para toda a treliça. O mesmo não pode ser dito quando se tem população baixa; foi verificado que para a população baixa, o número de iterações é pouco relevante no aumento da incidência do perfil.

Por fim, tem-se que quanto maior a população, maior a chance de que a mutação genética aconteça de forma coerente e os genes fortes multipliquem-se de forma exponencial, deixando baixa variabilidade de resultados. Quando tem uma população grande, significa que se buscou mais linhas (dados) dentro do catálogo, deixando uma robustez para o cruzamento, aumentando a força dos indivíduos, trazendo melhores resultados.

2.6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHO, A. V., HOPCROFT, J. E., & ULLMAN, J. D. **Data Structures and Algorithms**. Addison-Wesley, 1983.

ALVES, L. M. **Métodos dos Elementos Finitos**. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16239: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. Rio de Janeiro, 2013.

- AZIZI, M.; AICKELIN, U.; KHORSHIDI, H. A.; SHISHEHGARKHANEH, M. B. **Shape and size optimization of truss structures by Chaos game optimization considering frequency constraints**, Journal of Advanced Research, 2022.
- BLUM, C.; ROLI, A. **Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and Conceptual Comparison**. ACM Comput. Surv. 2003.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014.
- DE SOUZA, R. R.; MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F.; TORII, A. J. **A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures**. Eng. Struct. 2016.
- HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of Structural Optimization**. v. 11, n. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992.
- KIM, H.-S.; PARK, Y.-S.; YANG, M.-K.; LEE, M.-H.; KIM, J.-Y. **Initial Shape Design of Space Truss Structure using Density Method**. J. Korean Assoc. Spat. Struct. 2010.
- MCCORMACK, J. C. **Structural Steel Design**. 5th. edition. Pearson Prentice Hall, 2011.
- MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. MIT Press, 1996.
- MORAES, M. H. M.; FRAGA, I. F.; PEREIRA JUNIOR, W. M.; CHRISTOFORO, A. L. **Comparative Analysis of the Mechanical Performance of Timber Trusses Structural Typologies Applying Computational Intelligence**. Rev. Árvore 2022.
- PEREIRA JÚNIOR, W. M. **Identificação Paramétrica do Concreto Simples e Reforçado com Fibras Utilizando Computação Bioinspirada**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Unidade Acadêmica Especial de Física e Química, Catalão, 2020.
- SHOENAUER, M.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems**. [s.l.: s.n.], 1996.
- SILVA, F. E. de C. **Otimização dimensional, de forma e topológica de estruturas treliçadas utilizando um algoritmo híbrido**. Dissertação Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2015.
- SMITH, J.; JOHNSON, R. **Application of Finite Element Analysis in Truss Optimization**. Journal of Structural Engineering, 2020.

SOUZA, R. **A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line towers.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

TUBOS Estruturais Seção Circular, Quadrada e Retangular. VALLOUREC TUBOS DO BRASIL: [s. n.], 2011.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design.** Vanderplaats Research & Development Inc., Colorado Springs, 1999.

XU, Bin; JIN, Yu Jia. **Multiobjective dynamic topology optimization of truss with interval parameters based on interval possibility degree.** *Journal of Vibration and Control*, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 66–81, 2014.

YANG, X. S. **Nature Inspired Metaheuristic Algorithms**, 2º ed., Editora: Luniver Press, 2008.

APÊNDICE A – CARREGAMENTO

As definições das ações atuantes nas treliças seguem os requisitos das normas NBR 6120, NBR 6123, e NBR 8681. Para facilitar o entendimento, eles serão subdivididos em dois assuntos: ações permanentes e ações variáveis.

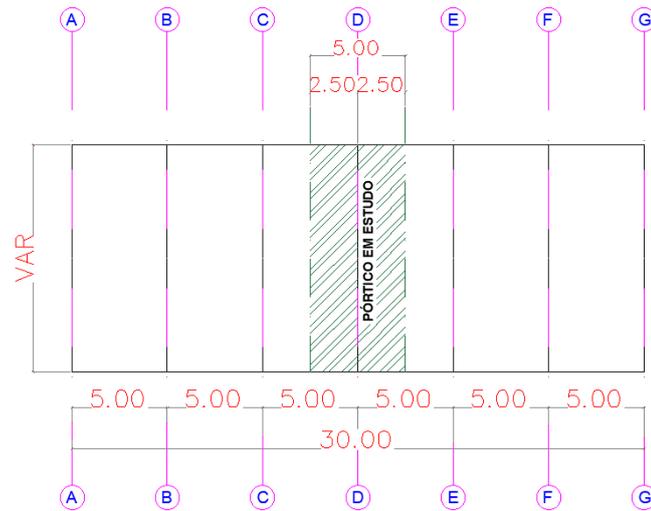
As cargas classificadas como permanentes na estrutura, que atuam nas treliças, provêm do peso próprio dos elementos metálicos e dos materiais da cobertura. A estimativa da carga proveniente do peso próprio pode ser feita por meio de uma fórmula empírica ou pela adoção de perfis para as diferentes posições das barras no elemento treliçado.

Para o presente estudo, o processo de cálculo do peso próprio foi obtido por meio de um processo iterativo, sendo o peso próprio da treliça: $PP = G_1 + G_2$, em que G_1 é o peso total da treliça e G_2 é o peso da telha.

Além do peso próprio, devido aos elementos treliçados, considerou-se também o carregamento de telha termoacústica (G_2) composto por telhas metálicas de modelo trapezoidal na parte superior, preenchidas com material isolante, poliuretano na parte central, forro de telha metálica do mesmo modelo na parte inferior, considerando uma carga G_2 de 350 N/m² de acordo com o catálogo do fabricante. Tem-se o cálculo das cargas de peso das telhas detalhado de acordo com a Figura 09 e a equação 3.4 na Tabela 03.

$$G_2 = S_c \cdot A_{i(\text{long.})} \cdot A_{i(\text{nós})} \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Figura 01 – Planta de distribuição das treliças.



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 01 – Carga de materiais nas treliças.

Galpão	Distância entre nós	Sobrecarga pontual em nós (pontas)	Sobrecarga pontual em nós (centrais)
A	2,028 m	$G_2 = 1,774 \text{ kN}$	$G_2 = 3,549 \text{ kN}$
B	2,534 m	$G_2 = 2,217 \text{ kN}$	$G_2 = 4,434 \text{ kN}$
C	3,548 m	$G_2 = 3,104 \text{ kN}$	$G_2 = 6,209 \text{ kN}$

Fonte: Autor, 2024.

Portanto, considerando os dados obtidos na Tabela 01, a Figura 02 representa como as cargas relacionadas aos materiais atuarão nas treliças em estudo.

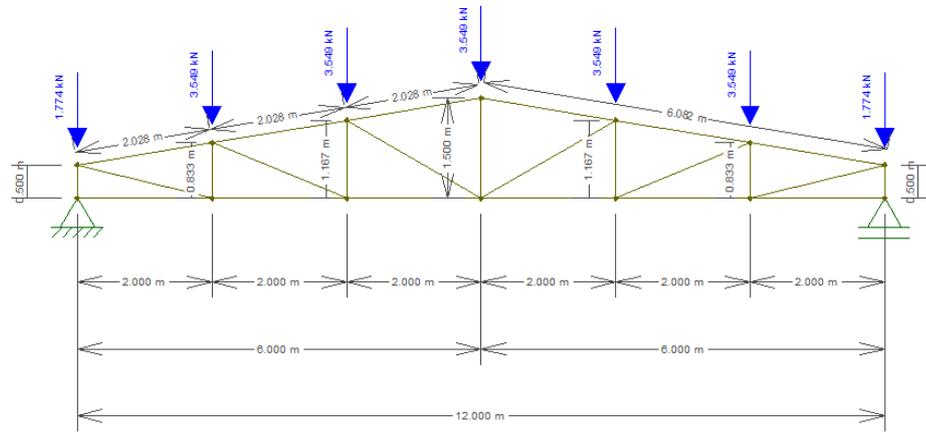
Para obter os esforços de cálculo e deslocamento, em que as ações permanentes foram consideradas separadamente, foram utilizados os coeficientes de ponderação da NBR 8681.

As cargas classificadas como variáveis na estrutura, atuam em torno de sobrecarga de cobertura, que de acordo com o anexo B da NBR 8800 tem-se:

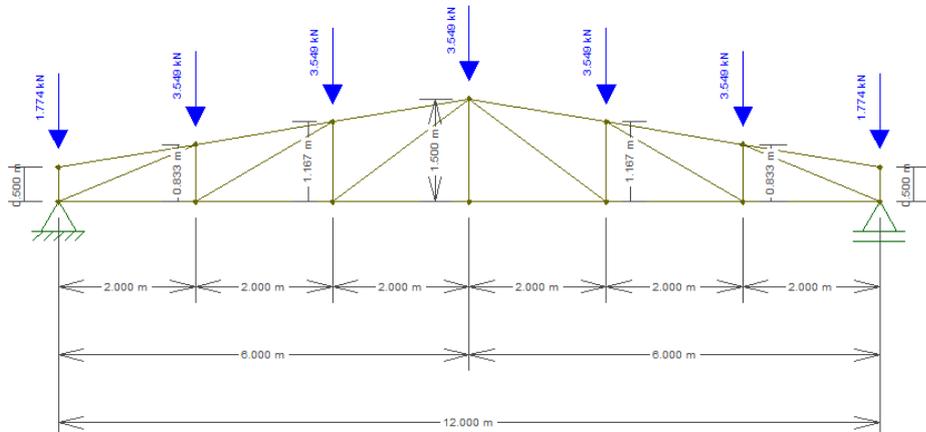
“Nas coberturas comuns (telhados), na ausência de especificação mais rigorosa, deve ser prevista uma sobrecarga característica mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$, em projeção horizontal. Admite-se que essa sobrecarga englobe as cargas decorrentes de instalações elétricas e hidráulicas, de isolamentos térmico e acústico e de

pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura, até um limite superior de $0,05 \text{ kN/m}^2$.”

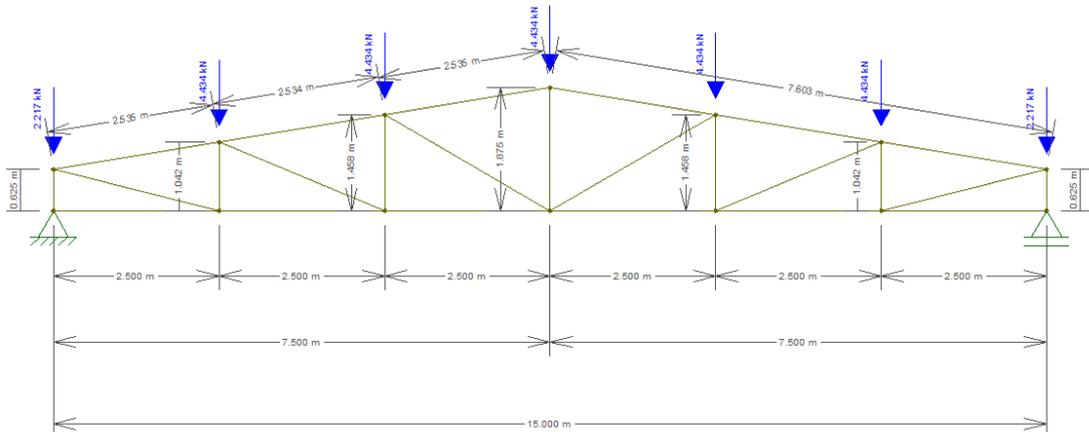
Figura 02 – Carregamento de materiais na treliça.



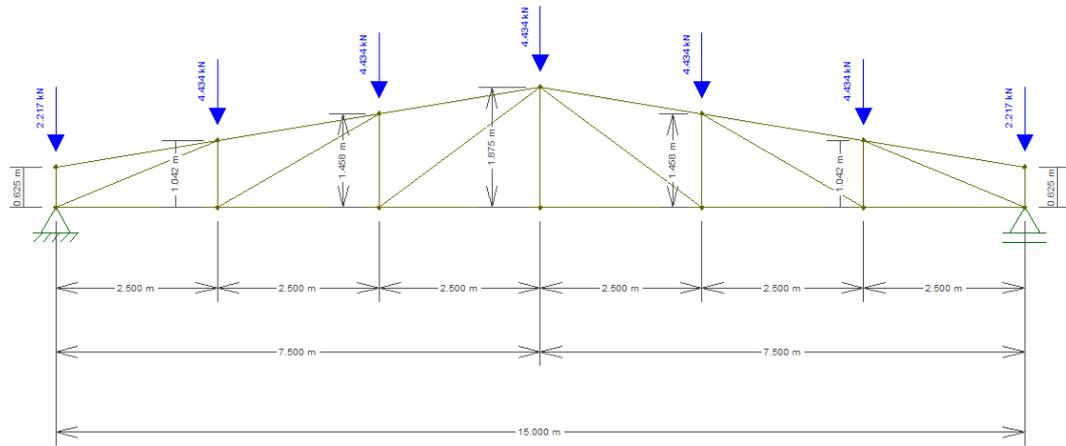
(a) Galpão A – Treliça Howe



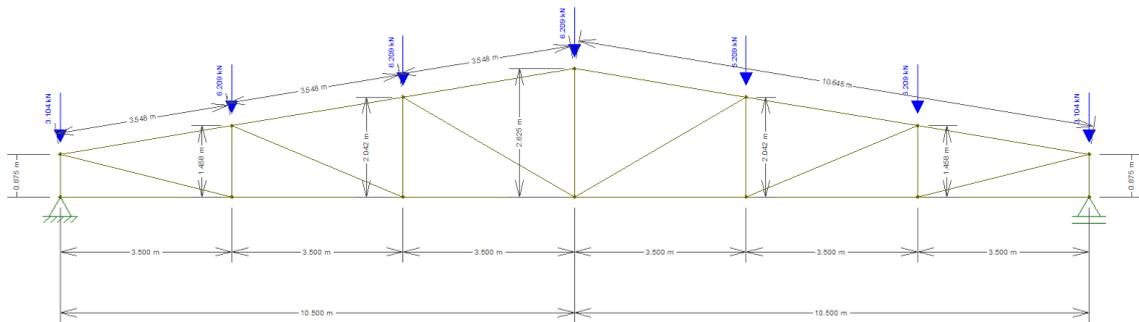
(b) Galpão A – Treliça Pratt.



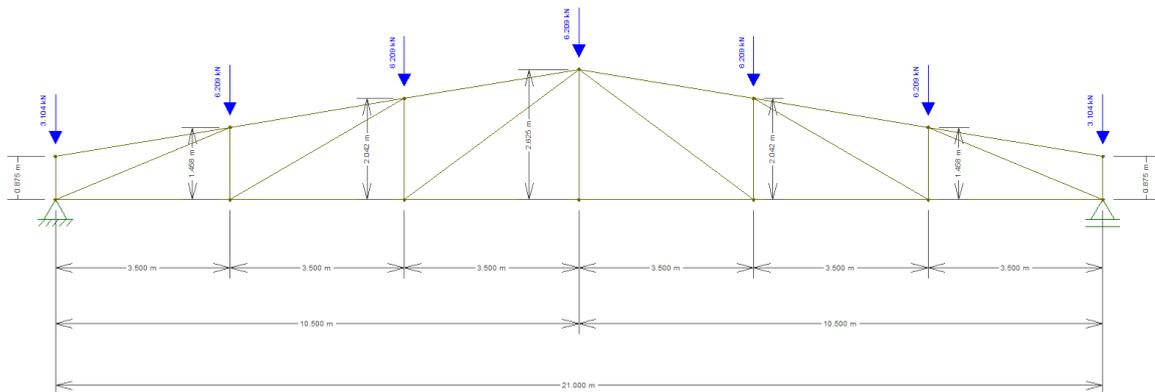
(c) Galpão B – Treliça Howe.



(d) Galpão B – Treliça Pratt.



(e) Galpão C – Treliça Howe.



(f) Galpão C – Treliça Pratt.

Fonte: Autor, 2024.

Para o cálculo da sobrecarga nos nós da treliça de projeto, faz-se necessário a definição dos pórticos a serem estudados; portanto, define-se que o tipo de pórtico genérico a ser utilizado no estudo será intermediário, conforme a Figura 01, sendo a distância entre pórticos idênticas, a área de influência para cálculo também será a mesma, conforme equação 3.4 e Tabela 02.

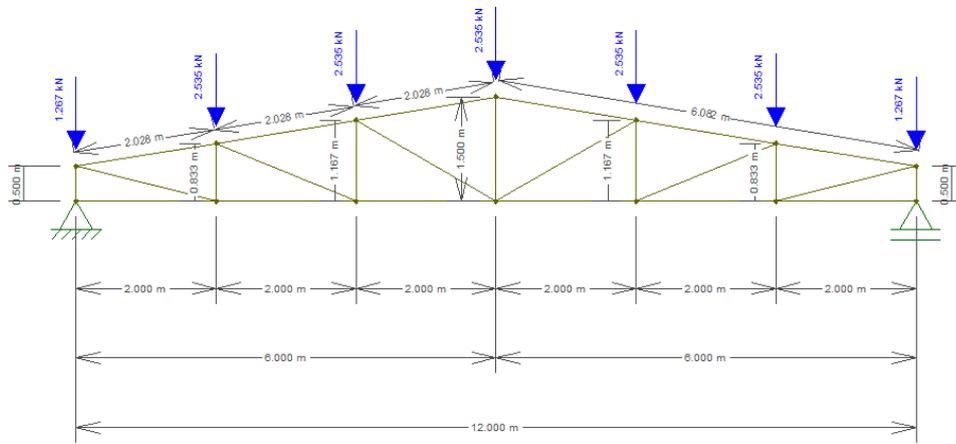
Tabela 02 – Carga de sobrecarga nas treliças.

Galpão	Distância entre nós	Sobrecarga pontual em nós (pontas)	Sobrecarga pontual em nós (centrais)
A	2,028 m	$Q = 1,267 \text{ kN}$	$Q = 2,535 \text{ kN}$
B	2,534 m	$Q = 1,583 \text{ kN}$	$Q = 3,167 \text{ kN}$
C	3,548 m	$Q = 2,217 \text{ kN}$	$Q = 4,435 \text{ kN}$

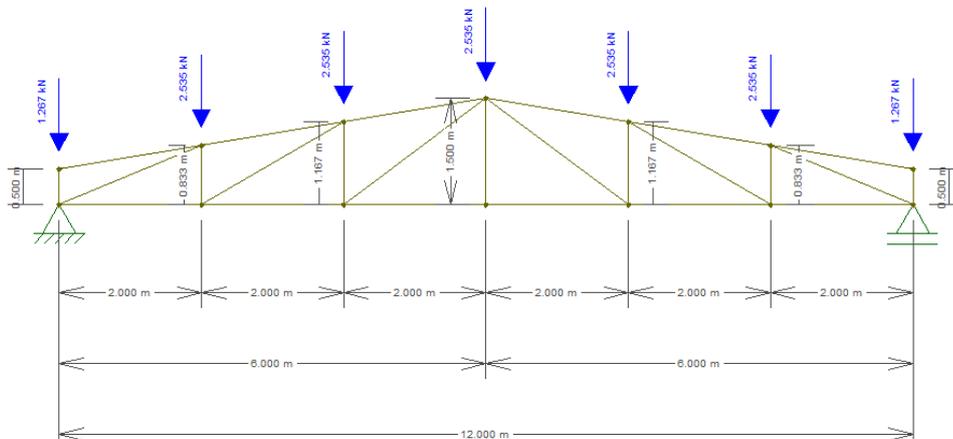
Fonte: Autor, 2024.

Portanto, considerando os dados obtidos na Tabela 02, a Figura 03 representa como as cargas relacionadas à sobrecarga atuação nas treliças em estudo.

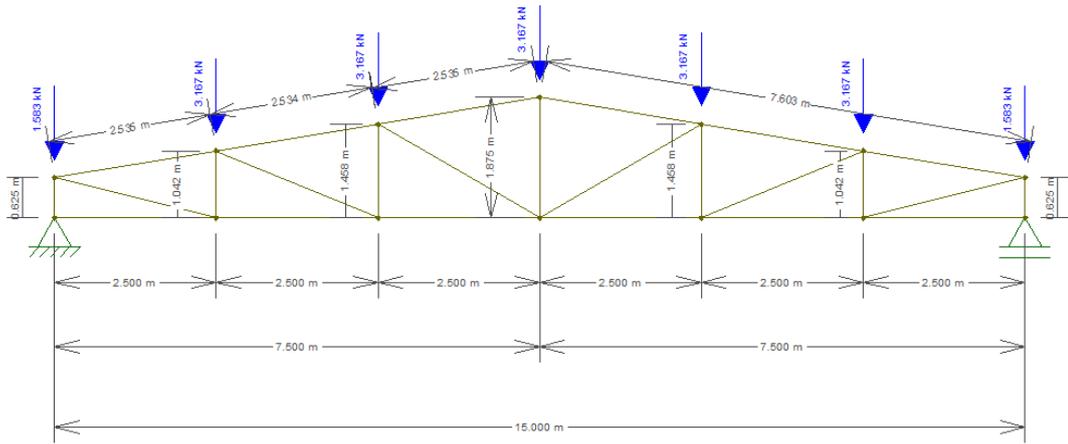
Figura 03 – Carregamento de Sobrecarga na treliça.



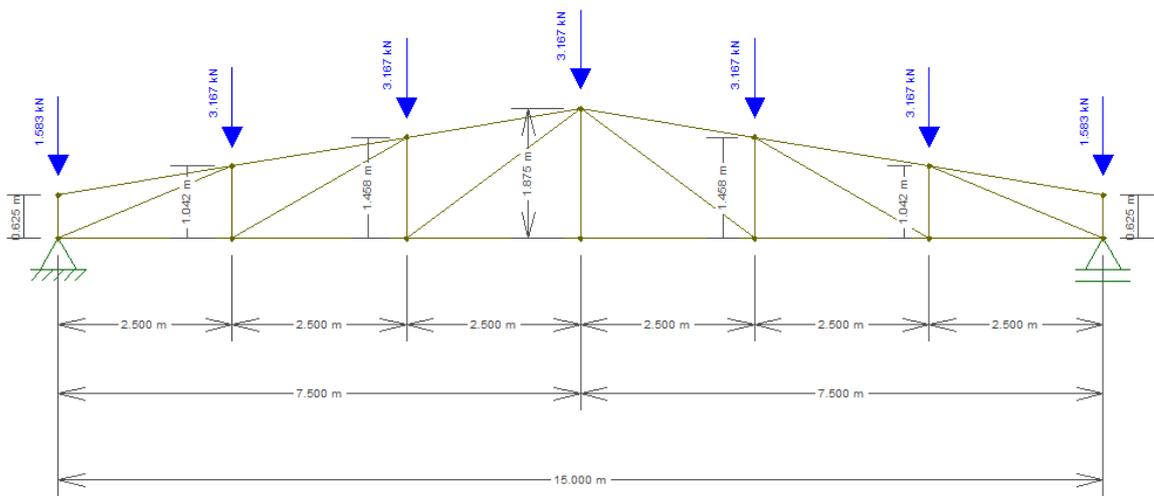
(a) Galpão A – Treliça Howe.



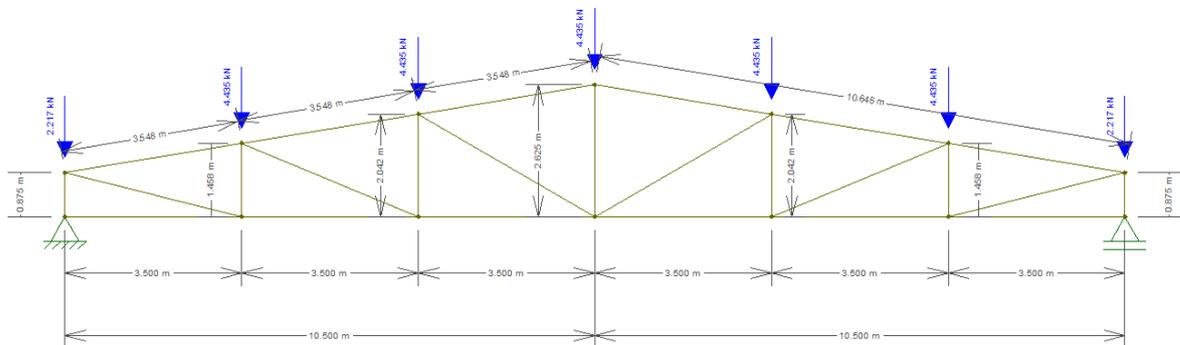
(b) Galpão A – Treliça Pratt.



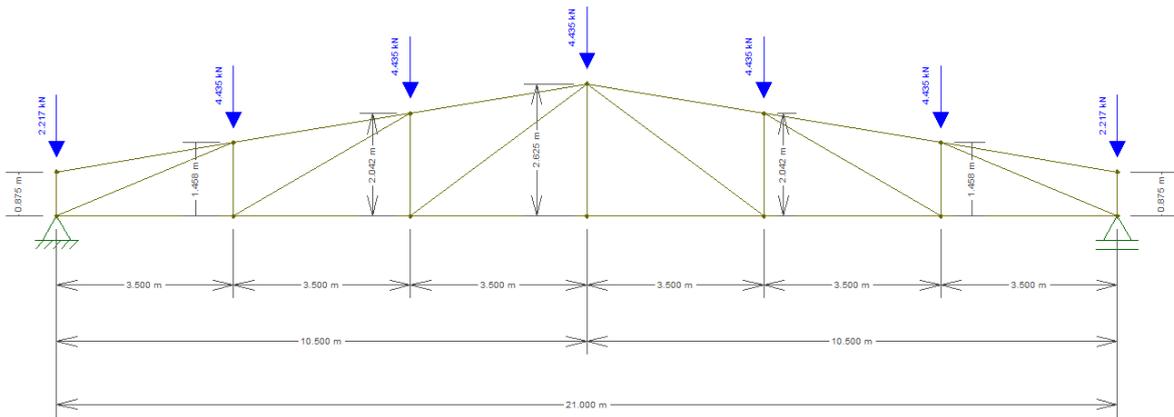
(c) Galpão B – Treliça Howe.



(d) Galpão B – Treliça Pratt.



(e) Galpão C – Treliça Howe.



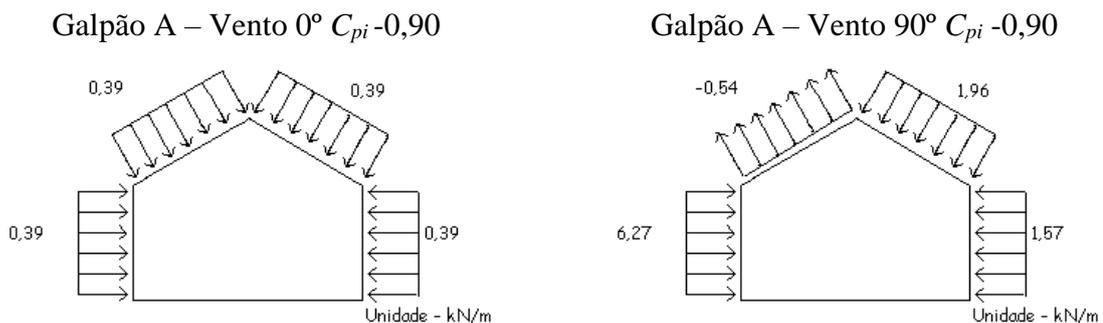
(f) Galpão C – Treliça Pratt.

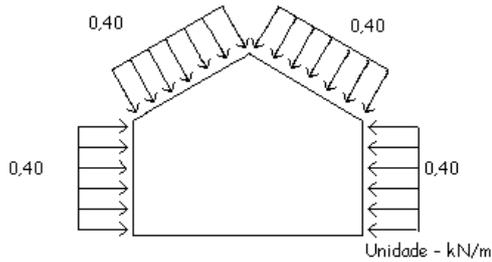
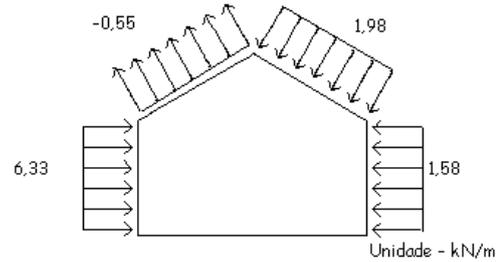
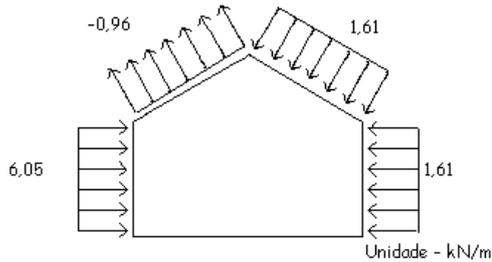
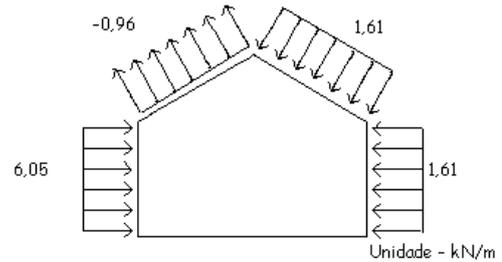
Fonte: Autor, 2024.

Além da carga variável de sobrecarga do telhado, tem-se ainda adicionalmente, as cargas de vento na estrutura, que foram obtidas através das diretrizes estabelecidas pela NBR 6123 para galpões retangulares com telhados de duas águas simétricas, como mostrado na Figura 07, com as dimensões estabelecidas na Tabela 01, ambos no corpo do texto.

Salienta-se que para realizar a análise da carga de vento, utilizou-se o software Visual Ventos, com as dimensões dos galpões de acordo com a Tabela 01 (corpo do texto) e as seguintes considerações: Velocidade $V_0 = 40\text{m/s}$; Fato Topográfico (S1) - terreno plano ou fracamente acidentado); Fator de Rugosidade (S2) - utilizaram Categoria III e Classe B para seu cálculo; Fator Estático (S3) – utilizou-se Grupo 02. No Coeficiente de Pressão Interna, utilizou-se a categoria “Abertura dominante não situada em zona de alta sucção externa – $C_{pi} = -0,80$ ou $-0,90$ ”, e os resultados estão demonstrados na Figura 04.

Figura 04 – Cargas de vento nos galpões da Tabela 01(Corpo do Texto).



Galpão B – Vento 0° $C_{pi} - 0,90$ Galpão B – Vento 90° $C_{pi} - 0,90$ Galpão C – Vento 0° $C_{pi} - 0,90$ Galpão C – Vento 90° $C_{pi} - 0,90$ 

Fonte: Autor, 2024.

Utilizando a mesma premissa do cálculo de cargas de sobrecarga, tendo o cálculo da carga de ventos, porém, neste caso, utilizar-se-á a equação 3.5, uma vez que o software Visual Ventos já gera as cargas em kN/m, deste modo já considerando a área de influência, portanto considera-se somente a distância entre os nós, como está demonstrado na Tabela 03.

$$Q = V_{cpi} \cdot A_{i(nós)} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Tabela 03 – Carga de vento nas treliças.

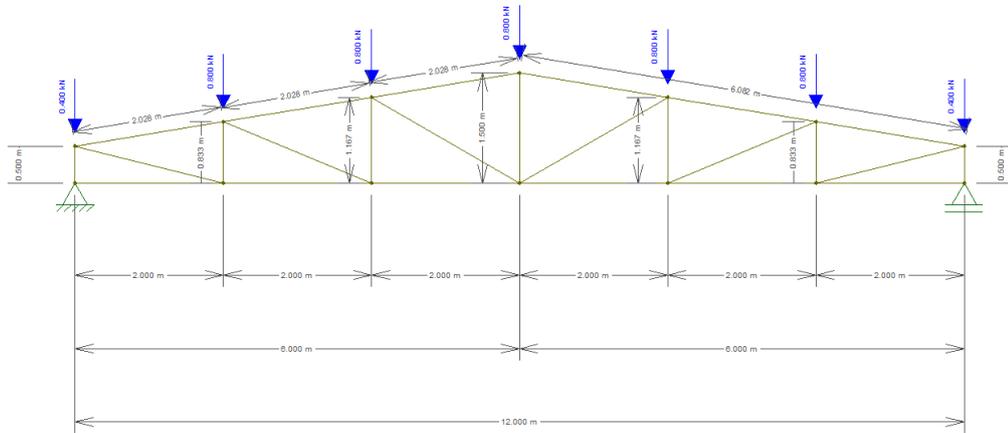
Galpão	Distância entre nós	Sobrecarga pontual em nós (pontas)	Sobrecarga pontual em nós (centrais)
A	Vento 0°	Q = 0,400 kN	Q = 0,800 kN
	Vento 90°	Q = 1,987 kN *	Q = 3,975 kN*
B	Vento 0°	Q = 0,507 kN	Q = 1,013 kN
	Vento 90°	Q = 2,508 kN *	Q = 5,017 kN*
C	Vento 0°	Q = 2,856 kN*	Q = 5,712 kN*
	Vento 90°	Q = 2,856 kN *	Q = 5,712 kN*

*(somente do lado direito; considera-se nula a carga do lado esquerdo por ser subpressão).

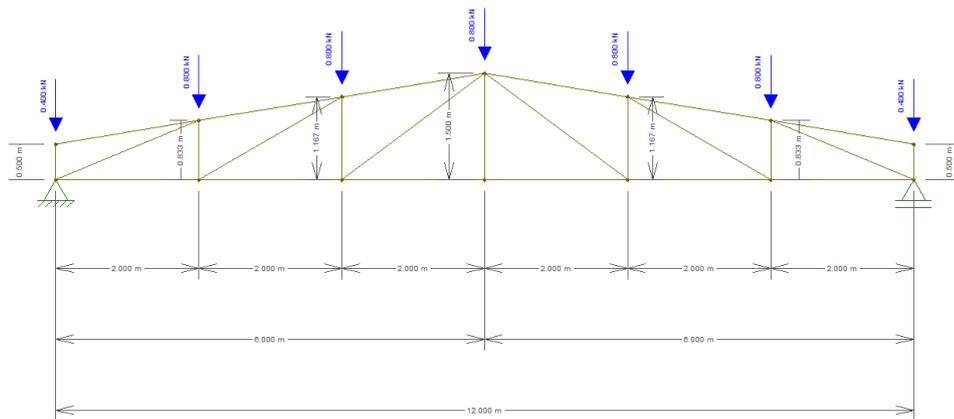
Fonte: Autor, 2024.

Portanto, considerando os dados obtidos na Tabela 03, a Figura 05 representa como as cargas relacionadas ao vento atuarão nas treliças em estudo. Para efeito deste estudo considerar-se-á somente as cargas de vento a 0°.

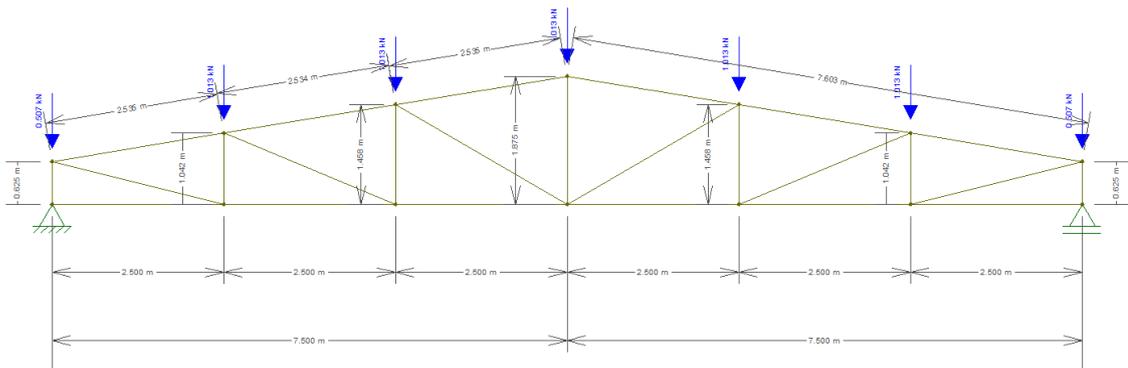
Figura 05 – Carregamento de vento na treliça.



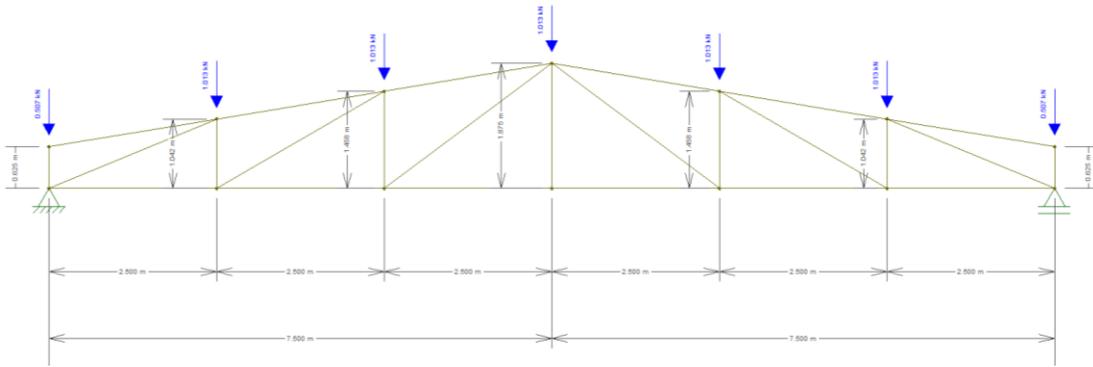
(a) Galpão A – Treliça Howe.



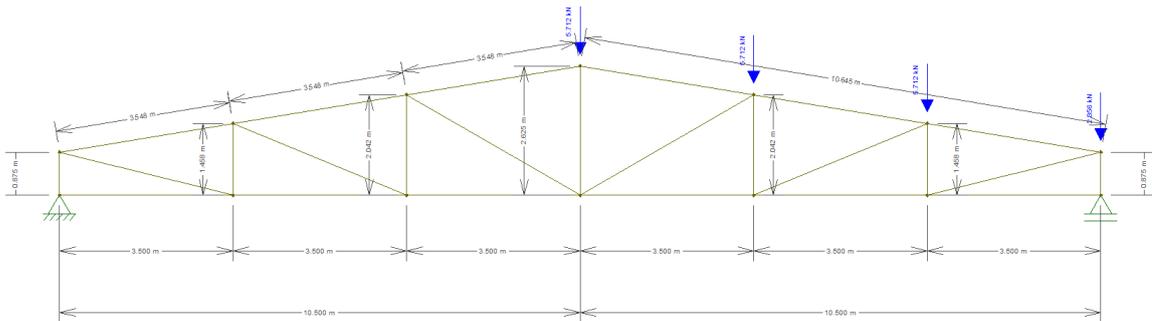
(b) Galpão A – Treliça Pratt.



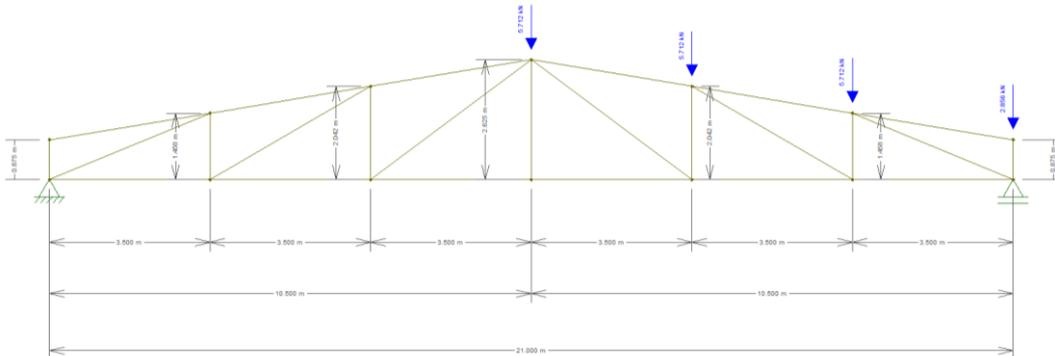
(c) Galpão B – Treliça Howe.



(d) Galpão B – Treliça Pratt.



(e) Galpão C – Treliça Howe.



(f) Galpão C – Treliça Pratt.

Fonte: Autor, 2024.

APÊNDICE B – CÓDIGO DA FUNÇÃO OBJETIVO – FO

```

"Função objetivo para determinação do peso de treliças planas"
import numpy as np
import pandas as pd

from estrutura_metalica import propriedades_secao, peso_barra, analise_estrutura_trelica_eduardo,
verificacao_forca_limite_trelica_tubos, verificacao_esbeltez_limite

def obj(x, none_variable):
    """Função objetivo para determinação do peso de treliças planas"""

    # Leitura das variáveis de projeto da otimização
    banzo_de = none_variable.loc[round(x[0]), 'Dimensões Externas'] / 1000
    banzo_t = none_variable.loc[round(x[0]), 'Espessura da Parede'] / 1000
    diagonal_de = none_variable.loc[round(x[1]), 'Dimensões Externas'] / 1000
    diagonal_t = none_variable.loc[round(x[1]), 'Espessura da Parede'] / 1000
    montante_de = none_variable.loc[round(x[2]), 'Dimensões Externas'] / 1000
    montante_t = none_variable.loc[round(x[2]), 'Espessura da Parede'] / 1000
    l_galpao = 12.168 # pode ser 12.168; 15.204; ou 21.288; por se tratar de banzo inclinado
    vao = 12

    # Parâmetros fixos do projeto da treliça
    compr = [2, 0.5, 2, 0.833, 2, 1.17, 2, 2.50, 1.5, 2, 2.32, 1.17, 2, 2.17, 0.833, 0.5, 2.17, 2.03, 2.03, 2.32, 2.03,
2.03, 2.50, 2.03, 2.03]
    tipo_elem = ['b', 'm', 'b', 'm', 'b', 'm', 'b', 'd', 'm', 'b', 'd', 'm', 'b', 'd', 'm', 'm', 'd', 'b', 'b', 'd', 'b', 'b', 'd', 'b', 'b']
    travamento_x = "APOIO-APOIO"
    travamento_y = "APOIO-APOIO"
    pho = 78.50
    f_y = 250*1E3
    f_u = 400*1E3
    e_s = 210000*1E3
    impressao = False

    # Inicialização de listas
    a_strel = []
    inercial_xtrel = []
    inercial_ytrel = []
    s_xtrel = []
    s_ytrel = []
    ri_xtrel = []
    ri_ytrel = []
    d_etrel = []
    t_trel = []
    peso_trel = []

    # Propriedades dos elementos barra a barra
    for i, valor in enumerate(tipo_elem):
        if valor == 'b':
            de = banzo_de
            et = banzo_t
        elif valor == 'd':
            de = diagonal_de
            et = diagonal_t

```

```

else:
    de = montante_de
    et = montante_t
    descricao = ["anel", de, et, compr[i], travamento_x, travamento_y]
    a_s, i_x, i_y, w_x, w_y, r_x, r_y, k_x, k_y, s_x, s_y = propriedades_secao(descricao,
                                     impressao)

    d_etrel.append(de)
    t_trel.append(et)
    a_strel.append(a_s)
    inercial_xtrel.append(i_x)
    inercial_ytrel.append(i_y)
    ri_xtrel.append(r_x)
    ri_ytrel.append(r_y)
    s_xtrel.append(s_x)
    s_ytrel.append(s_y)
    peso_trel.append(peso_barra(compr[i], a_strel[i], rho))

# Função objetivo
of = sum(peso_trel)

# calculo de carga g
g_interno = -((of*l_galpao*5)/6 + 3.549)
g_externo = -((of*l_galpao*5)/12 + 1.774)

# Esforços internos
g = [g_externo, g_interno]
n_g, delta_max = analise_estrutura_trelica_eduardo(a_strel, inercial_xtrel, g)
q = [-1.267, -2.535]
n_q, delta_max = analise_estrutura_trelica_eduardo(a_strel, inercial_xtrel, q)
v = [-0.4, -0.8]
n_v, delta_max = analise_estrutura_trelica_eduardo(a_strel, inercial_xtrel, v)
g_0 = []
g_1 = []
g_2 = []
g_3 = []

# Restrições de tensões normais
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.25 * n_gi + 1.5 * n_qi + 1.4 * 0.6 * n_vi
    g, n_rd = verificacao_forca_limite_trelica_tubos(n_sd, a_strel[i], inercial_xtrel[i], inercial_xtrel[i],
d_etrel[i], t_trel[i], e_s, f_y, f_u, 1, 1, compr[i], 1.10, 1.35, False)
    g_0.append(g)
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.25 * n_gi + 1.40 * n_vi + 1.5 * 0.80 * n_qi
    g, n_rd = verificacao_forca_limite_trelica_tubos(n_sd, a_strel[i], inercial_xtrel[i], inercial_xtrel[i],
d_etrel[i], t_trel[i], e_s, f_y, f_u, 1, 1, compr[i], 1.10, 1.35, False)
    g_1.append(g)

# Restrições de esbeltez
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.5 * n_gi + 1.4 * n_qi + 0.4 * n_vi
    g, s = verificacao_esbeltez_limite(s_xtrel[i], s_xtrel[i], n_sd, False)
    g_2.append(g)
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.5 * n_gi + 1.4 * n_qi + 0.4 * n_vi
    g, s = verificacao_esbeltez_limite(s_xtrel[i], s_xtrel[i], n_sd, False)
    g_3.append(g)

# Restrição do deslocamento máximo na treliça

```

```

delta_max = vao / 250
delta_sd = 1.00 * deltag_max + 0.60 * deltaq_max + 0.0 * deltav_max
g_4 = [np.abs(delta_sd) / delta_max - 1]

```

```

# Método de penalização
g = g_0 + g_1 + g_2 + g_3 + g_4
for j in g:
    of += 1E6 * (max(0, j) ** 2)

```

```

return of

```

```

def obj_2(x, none_variable):

```

```

    """Função objetivo para determinação do peso de treliças planas"""

```

```

    # Leitura das variáveis de projeto da otimização

```

```

    banzo_de = none_variable.loc[round(x[0]), 'Dimensões Externas'] / 1000
    banzo_t = none_variable.loc[round(x[0]), 'Espessura da Parede'] / 1000
    diagonal_de = none_variable.loc[round(x[1]), 'Dimensões Externas'] / 1000
    diagonal_t = none_variable.loc[round(x[1]), 'Espessura da Parede'] / 1000
    montante_de = none_variable.loc[round(x[2]), 'Dimensões Externas'] / 1000
    montante_t = none_variable.loc[round(x[2]), 'Espessura da Parede'] / 1000
    l_galpao = 12.168 # pode ser 12.168; 15.204; ou 21.288; por se tratar de banzo inclinado
    vao = 12

```

```

    # Parâmetros fixos do projeto da treliça

```

```

    compr = [2, 0.5, 2, 0.833, 2, 1.17, 2, 2.50, 1.5, 2, 2.32, 1.17, 2, 2.17, 0.833, 0.5, 2.17, 2.03, 2.03, 2.32, 2.03,
2.03, 2.50, 2.03, 2.03]
    tipo_elem = ['b', 'm', 'b', 'm', 'b', 'm', 'b', 'd', 'm', 'b', 'd', 'm', 'b', 'd', 'm', 'm', 'd', 'b', 'b', 'd', 'b', 'b', 'd', 'b', 'b']
    travamento_x = "APOIO-APOIO"
    travamento_y = "APOIO-APOIO"
    pho = 78.50
    f_y = 250*1E3
    f_u = 400*1E3
    e_s = 210000*1E3
    impressao = False

```

```

    # Inicialização de listas

```

```

    a_strel = []
    inercial_xtrel = []
    inercial_ytrel = []
    s_xtrel = []
    s_ytrel = []
    ri_xtrel = []
    ri_ytrel = []
    d_etrel = []
    t_trel = []
    peso_trel = []

```

```

    # Propriedades dos elementos barra a barra

```

```

    for i, valor in enumerate(tipo_elem):
        if valor == 'b':
            de = banzo_de
            et = banzo_t
        elif valor == 'd':
            de = diagonal_de
            et = diagonal_t
        else:
            de = montante_de

```

```

    et = montante_t
    descricao = ["anel", de, et, compr[i], travamento_x, travamento_y]
    a_s, i_x, i_y, w_x, w_y, r_x, r_y, k_x, k_y, s_x, s_y = propriedades_secao(descricao,
                                     impressao)

    d_etrel.append(de)
    t_trel.append(et)
    a_strel.append(a_s)
    inercial_xtrel.append(i_x)
    inercial_ytrel.append(i_y)
    ri_xtrel.append(r_x)
    ri_ytrel.append(r_y)
    s_xtrel.append(s_x)
    s_ytrel.append(s_y)
    peso_trel.append(peso_barra(compr[i], a_strel[i], pho))

# Função objetivo
of = sum(peso_trel)

#cálculo de carga g
g_interno = -((of*l_galpao*5)/6 + 3.549)
g_externo = -((of*l_galpao*5)/12 + 1.774)

# Esforços internos
g = [g_externo, g_interno]
n_g, deltag_max = análise_estrutura_trelica_eduardo(a_strel, inercial_xtrel, g)
q = [-1.267, -2.535]
n_q, deltaq_max = análise_estrutura_trelica_eduardo(a_strel, inercial_xtrel, q)
v = [-0.4, -0.8]
n_v, deltav_max = análise_estrutura_trelica_eduardo(a_strel, inercial_xtrel, v)
g_0 = []
g_1 = []
g_2 = []
g_3 = []

# Restrições de tensões normais
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.25 * n_gi + 1.5 * n_qi + 1.4 * 0.6 * n_vi
    g, n_rd = verificacao_forca_limite_trelica_tubos(n_sd, a_strel[i], inercial_xtrel[i], inercial_xtrel[i],
d_etrel[i], t_trel[i], e_s, f_y, f_u, 1, 1, compr[i], 1.10, 1.35, False)
    g_0.append(g)
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.25 * n_gi + 1.40 * n_vi + 1.5 * 0.80 * n_qi
    g, n_rd = verificacao_forca_limite_trelica_tubos(n_sd, a_strel[i], inercial_xtrel[i], inercial_xtrel[i],
d_etrel[i], t_trel[i], e_s, f_y, f_u, 1, 1, compr[i], 1.10, 1.35, False)
    g_1.append(g)

# Restrições de esbeltez
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.5 * n_gi + 1.4 * n_qi + 0.4 * n_vi
    g, s = verificacao_esbeltez_limite(s_xtrel[i], s_xtrel[i], n_sd, False)
    g_2.append(g)
for i, (n_gi, n_qi, n_vi) in enumerate(zip(n_g, n_v, n_q)):
    n_sd = 1.5 * n_gi + 1.4 * n_qi + 0.4 * n_vi
    g, s = verificacao_esbeltez_limite(s_xtrel[i], s_xtrel[i], n_sd, False)
    g_3.append(g)

# Restrição do deslocamento máximo na treliça
delta_max = vao / 250
delta_sd = 1.00 * deltag_max + 0.60 * deltaq_max + 0.0 * deltav_max

```

```
g_4 = [np.abs(delta_sd) / delta_max - 1]

# Método de penalização
g = g_0 + g_1 + g_2 + g_3 + g_4
for j in g:
    of += 1E6 * (max(0, j) ** 2)

return of, g_0, g_1, g_2, g_3, g_4

if __name__ == '__main__':
    caminho = r"H:\.shortcut-targets-by-id\1e0yVYpTbQtGnlPB0Fu-Z570AiH-KsEpQ\4
Resultados\20240713\12 m\Catálogo Vallourec.xlsx"
    file = pd.read_excel(caminho)
    x = [23.558872527754374, 23.569522437905295, 0.0]
    peso, g_0, g_1, g_2, g_3, g_4 = obj_2(x, file)
    print(g_0)
```

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescente desenvolvimento industrial, o mercado busca cada vez mais produtos inovadores para evitar desperdícios e automaticamente minimizar custos; no que tange a isto, a utilização dos métodos heurísticos, juntamente com o algoritmo genético é ótimo caminho para criação de um otimizador de treliças metálicas tubulares.

Esse otimizador vem de encontro com a grande necessidade que os engenheiros e projetistas têm em relação à utilização em campo, uma vez que o dimensionamento pode conter erros; portanto, após o dimensionamento, o profissional deverá inserir esse cálculo no otimizador para que a estrutura escolhida seja otimizada de acordo com os esforços solicitados, sem prejuízos às NBR's, tampouco a segurança estrutural da obra.

O código do software desenvolvido será requerido à patente, porém, para estudos e melhorias, será aberto, inclusive para pesquisas futuras sobre ligações e outros tipos de estruturas metálicas.

Além disso, é possível que o código seja adaptado para outros tipos de estruturas, com coeficientes de densidade absoluta diferentes e dimensões variadas, seja quadrada ou tubular quadrada.