

## Sustentabilidade na Construção Civil: Otimização de estruturas treliçadas de aço pelo Método da Busca Harmônica

Lucas José Fernandes<sup>1</sup>, Moacir Kripka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Passo Fundo - UPF / PPGEng / 200274@upf.br

<sup>2</sup> Universidade de Passo Fundo e Universidade Tecnológica Federal do Paraná / PPGEC / mkripka@uftpr.edu.br

### Resumo

A crescente demanda por recursos naturais e a necessidade de mitigar o impacto ambiental na construção civil têm impulsionado a busca por métodos mais eficientes de fabricação. Este estudo investiga a otimização de estruturas treliçadas de aço por meio do método de otimização por busca harmônica, com o objetivo de minimizar o peso das estruturas e selecionar perfis laminados que ofereçam máxima resistência com o mínimo de material. A técnica de busca harmônica, inspirada na improvisação musical, demonstrou ser eficaz em resolver problemas complexos de otimização estrutural, explorando rapidamente um vasto espaço de soluções e encontrando combinações viáveis de perfis que atendem aos requisitos de segurança e desempenho. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo foi capaz de identificar soluções ótimas em um curto período de tempo, analisando um grande número de combinações de perfis e minimizando o peso total da treliça sem comprometer a integridade estrutural. Conclui-se que a aplicação dessa metodologia representa um avanço significativo na busca por estruturas mais eficientes, combinando rapidez na resolução e ótimos resultados em termos de desempenho e economia de material.

**Palavras-chave:** Otimização, Busca Harmônica, Estruturas Treliçadas de Aço, Redução de Desperdícios, Sustentabilidade.

### Introdução

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico global, mas também apresenta desafios significativos em relação ao uso sustentável dos recursos naturais e à mitigação dos impactos ambientais. Responsável por uma parcela substancial das emissões globais de CO<sub>2</sub> e pelo consumo intensivo de materiais, esta indústria enfrenta uma pressão crescente para adotar práticas mais sustentáveis que possam reduzir seu impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida dos projetos construtivos. Segundo o Instituto Aço Brasil (2022), a produção de aço é um dos principais contribuintes para as emissões globais de gases de efeito estufa tornando-se um dos principais desafios para o setor.

Nos últimos anos, a busca por métodos construtivos que promovam a eficiência material e energética tem sido uma prioridade. Nesse contexto, a otimização de estruturas de aço treliçadas emerge como uma solução promissora. As treliças de aço, compostas por barras interligadas, oferecem não apenas resistência estrutural significativa, mas também a flexibilidade de serem otimizadas para minimizar o peso e os desperdícios durante a fabricação e a operação.

O presente estudo se concentra na aplicação da Busca Harmônica como método de otimização para estruturas treliçadas de aço. Inspirada na improvisação musical, a Busca Harmônica é uma técnica heurística eficaz para resolver problemas complexos de otimização, explorando de forma adaptativa o espaço de soluções em busca das configurações que melhor equilibram os requisitos de segurança, resistência e eficiência material.

O objetivo deste artigo é explorar como o método de otimização por Busca Harmônica pode ser aplicado para minimizar o peso e os desperdícios nas estruturas treliçadas de aço, com vistas a promover maior eficiência na construção.

## **Desafios na construção civil**

A construção civil desempenha um papel crucial na economia global, mas enfrenta uma série de desafios que impactam diretamente sua sustentabilidade e eficiência. O setor é um dos maiores consumidores de recursos naturais e também responsável por grandes emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos sólidos. Esses impactos ambientais são agravados pela crescente demanda por construções, impulsionada pelo aumento populacional e pela urbanização acelerada. Além disso, a construção civil ainda lida com questões como o alto custo dos materiais, a pressão por prazos curtos e a necessidade de maior qualidade e segurança nos projetos (AMARAL, 2013).

Um dos principais desafios é a dependência do aço como material de construção. O aço, amplamente utilizado em estruturas treliçadas e outras aplicações, oferece vantagens significativas, como alta resistência e durabilidade. No entanto, a produção de aço envolve o uso intensivo de energia e a emissão de poluentes, incluindo CO<sub>2</sub>, contribuindo para o agravamento da crise climática. A produção siderúrgica também depende do carvão vegetal, que pressiona as florestas e intensifica o desmatamento, particularmente em regiões como o Brasil, onde o setor é altamente expressivo na economia global (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

O aumento da competitividade no setor também impõe desafios em relação à sustentabilidade econômica. A pressão para reduzir custos e prazos de entrega leva muitas vezes a uma negligência em relação à qualidade dos projetos e à eficiência no uso dos recursos. Essa situação resulta em uma contradição pois ao buscar economias no curto prazo, muitas empresas acabam enfrentando maiores custos ambientais e financeiros no longo prazo, seja pelo desperdício de resíduos ou pela criação de estruturas menos eficientes do ponto de vista energético e funcional (CORTEZ et al., 2018).

O setor enfrenta o desafio de integrar práticas mais sustentáveis ao longo de toda a cadeia produtiva, desde o projeto até a execução. A introdução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela ONU trouxe à tona a necessidade de transformar as práticas construtivas, incentivando a adoção de tecnologias inovadoras, a reciclagem de materiais e a utilização de fontes de energia renovável. No entanto, a adoção de tais práticas ainda é lenta, principalmente devido ao alto custo inicial de implementação e à falta de regulamentação efetiva (BARBOSA JUNIOR et al., 2023).

Em um estudo realizado por Ferreira et al. em 2023, foram identificadas áreas críticas da indústria da construção civil que impactam tanto positivamente quanto negativamente os indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A pesquisa revelou que, embora a indústria da construção civil contribua positivamente para os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), 4 (Educação de Qualidade), 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico) e 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ela também exerce efeitos adversos significativos sobre vários outros ODS. Esses impactos negativos incluem os ODS 5 (Igualdade de Gênero), 6 (Água Potável e Saneamento), 7 (Energia Limpa e Acessível), 10 (Redução das Desigualdades), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsável), 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), 15 (Vida Terrestre) e 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes). Esse panorama destaca a importância de conduzir pesquisas científicas voltadas para a mitigação dos impactos adversos e a promoção de práticas sustentáveis dentro do setor da construção civil.

## Otimização estrutural como estratégia sustentável

A otimização estrutural surge como uma ferramenta crucial para enfrentar os desafios ambientais e econômicos da construção civil. Trata-se de uma estratégia que busca a melhor configuração estrutural possível, visando minimizar o uso de materiais e reduzir os impactos ambientais sem comprometer a segurança e a funcionalidade dos projetos. Nesse contexto, o uso de técnicas de otimização, como a Busca Harmônica (HS), desempenha um papel central ao proporcionar soluções eficientes e sustentáveis (TOGAN, 2012).

A estratégia de otimização visa, principalmente, minimizar o peso das estruturas, o que resulta diretamente na redução do consumo de material e, conseqüentemente, no impacto ambiental associado à extração e fabricação de aço. Além disso, a redução do peso estrutural leva a economias em outros aspectos do projeto, como fundações e transporte de materiais. Ao usar menos material, o projeto também se torna economicamente mais viável, promovendo um equilíbrio entre custos e sustentabilidade (LEE; GEEM, 2004).

Uma das abordagens mais eficazes dentro da otimização estrutural é a aplicação de algoritmos heurísticos, como o método da Busca Harmônica. Este método se diferencia por sua simplicidade e eficiência, permitindo encontrar rapidamente soluções viáveis para problemas complexos, especialmente aqueles que envolvem variáveis discretas, como a seleção de perfis comerciais de aço. A Busca Harmônica é capaz de identificar as melhores combinações de variáveis para minimizar o desperdício de material (GEEM *et al.*, 2001).

Além dos benefícios econômicos e ambientais, a otimização estrutural também contribui para a sustentabilidade do ciclo de vida das construções. Ao garantir que a estrutura seja projetada com o mínimo de material necessário, sem comprometer a segurança, a otimização promove construções mais leves, menos agressivas ao meio ambiente e com maior potencial de reciclagem ao final de sua vida útil. Assim, a otimização estrutural se alinha perfeitamente com os princípios do desenvolvimento sustentável, sendo uma ferramenta essencial para transformar o setor da construção civil (BARBOSA JUNIOR *et al.*, 2023).

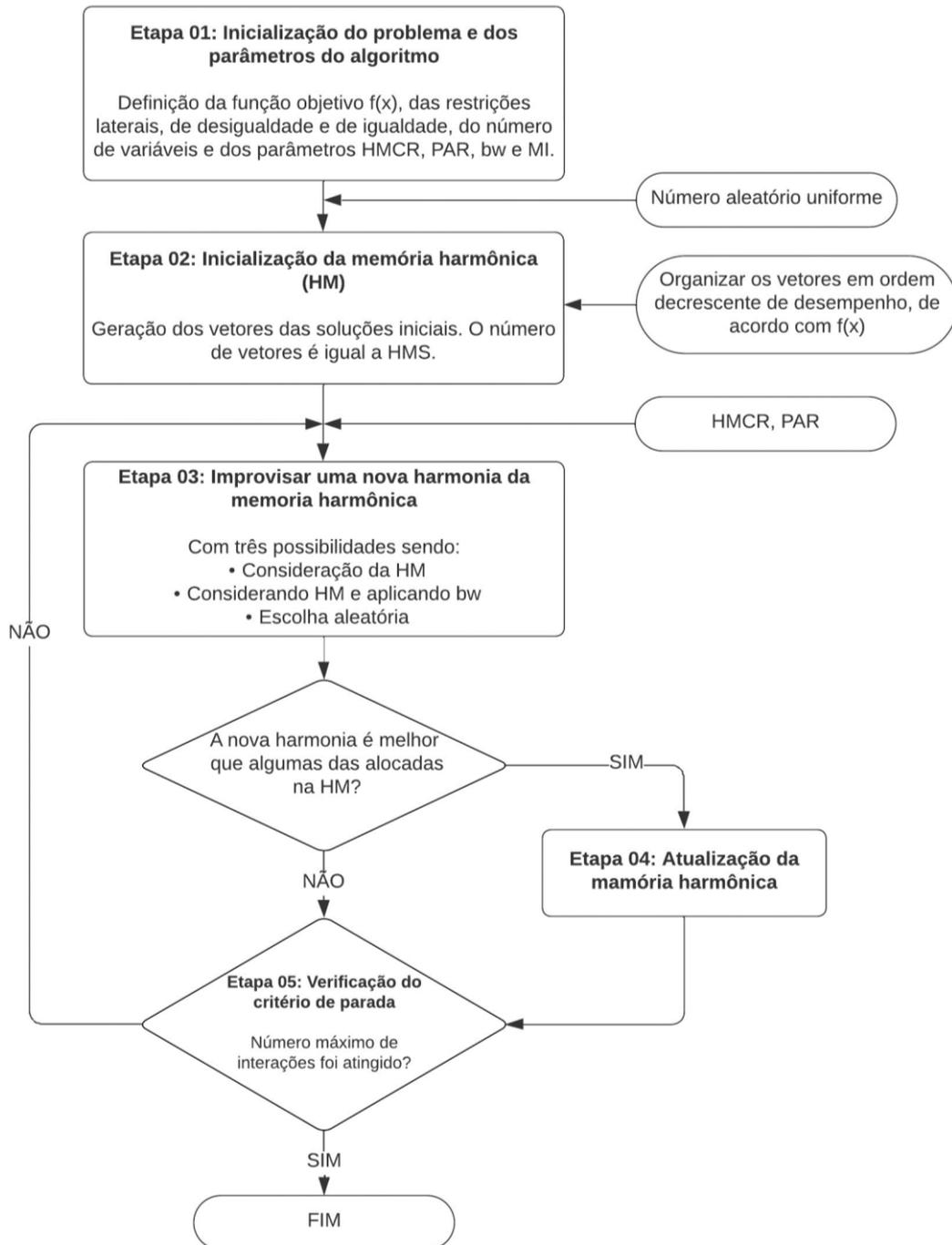
## Otimização por busca harmônica

O método de otimização por Busca Harmônica (Harmony Search - HS), proposto por Geem, Kim e Loganathan (2001), é um algoritmo heurístico inspirado na improvisação musical, em especial no jazz. Assim como os músicos ajustam suas notas para alcançar uma harmonia agradável, o algoritmo busca a combinação ideal de variáveis de projeto, ajustando-as iterativamente até encontrar a solução mais eficiente. É amplamente utilizado na engenharia, especialmente em problemas de otimização estrutural, devido à sua flexibilidade e simplicidade (GEEM *et al.*, 2001).

O HS funciona a partir de uma "Memória Harmônica" (HM), onde são armazenadas soluções potenciais chamadas de "harmonias". O algoritmo inicia criando uma memória de soluções, que podem ser geradas aleatoriamente. Em seguida, ele ajusta essas soluções, combinando-as e realizando pequenas variações, como uma improvisação musical, até que uma solução otimizada seja encontrada. A simplicidade do HS, que utiliza poucos parâmetros, como a taxa de consideração da memória (HMCR) e a taxa de ajuste da nota (PAR), facilita sua implementação e rápida convergência (LEE; GEEM, 2004).

O método de otimização HS é eficaz em resolver problemas com variáveis discretas e não lineares, o que o torna ideal para a engenharia estrutural, onde são comuns problemas de dimensionamento de estruturas de aço. Sua capacidade de explorar e refinar soluções o torna adequado para minimizar peso estrutural e desperdício de material, otimizando o uso de perfis de aço. (MEDEIROS, 2012).

A Figura 1 apresenta o fluxograma fundamental do algoritmo de busca harmônica, destacando os cinco principais parâmetros e etapas do método.

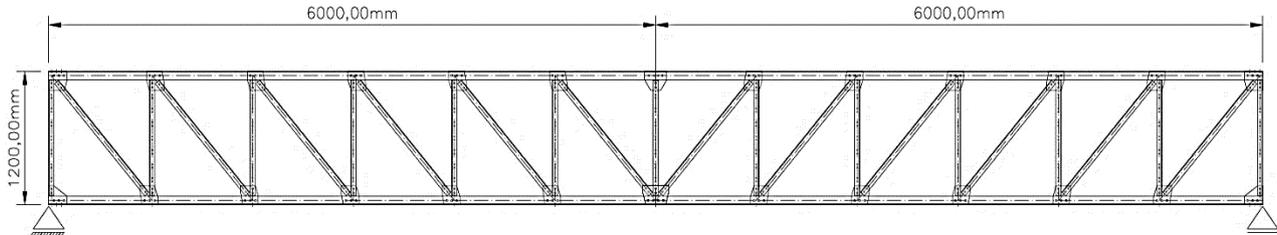


**Figura 1 – Fluxograma das etapas da busca harmônica.**

Sua aplicação na otimização de estruturas tem mostrado bons resultados, principalmente em termos de sustentabilidade, já que o método de otimização por busca harmônica pode reduzir o consumo de material e o impacto ambiental, ao mesmo tempo que mantém a integridade e segurança da estrutura. A utilização desse método contribui para projetos mais leves e econômicos, em conformidade com as demandas de sustentabilidade atuais (TRES JUNIOR, 2023).

## Processo metodológico

O processo metodológico adotado no desenvolvimento deste estudo baseia-se na aplicação do método de otimização por Busca Harmônica (Harmony Search - HS), com foco na minimização do peso e redução do desperdício de material na concepção de treliças de aço (Figura 2).



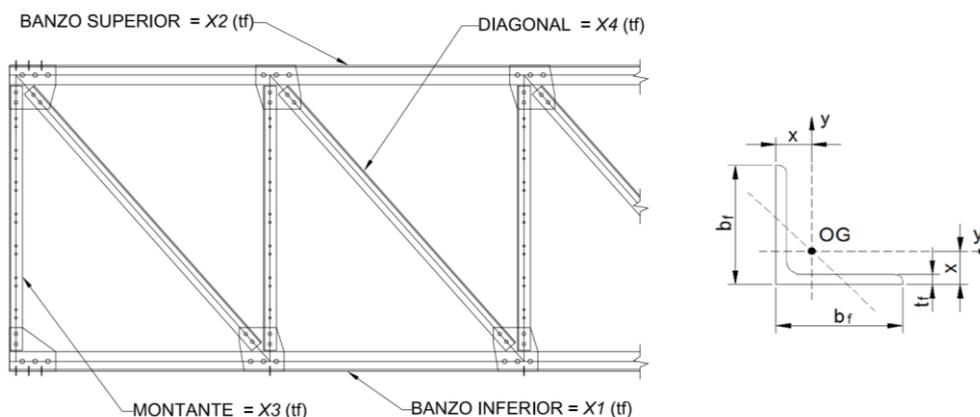
**Figura 2 – Projeto da treliça em aço do estudo.**

A metodologia seguiu as seguintes etapas principais:

1. Parâmetros de Projeto: Inicialmente, o problema foi formulado com a definição clara dos objetivos, variáveis de projeto (Figura 3) e restrições. O objetivo principal é minimizar o peso da treliça, considerando as restrições de resistência à tração, compressão e deformação, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 8800 (2024). As variáveis de projeto incluíram as dimensões da seção transversal dos perfis de aço, como a largura e espessura das abas. O espaço de busca foi delimitado pelos perfis laminados disponíveis no mercado, garantindo a aplicação prática das soluções obtidas.

Sendo as variáveis:

- $x_1$  = Perfil do banzo inferior;
- $x_2$  = Perfil do banzo superior;
- $x_3$  = Perfil do montante;
- $x_4$  = Perfil da diagonal.



**Figura 3 – Identificação das variáveis do problema de otimização.**

2. Formulação do Problema: A formulação do problema de otimização estrutural neste estudo visa minimizar o peso de uma treliça de aço composta por perfis laminados, considerando as restrições de segurança estrutural estabelecidas pelas normas. Para isso, foi utilizado o método de Busca Harmônica, que permite identificar as melhores seções transversais dos perfis que atendam às necessidades de resistência e eficiência econômica. As variáveis de projeto

incluem as dimensões dos perfis e o posicionamento dos nós, enquanto a função objetivo é a minimização do peso total da estrutura. As restrições impostas ao problema incluem as limitações de resistência do material, deformações máximas admissíveis e os critérios de segurança definidos pelas normas técnicas (ABNT NBR 8800, 2024).

Matematicamente, o problema de otimização é descrito da seguinte forma pela equação 1:

$$\text{Minimizar: } F(X) = \sum_{i=1}^n \text{Peso}_i \quad (1)$$

Onde  $(X)$  são as variáveis de projeto que definem as dimensões dos perfis de aço, e  $n$  é o número total de elementos da treliça.

3. Restrições: As restrições envolvem tanto limites de resistência quanto deformações, sendo sua formulação genérica normalizada apresentada conforme a Equação 2:

$$g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

Sendo:

- Limitação de resistência à tração e compressão;
- Limitação de deformações excessivas;
- Conformidade com os estados-limite último (ELU) e de serviço (ELS).

O algoritmo de HS permite a improvisação de novas soluções com base na memória de soluções anteriores, ajustando continuamente as variáveis de projeto até que o critério de parada seja alcançado.

4. Análise Estrutural e Verificação de Restrições: Usualmente para cada solução gerada pelo algoritmo, foi realizada uma análise estrutural, calculando os esforços de tração e compressão em cada barra da treliça. No presente trabalho, como a estrutura proposta é isostática, optou-se por ingressar com os esforços como dados de entrada, já que estes não variam com a mudança nas seções dos perfis. Esse procedimento reduz significativamente o esforço computacional. Esses esforços são verificados em relação às capacidades dos perfis escolhidos, garantindo que todas as soluções atendessem aos critérios de resistência. A análise seguiu as diretrizes para os estados-limite último (ELU) e de serviço (ELS), garantindo que a estrutura proposta fosse segura e eficiente. Para cada solução testada, os deslocamentos máximos são obtidos pelo Método da Carga Unitária (KRIPKA, 2021).
5. Implementação do Algoritmo de Busca Harmônica (HS): O método de Busca Harmônica foi escolhido pela sua eficiência em problemas de otimização com variáveis discretas e não lineares, como é o caso da seleção de perfis comerciais de aço. O algoritmo foi programado para gerar soluções iniciais de forma aleatória, que são refinadas iterativamente. As principais etapas do algoritmo HS incluem:
- a) Memória Harmônica: Armazenamento das melhores soluções encontradas durante as iterações.
  - b) Improvisação de Novas Soluções: A cada iteração, o algoritmo improvisa novas soluções ajustando as variáveis de projeto com base nas soluções anteriores e introduzindo pequenas variações.

- c) Atualização da Memória: Se uma nova solução melhorar os resultados, ela substitui a pior solução armazenada na Memória Harmônica.
- d) Critério de Parada: O processo é repetido até que o número máximo de iterações seja atingido ou as melhorias nas soluções se tornem insignificantes.

## Análise dos resultados

Neste estudo, o algoritmo Harmony Search foi aplicado para otimizar a escolha de perfis estruturais de uma treliça, com o objetivo de minimizar o peso total da estrutura, respeitando restrições de projeto, conforme estabelecidos pela norma ABNT NBR 8800 (2024). O processo de otimização foi conduzido com 100.000 improvisações, explorando diferentes combinações de perfis para o banzo superior, banzo inferior, montantes e diagonais.

A estrutura analisada ilustrada na figura 2, criada para esse estudo, é composta por barras reticuladas planas, com conexões parafusadas, e o tipo de enrijecedores não foi considerado nos cálculos deste estudo. O aço utilizado para os perfis é o ASTM A36, com resistência à tração ( $f_u$ ) de 400 MPa, limite de escoamento ( $f_y$ ) de 250 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa, conforme a NBR 6123 (2023).

As cargas permanentes incluem o peso dos componentes da estrutura, totalizando 70,30 kg/m, além de um equipamento com carga constante de 145,02 kg/m. Considera-se ainda uma carga acidental de 31,58 kg/m, referente à circulação de pessoas ao longo da estrutura. As cargas foram aplicadas nos nós superiores da treliça

A ação do vento foi considerada com uma velocidade básica de 45 m/s. O terreno é classificado como plano a ondulado, categoria III, com a estrutura situada a 30 m do solo. O fator estatístico considera a edificação como uma instalação industrial de baixa ocupação, como depósitos ou construções rurais. Além disso, o edifício pertence à classe A, definida por possuir uma extensão horizontal que não excede 20 m.

Para cada componente da treliça, o algoritmo considerou quatro variáveis discretas, representando os diferentes perfis possíveis para cada parte estrutural. Cada variável assumiu valores no intervalo de 1 a 49, correspondendo aos perfis de aço disponíveis em um banco de dados predefinido, o qual contempla 49 perfis diferentes de aço laminado para cada componente da treliça.

Assim, o número total de combinações possíveis de perfis para a estrutura é dado pelo produto das opções de cada componente, ou seja,  $49^4$ , resultando em um número de 5.764.801 combinações possíveis. Essa vasta quantidade de combinações evidencia a complexidade do problema de otimização e a necessidade de um algoritmo robusto como o Harmony Search para explorar eficientemente o espaço de soluções.

Os parâmetros utilizados na Busca Harmônica foram: tamanho da memória harmônica (população) de 30 harmonias, taxa de consideração da memória (HMCR) de 0,95 e fator de ajuste de pitch (PAR) variando de 0,2 a 0,8. Esses parâmetros garantiram uma boa exploração do espaço de busca e a obtenção de soluções viáveis de forma eficiente.

## Resultados das Melhores Soluções

O algoritmo identificou uma das melhores soluções com a combinação de perfis [20, 15, 12, 15], resultando em um valor de *fitness* de 195,42732. Esse valor de *fitness* representa o resultado da função objetivo, que reflete o peso final da estrutura otimizada (em kg). A seguir na tabela 1, são detalhadas as características dessa configuração de harmonia:

**Tabela 1 - Perfis resultantes da melhor harmonia**

Elemento da treliça	Perfil Resultante	Especificação Perfil	Peso P (kgf/m)	Altura bf (mm)	Espessura tf (mm)
Banzo superior	Perfil 20	2 x 1/4"	4,74	50,80	6,35
Banzo inferior	Perfil 15	1,75 x 3/16"	3,15	44,45	4,76
Montantes	Perfil 12	1,5 x 3/16"	2,68	38,10	4,76
Diagonais	Perfil 15	1,75 x 3/16"	3,15	44,45	4,76

Essa solução minimiza o peso da treliça ao mesmo tempo em que atende às restrições estruturais impostas. Embora a solução com o menor valor de *fitness* tenha sido obtida com a harmonia [20, 15, 12, 15], outras combinações de perfis, como [17, 15, 12, 15] e [24, 15, 12, 15], também foram exploradas, mas apresentaram valores de *fitness* superiores devido às penalizações aplicadas pelas violações de restrições. As penalizações são aplicadas quando algum perfil não atende às restrições estabelecidas pra o problema, sendo essas opções descartadas mesmo gerando um resultado aceitável para a função objetivo.

A Tabela 2 apresenta as melhores harmonias encontradas pelo algoritmo:

**Tabela 2 - Melhores Harmonias Encontradas**

Combinação de Perfis (Harmonia)	<i>Fitness</i> (kg)
<b>[20, 15, 12, 15]</b>	<b>195,42732</b>
[17, 15, 12, 15]	199,10112
[24, 15, 12, 15]	210,59352
[20, 15, 19, 15]	209,63268
[17, 15, 19, 15]	213,30648

Os resultados sugerem que o algoritmo conseguiu explorar uma ampla gama de soluções, algumas das quais violaram restrições estruturais e, portanto, receberam penalidades que aumentaram seu valor de *fitness*. Isso pode ser observado nas soluções como [17, 15, 12, 15], que apesar de apresentar perfis alternativos, resultou em um *fitness* mais elevado (199,10112), indicando violações significativas de restrições.

## Discussão

A aplicação do algoritmo Harmony Search demonstrou eficácia na busca por uma solução que minimizasse o peso estrutural da treliça, enquanto atendia às restrições impostas. A melhor combinação de perfis, [20, 15, 12, 15], representa uma solução viável e eficiente, com perfis que equilibram leveza e resistência estrutural.

O uso de penalidades por violações de restrições desempenhou um papel fundamental no processo de otimização. Soluções que não atenderam às exigências estruturais receberam penalidades significativas, como no caso da harmonia [24, 15, 12, 15], que obteve uma penalidade considerável e resultou em um *fitness* mais alto. Essa estratégia garantiu que o algoritmo fosse orientado para soluções que não apenas minimizassem o peso, mas também fossem estruturalmente viáveis.

O comportamento do algoritmo também demonstra sua flexibilidade em explorar diferentes configurações de perfis, permitindo ajustes nas escolhas conforme as necessidades do projeto. Por exemplo, perfis alternativos como [20, 15, 19, 15] com *fitness* de 209,632kg e [20, 19, 12, 19] com *fitness* de 209,414kg foram analisados, porém resultaram em um peso total da estrutura maior devido às propriedades mais robustas desses perfis. Isso reforça a robustez do modelo em priorizar soluções que atendem às restrições de segurança e à função objetivo do método.

Em suma, a melhor solução encontrada, com os perfis [20, 15, 12, 15], é adequada tanto em termos de minimização do peso quanto de conformidade com as normas estruturais. A aplicação do Harmony Search provou ser eficaz para explorar o espaço de busca e encontrar soluções otimizadas, com as penalidades ajustadas garantindo que soluções inviáveis fossem desencorajadas.

## Conclusão

A formulação proposta foi implementada em Python, utilizando o Método da Busca Harmônica para otimizar o peso estrutural de uma treliça de banzos paralelos. A análise foi conduzida com perfis laminados, e o algoritmo demonstrou-se extremamente eficaz e eficiente na exploração de um grande número de combinações de perfis, minimizando o peso total da estrutura e cumprindo as restrições impostas pela normativa vigente ABNT NBR 8800 (2024). Uma das grandes vantagens do método heurístico utilizado foi sua capacidade de explorar rapidamente as combinações possíveis de perfis em um curto espaço de tempo, mostrando-se uma ferramenta altamente ágil e prática para este tipo de problema de otimização, que poderia ser muito mais demorado com métodos tradicionais.

A aplicação de penalidades por violações de restrições foi essencial para guiar o algoritmo a soluções estruturalmente viáveis, assegurando que o processo de otimização não apenas focasse no menor peso, mas também em manter a conformidade com os requisitos normativos.

Atualmente, o programa encontra-se na fase de testes, com resultados promissores, embora ainda sejam necessários ajustes para aprimorar a robustez do modelo. Como próxima etapa, será incluída a análise das perdas geradas pelo processo de corte dos perfis, visando minimizar o desperdício de material e melhorar o aproveitamento no corte, reduzindo os resíduos. Esse avanço será crucial para evitar a geração de aço não aproveitado, contribuindo para a sustentabilidade do projeto e para a redução do impacto ambiental.

Com essa implementação, o modelo não apenas otimizará o peso da estrutura, mas também considerará os custos de produção e o desperdício de materiais, oferecendo soluções que, além de leves e estruturalmente seguras, serão economicamente viáveis e ecologicamente responsáveis.

## 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: 2024.
- ALENCAR, Jorge L. A; SILVA, Domingos J. F. **Otimização no corte de perfis metálicos dobrados com ênfase na redução das perdas**. Universidade Federal da Grande Dourados-UFGD. Faculdade de Engenharia. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/2340>. Acesso em: 24 out.2023.
- AMARAL, Eliane D. **Ganhos ambientais e econômicos na redução de consumo de aço em uma indústria de autopeças pela aplicação da filosofia kaizen**. Florianópolis, SC. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106947/318496.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 out. 2023.
- BARBOSA JÚNIOR, I. D. O.; *et. al.* Construction Industry and Its Contributions to Achieving the SDGs Proposed by the UN: An Analysis of Sustainable Practices. **Buildings**. 2023, 13, 1168. DOI:

<https://doi.org/10.3390/buildings13051168>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/5/1168>. Acesso em: 20 set. 2023.

GEEM, Z. W.; KIM J. H.; LOGANATHAN G. V. A **New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search**. *Simulation*, v. 76, n. 2, p. 60-68, fev. 2001. Disponível em: <https://pure.korea.ac.kr/en/publications/a-new-heuristic-optimization-algorithm-harmony-search>. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL – MERCADO BRASILEIRO DO AÇO – **Análise setorial e regional séries históricas até 2021**. 2022. 43 p. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/08/MBA\\_Edi%C3%A7%C3%A3o\\_2022.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/08/MBA_Edi%C3%A7%C3%A3o_2022.pdf). Acesso em: 18 out. 2023.

KRIPKA, Moacir. **Análise Estrutural para Engenharia e Arquitetura: Estruturas isostáticas**. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos. 2020. 157 p.

LEE, K. S; GEEM, Z. W. A **new structural optimization method based on the harmony search algorithm**. *Computers and Structures*, v. 82, n. 9, p. 781-798, 2004. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/223030152\\_A\\_new\\_structural\\_optimization\\_method\\_based\\_on\\_the\\_harmony\\_search\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/223030152_A_new_structural_optimization_method_based_on_the_harmony_search_algorithm). Acesso em: 11 de out. 2023.

MEDEIROS, Guilherme F. **Método da busca harmônica aplicado na otimização de seções de pilares retangulares em concreto armado, considerando custos econômicos e ambientais**. Passo Fundo, RS. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade de Passo Fundo – UPF. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/286>. Acesso em: 13 out. 2023.

TOGAN, V. Design of planar steel frames using teaching-learning based optimization. *Engineering Structures*, v. 34, p. 225-232, 2012.

TRES JUNIOR, Fernando Luiz. **Otimização do custo, impacto ambiental e conforto de passarelas de estrutura mista aço-concreto**. 2023. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Tecnologia da Universidade de Passo Fundo – UPF. 177 p.