

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO MEF: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

STRUCTURAL OPTIMIZATION USING FEM: AN INTEGRATIVE REVIEW

Resumo: No campo de estudo da estrutura há uma 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 se enquadra no termo ótima, que vença solicitações e economize aplicação de material e tempo de dimensionamento. Com objetivo de desenvolver o processo estrutural, soluções ainda mais ótimas podem ser encontradas utilizando métodos heurísticos, e, por isso, neste estudo é feita uma 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 se 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. Treliça tubular.

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 of 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. In order 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 on the subject; articles that study the optimization of metal trusses with tubular sections 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 in order to discern the most efficient method(s) for optimizing the part, 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.

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

Eduardo Ramos Muniz¹

Marcel Willian Reis Sales²

Wanderlei Malaquias Pereira

Junior³

Bacus de Oliveira Nahime⁴

1 Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano; Professor na Faculdade de Inhumas – FacMais; eduardoramosmuniz@gmail.com

2 Professor Titular do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano; Doutor em Engenharia Civil; marcel.sales@ifgoiano.edu.br

3 Professor Titular da Universidade Federal de Catalão - UFCAT; Doutor em Engenharia Civil; wanderlei_junior@ufcat.edu.br

4 Professor Titular do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano; Pós - Doutor em Ciência dos materiais; bacusnahime@ifgoiano.edu.br

INTRODUÇÃO

No mercado há uma 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.

A engenharia, então, precisa, constantemente, evoluir na busca por métodos que otimizem dimensionamentos e auxiliem a elaboração de projetos com menor custo e maior eficiência. Tangente a isso, 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 dele.

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 a minimização ou maximização de uma função objetivo (FO), essa 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) elucidaram 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 satisfatórios, uma nova configuração deve ser testada, e, mesmo quando os requisitos forem satisfatórios, pode não ser a configuração ótima, então, sugere-se uma nova configuração; (4) sugerir uma nova configuração e retornar ao passo 2.

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

Entretanto, o projeto de treliças metálicas leva em conta muitas variáveis, o que, somado à diversas etapas distintas de

verificação e dimensionamento dos elementos do sistema, o torna complexo. Portanto, existem, além de variáveis de projeto, eficiência, compreensão dos elementos empregados e um processo interativo (Azizi *et al.*, 2022).

Assim sendo, do ponto de vista de projeto, a aplicação das técnicas de otimização torna-se uma ferramenta interessante, visto que elas podem reduzir o tempo de elaboração de um projeto (Vasconcelos *et al.* 2013), como, também, possibilita uma 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 é dividido 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. Nesse caso, é típico trabalhar com variáveis discretas (por meio de um grupo pré-definido de seções disponíveis) ou variáveis contínuas, quando qualquer valor de seção pode ser aceito em um determinado intervalo (Zargham, Ward, Ramli, & Badruddin, 2016).

Na otimização da geometria, a

modificação de coordenadas nodais é permitida. Então, nesse 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 suas 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, assim, com a resistência da peça; portanto, ele 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 para suas restrições. Além, ainda, de ser possível usar variáveis

contínuas, discretas, lógicas, e, até mesmo, combinar esses tipos de variáveis. A função objetivo oferece bastante flexibilidade, o que permite que ela seja modificada de forma simples; além de ser possível otimizar um grande volume de variáveis (Pereira Junior, 2020).

Ainda de acordo com o mesmo autor, podemos 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).

Espera-se que, neste trabalho, seja possível 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.

MATERIAIS E MÉTODOS

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, pois, nela, é elaborado um protocolo que contém o objetivo de pesquisa, critérios de seleção, palavras chaves, 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 (*strings* listadas posteriormente), as palavras-chave e as plataformas em que os artigos serão buscados;

- *Fase de execução*: nesta etapa, os artigos selecionados previamente na fase de planejamento passam por uma “peneira”, onde são excluídos os artigos duplicados em várias bases, não possui 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 incompleto 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, foram inseridos objetivos gerais, pergunta de pesquisa, palavras chaves, critérios de seleção de trabalhos, idiomas, métodos de pesquisa, critérios de qualidades, formulários de extração, bases de dados e critérios de aceitação e exclusão.

Desta maneira 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 selecionadas são

diversificadas para que possam ser contemplados um maior número de trabalhos relacionados ao objetivo de pesquisa.

Após a seleção das bases de dados, foram desenvolvidas “strings” de busca com palavras chaves para cada base de dados, sendo elas: “*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*”.

Como resultado desse trabalho sistemático, obteve-se a Tabela 01, que elenca os trabalhos escolhidos a serem analisados e compilados na próxima etapa da revisão integrativa.

Tabela 01 – 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 et. al., 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, et. al., 2022	Uma evolução diferencial paralela com estratégia de busca múltipla cooperativa para otimização de dimensionamento de treliças.	8.263

Fonte: O autor.

O estudo está estruturado em tópicos que avaliam o melhor peso, o peso médio, desvio padrão e a quantidade de iterações que cada algoritmo estruturado realizou para que fosse possível chegar ao resultado na condição ótima.

Para entender melhor, o processo

iterativo é aquele que progride por meio 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 02 demonstra os métodos utilizados por cada autor.

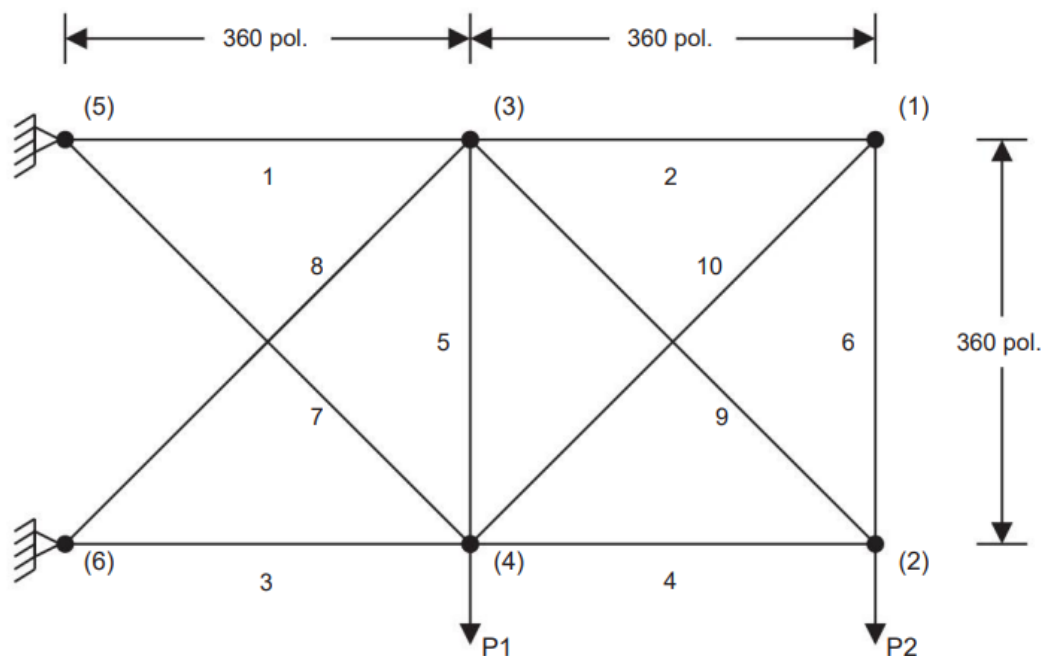
Tabela 02 – Autores e Métodos de Otimização

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 et. al., 2022	CHT Híbrido DEB Mapeamento
The-Viet Há, et. al., 2022	PDECMS Algoritmo Genético (AG)

Fonte: O autor.

Para esta análise, foi considerada uma estrutura de treliça plana de 10 barras, conforme mostrado na Figura 01. Este problema de otimização foi resolvido por vários pesquisadores, tais como Ho-Huu, et al. 2016, usando evolução diferencial; Rajeev e Krishnamoor thy, 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 01 – Modelo de Treliça Plana com 10 barras


Fonte: O autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foram tabulados os dados (Tabela 03) advindos de cada autor em um mesmo modelo (Figura 01), sendo ele a Treliça

de 10 barras, e separados, cada um, pelos métodos utilizados já informados na Tabela 02.

Realizadas as tabulações, passou-se às aplicações do problema de otimização juntamente com estruturas treliçadas pelo panorama teórico.

Tabela 03 – 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 et. al., 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, et. al., 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: O autor.

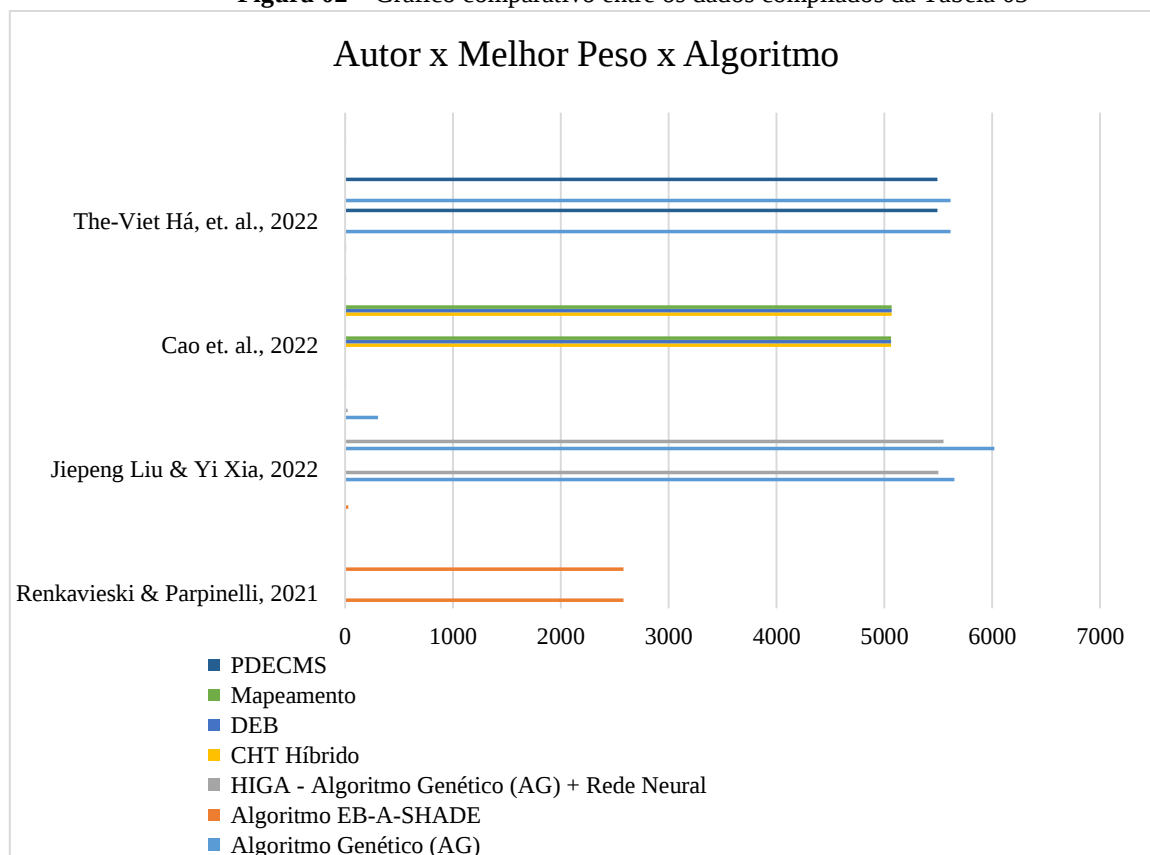
As estruturas podem ser otimizadas de diferentes maneiras, por exemplo: na otimização de tamanho de estruturas treliçadas, a área da seção transversal dos membros da peça é otimizada.

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 dessa, é utilizada na otimização da topologia, como pode ser observado na Tabela

01.

Figura 02 – Gráfico comparativo entre os dados compilados da Tabela 03



Fonte: O autor

É perceptível, a partir da Tabela 03 e da Figura 02, que o número de iterações interfere no resultado final para o melhor peso. 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 eles 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 02, pode-se observar qual deles cada autor estudado utilizou. Já, 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, podendo ser observado em um trabalho elencado, no qual utilizou-se de 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. Nesse 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 assim dúvidas em relação ao modelo, haja vista que os outros algoritmos deduziram valores bem próximos, com desvios padrão bem reduzidos, o que pode indiciar erro na compilação ou, até 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 assim o melhor peso, porém com desvio padrão minimizado, reduzindo assim, discrepâncias que podem prejudicar os resultados.

Tangente a isso, temos que o autor que encontrou o peso médio *ótimo* foi o mesmo que elencou o melhor peso; não obstante do que foi citado acima, podemos 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 homogêneas.

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 ele no valor de 7,58 em um 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.

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, o que justifica a aplicação de algoritmos meta-heurísticos.

O mapeamento da literatura de forma integrativa, metodologia utilizada neste trabalho, demonstrou que a otimização não é apenas um campo de pesquisa ativo, mas em extrema ascendência. Ele também elenca uma

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 é, nada mais 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 e seus respectivos resultados.

REFERÊNCIAS

- 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.**

CV CAMP, BJ BICHON, SP STOVALL, **Projeto de armações de aço usando otimização de colônia de formigas, J. Struct. Eng., 2005.**

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 v. 29, 2021.**

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, 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.**

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

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, 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.**

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

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, 2020.**

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

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, 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.

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.

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, 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, 2016.