



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Dallagnol Vargas

**OTIMIZAÇÃO DE TRELIÇAS METÁLICAS EMPREGADAS EM GALPÕES
ATRAVÉS DO ALGORÍTMO *HARMONY SEARCH***

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Felipe Schaedler de Almeida

Porto Alegre

Dezembro de 2018.

Guilherme Dallagnol Vargas

**OTIMIZAÇÃO DE TRELIÇAS METÁLICAS EMPREGADAS EM GALPÕES
ATRAVÉS DO ALGORÍTMO *HARMONY SEARCH***

Porto Alegre, Dezembro de 2018

Prof. Felipe Schadler de Almeida
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Felipe Schadler de Almeida
(UFRGS)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jorge Luis Palomino Tamayo
(UFRGS)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Inácio Benvegno Morsch
(UFRGS)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à todas as forças que me mantiveram em equilíbrio.

*Para todos os males, há dois remédios:
o tempo e o silêncio.*

(Alexandre Dumas – O Conde de Monte Cristo)

AGRADECIMENTOS

Minha trajetória individual tem parcela tão grande, e provavelmente maior, de créditos das pessoas e do ambiente em que estive inserido durante toda minha vida, e assim, meu primeiro agradecimento vai à sorte, pois sem ela imagino que nada disso seria realidade. Espero que as menções aqui feitas façam jus à todas as circunstâncias que me levaram até o presente momento.

Agradeço à Natália, minha irmã e melhor amiga, por tudo que nossa amizade representa e por todas os momentos, sejam eles bons ou ruins, que tive a sorte de compartilhar com ela.

Agradeço à Marilice, minha mãe, por me inspirar com sua ética e sua conduta, por fazer o papel de mãe como poucas outras conseguem, e é claro, pela gigantesca amizade e conexão formada desde o princípio.

Agradeço ao Romeu, meu pai e melhor amigo, pelo incentivo ilimitado ao saber, pela confiança em minhas qualidades, e pela disposição inabalável de ser o melhor companheiro que um filho pode imaginar.

Agradeço à Tamires, por ter colaborado tão fortemente em manter minha sanidade psíquica e me proporcionado a experiência de superar os piores obstáculos.

Agradeço às amigas formadas durante a faculdade, especialmente o Matteo, por compartilhar muitos dos medos e incertezas oriundos da graduação e me lembrarem que é possível encontrar maneiras de tornar as experiências mais indigestas e torturantes deste curso em boas lembranças.

Agradeço ao Colégio Sinodal Barão do Rio Branco e seu corpo de professores, pela maestria e paixão demonstrada durante o tempo em que honrosamente fui servido pelo profissionalismo deles, o que invariavelmente me enriqueceu em conhecimento, mas que certamente também modelou o meu pensamento crítico e visão de mundo.

Agradeço ao meu orientador, Felipe Schaedler de Almeida, por me proporcionar aprendizados e oportunidades que modificaram massivamente e positivamente minha percepção das habilidades de um engenheiro estrutural, além de

suas sugestões e conselhos durante toda a elaboração deste e dos outros trabalhos em que trabalhamos juntos.

Agradeço à Inácio Benvegno Morsch e Jorge Luis Palomino Tamayo, por aceitarem fazer parte da banca examinadora de meu trabalho.

Por fim, agradeço à UFRGS, por ter me oferecido continuamente conhecimentos valiosos e pelos ensinamentos inesquecíveis que apenas a vida acadêmica pode proporcionar.

RESUMO

A otimização estrutural é uma ferramenta que possibilita minimizar ou maximizar características da estrutura, como deslocamentos, peso e custo. Ao mesmo tempo, esse processo deve respeitar condições de contorno, compatibilidade e quaisquer outras restrições impostas, de forma a gerar uma solução segura e econômica. O enfoque deste estudo é criar uma ferramenta capaz de minimizar, para dimensões comerciais, a seção transversal de elementos metálicos conforme os critérios de resistência presentes na NBR 8800:2008. Em especial, são analisados os casos de treliças trapezoidais empregadas em galpões de aço formadas por perfis de dupla cantoneira simétrica "T". Para gerar as estruturas ótimas, foram elaborados programas que calculam os esforços resistentes conforme a NBR citada em linguagem FORTRAN 2003, devido ao vasto uso dela na Engenharia. O algoritmo utilizado no processo de otimização foi o Harmony Search, que encontra soluções através de etapas que se assemelham à improvisação de melodias por um músico. A otimização é realizada com base em uma função de penalidade para levar em conta a violação de restrições determinadas pelos critérios de resistência. As variáveis podem ter natureza contínua ou discreta, de acordo com a realidade do projeto estrutural. Os resultados obtidos através desse método confirmam que a otimização estrutural representa uma alternativa econômica e segura para o dimensionamento das estruturas.

Palavras-chave: Otimização, Harmony Search, Treliças, Aço, Galpões, NBR 8800

ABSTRACT

Structural optimization is a tool that enables the minimization or maximization of structural characteristics, such as displacements, weight and cost. At the same time, this process must respect boundary conditions, compatibility and whatever other posed restrictions, such that safe and economic solutions are generated. The focus of this work is to create a tool capable of minimizing, using standard profiles, the cross section of metallic elements according to the resistance criteria present in the NBR 8800:2008. In particular, the cases of trapezoidal trusses used in steel sheds formed by symmetrical double angled profiles "T" are analyzed. In order to generate the optimal structures, programs were developed that calculate the resistant efforts according to the NBR cited in FORTRAN 2003, due to the vast use of it in Engineering. The algorithm used in the optimization process was Harmony Search, which finds solutions through steps that resemble the improvisation of melodies by a musician. The optimization is performed based on a penalty function to consider the violation of constraints determined by the resistance criteria. The variables can be continuous or discrete in nature, according to the reality of the structural design. The results obtained through this method confirm that the structural optimization represents an economical and safe alternative for the dimensioning of the structures.

Keywords: Optimization, Harmony Search, Trusses, Steel, Sheds, NBR 8800

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites referentes às dimensões dos vãos e seus respectivos espaçamentos.....	21
Tabela 2 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 1	48
Tabela 3 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 2	50
Tabela 4 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 3.....	52
Tabela 5 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 4.....	55
Tabela 6 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 5.....	57
Tabela 7 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 6.....	59
Tabela 8 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 7.....	61
Tabela 9 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 8.....	63

Tabela 10 – Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 9.65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema de galpão industrial com designação dos elementos estruturais de acabamento.....	19
Figura 2– Sistemas Isostáticos.....	20
Figura 3 - Pórticos Birrotulados.....	20
Figura 4 – Formas de coberturas treliçadas.....	22
Figura 5- Esquema estrutural de galpão de vão simples.	24
Figura 6– Exemplos de representações gráficas de cada classe de otimização estrutural. a) “ <i>sizing</i> ” b) topológica c) topológica (em meio contínuo).	29
Figura 7– Analogia de referência do funcionamento do Harmony Search	30
Figura 8– Matriz do Harmony Memory, que contém os valores dos “ <i>hms</i> ” vetores de “ <i>n</i> ” variáveis de projeto.....	31
Figura 9– Fluxograma de geração de novos vetores (3º passo) <i>Li e Ui</i> referem-se aos limites inferiores da variável de projeto <i>i</i>	33
Figura 10– Esquema simplificado do problema de otimização proposto para análise.	34

Figura 11 – Aspecto geométrico da seção transversal das barras de treliça.	34
Figura 12 – Consideração de carga de vento na estrutura de treliça.	38
Figura 13 – Consideração de contraventamento das treliças estudadas.	39
Figura 14 – Geometria inicial da treliça avaliada no problema de otimização.....	40
Figura 15 – Modelo de discretização utilizado no trabalho. Divisão da estrutura: banzo superior (rosa), banzo inferior (vermelho), montante (azul) e diagonais (verde).	41
Figura 16 – a) combinação de cargas correspondentes à “sucção” b) combinação de cargas correspondentes à “sobrepessão”.	44
Figura 17 – Sequência dos passos executados pelo programa no processo de otimização.	45
Figura 18 – a) Topologia 1; b) Topologia 2; c) Topologia 3.....	47
Figura 19 – Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 1.	49
Figura 20 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 1.....	49
Figura 21 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 2.	51

Figura 22 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 2.....	51
Figura 23 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 3.	53
Figura 24 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 3.	53
Figura 25 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 4.	55
Figura 26 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 4.....	56
Figura 27 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 5.	57
Figura 28 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 5.....	58
Figura 29 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 6.	60
Figura 30 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 6.....	60

Figura 31 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 7.	62
Figura 32 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 7.	62
Figura 33 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 8.	64
Figura 34 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 8.	64
Figura 35 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 9.	66
Figura 36 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 9.	66
Figura 37 – Agrupamento das topologias testadas para cada dimensão de banzo inferior analisada.	67

SUMÁRIO

1. Introdução	17
2. Detalhes construtivos de galpões.....	19
2.1. Pórticos Simples	20
2.2. Tesouras.....	21
2.3. Contraventamento	23
3. Otimização Estrutural	24
3.1. Formulação matemática geral de um problema de otimização estrutural.....	25
3.1. Métodos de otimização	27
3.2. Tipos de problemas de otimização	28
4. Algoritmo Harmony Search	30
5. Definições da análise do problema	34
6. Descrição do problema de engenharia como um problema de otimização	40
7. Resultados	46
7.1. Treliça com vão de 20 metros.....	47
7.1.1. Topologia 1	48
7.1.2. Topologia 2	50
7.1.3. Topologia 3	52
7.2. Treliça com vão de 30 metros.....	54
7.2.1. Topologia 1	54
7.2.2 . Topologia 2	56
7.2.3. Topologia 3	59
7.3. Variação das topologias, L = 40m, demais parâmetros fixos.....	61

7.3.1. Topologia 1	61
7.3.2. Topologia 2	63
7.3.2. Topologia 3	65
8. Considerações finais	67
9. Referências bibliográficas	69

1. Introdução

Estruturas de aço apresentam uso crescente na construção civil, representando 15% do universo do setor de edificações do Brasil, segundo o Centro Brasileiro da Construção do Aço (CBCA, 2015). Ainda, segundo BELLEI (2010), os materiais e insumos correspondem de 20% a 50% do custo de uma estrutura metálica.

Um dos formatos geométricos de estruturas metálicas mais comuns é a treliça. Sua composição triangular garante rigidez natural (ângulos fixos para lados fixos), esforços internos transmitidos por tração ou compressão, e leveza na estrutura. As treliças são de extrema utilidade, sendo encontradas em pontes, telhados, edifícios industriais, etc. Dentre estes, os galpões metálicos, que estão entre os edifícios industriais mais usuais, utilizam comumente vigas de cobertura formadas por treliças planas (BELLEI, 2010). Por ser uma estrutura razoavelmente simples e bastante utilizada, as treliças presentes em galpões metálicos apresentam-se como um bom objeto de estudo e serão a base deste trabalho.

Para treliças metálicas, a variedade, tanto de geometrias quanto de dimensões referentes à seção transversal das barras, é bastante vasta. Além disso, o processo de dimensionamento de uma estrutura de aço se faz de forma iterativa, por tentativa e erro.

A redução do custo de um empreendimento é uma questão chave para que se possa não apenas trabalhar em condições técnicas viáveis, mas também econômicas. Para se obter a solução ideal, isto é, aquela em que o custo e, conseqüentemente, o peso forem mínimos e as restrições impostas não forem violadas, é bastante útil a aplicação de algum método computacional para reduzir o tempo dispendido na busca por esta resposta.

Para tratar desse tipo de problema, existe a alternativa da otimização estrutural, que está preocupada em obter a melhor resposta de uma dada operação enquanto satisfaz certas restrições (HAFTKA; GÜRDAL, 1992). Porém, para chegar até a solução otimizada do problema, não há apenas uma alternativa. Os métodos de otimização são numerosos e a natureza do problema que se deseja analisar pode invalidar a utilização de alguns deles. Dessa forma, neste trabalho será empregado o

algoritmo metaheurístico Harmony Search. O emprego deste algoritmo se deve à facilidade de tratar tanto de variáveis discretas como contínuas e à eficiência na busca pela melhor solução.

Portanto, o objetivo deste trabalho será desenvolver uma metodologia capaz de automatizar o dimensionamento de barras de estruturas treliçadas, respeitando os critérios e limites impostos na NBR 8800:2008, e executá-la para as situações específicas referentes às coberturas treliçadas de galpões metálicos que neste trabalho forem contempladas.

No capítulo 2, expõe-se as definições que caracterizam os galpões industriais e detalham pontos relevantes do funcionamento estrutural das treliças dos mesmos.

No capítulo 3, aborda-se a otimização estrutural, explicando sua ideia conceitual e forma de expressão matemática. Explicam-se os elementos que compõem o problema de otimização estrutural, assim como os métodos e os tipos de problema de otimização presentes na literatura.

No capítulo 4, detalha-se o algoritmo empregado no estudo, o Harmony Search. É apresentado o modelo de funcionamento do algoritmo e os passos necessários para sua operação.

No capítulo 5, as considerações gerais acerca do tipo de problema que será avaliado e quais as delimitações do estudo serão descritas. Nesta parte, serão colocados os critérios e procedimentos de obtenção dos carregamentos que foram contemplados neste estudo.

No capítulo 6, postula-se o problema de engenharia de forma detalhada e específica, levando em consideração todas as imposições necessárias para permitir a viabilidade do problema. Formula-se o problema de acordo com o formato escolhido para executar a otimização estrutural, definindo-se a função objetivo e as restrições do problema.

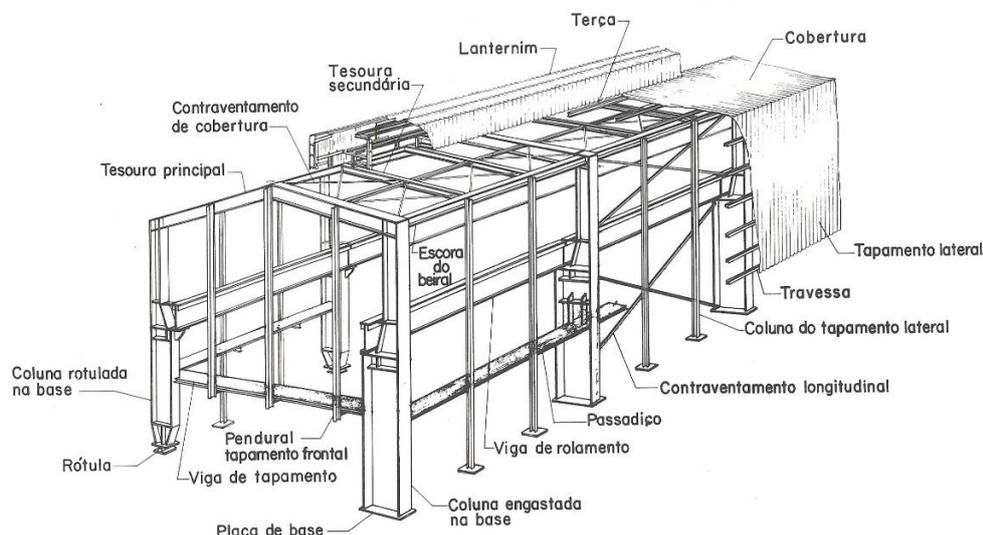
No capítulo 7, expõe-se os resultados, concomitantemente aos comentários.

No capítulo 8, são feitas as considerações finais, avaliando o trabalho desenvolvido e assinalando as possibilidades para futuros trabalhos.

2. Detalhes construtivos de galpões

Galpões são, em sua maioria, construções industriais de pavimento único, com a finalidade de fechar e cobrir vastas áreas, protegendo as instalações, os produtos armazenados ou, simplesmente, fornecendo abrigo às condições climáticas externas (CBCA, 2015). Esses edifícios destinam-se a diversos fins, como fábricas, almoxarifado, feiras, estádios, hangares, etc. No projeto de galpões industriais, devem ser considerados aspectos como: a disposição e dimensões dos equipamentos que serão abrigados, movimentação de cargas, circulação interna, iluminação natural e artificial, ventilação, condições e tipo de terreno, etc. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma estrutura típica de um galpão, com cada elemento designado por nomenclatura específica.

Figura 1– Esquema de galpão industrial com designação dos elementos estruturais de acabamento.
Fonte: Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas - Vol. 1 (1986).



Conforme a divisão presente no Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas - Vol. 1, 1986, os galpões podem ser agrupados em pórticos simples e pórticos múltiplos, no que diz respeito à estrutura principal, e de cobertura plana (horizontal ou inclinada), denteada (sheds) ou em arco.

O foco deste trabalho está no dimensionamento de tesouras de cobertura de pórticos simples, que são tema dos capítulos seguintes.

2.1. Pórticos Simples

Para o caso de recalques diferenciais acentuados na base ou rotações das fundações, é vantajoso o emprego de estruturas isostáticas. A Figura 2 mostra a relação dos sistemas isostáticos de pórticos de galpões e o comportamento deste tipo de estrutura quando sofre recalque e rotação. Observa-se neste caso que a geometria global da estrutura permanece igual depois dos deslocamentos.

Figura 2– Sistemas Isostáticos. Fonte: Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas - Vol. 1 (1986).

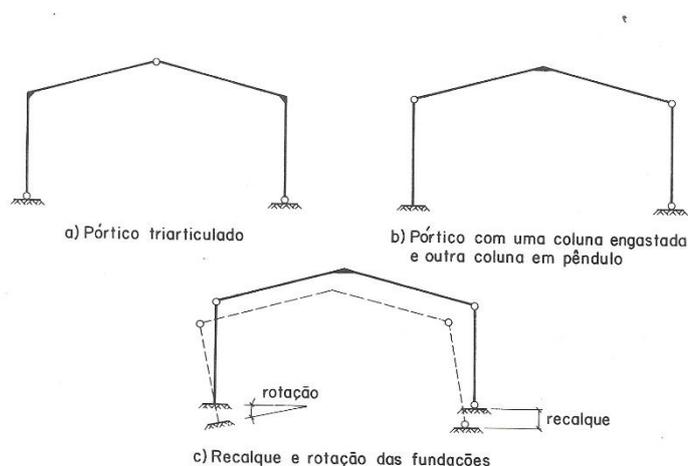
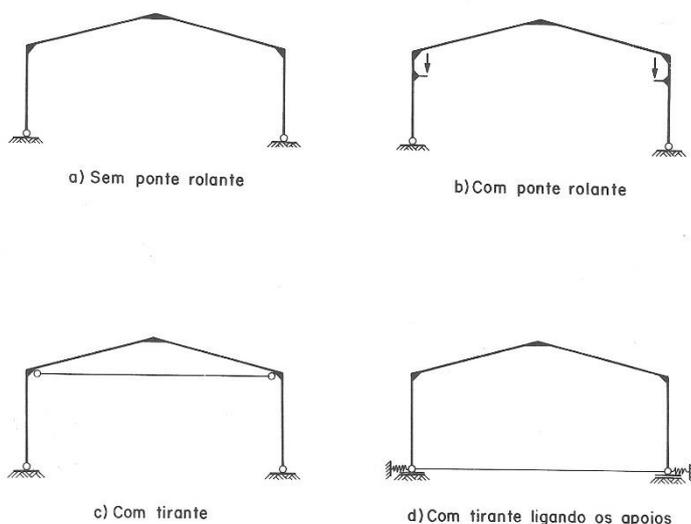


Figura 3 - Pórticos Birrotulados. Fonte: Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas - Vol. 1 (1986).



Conforme BELLEI (2010), a Tabela 1 estabelece os espaçamentos recomendados entre pórticos em função do vão livre do galpão.

Tabela 1– Limites referentes às dimensões dos vãos e seus respectivos espaçamentos.

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

Fonte: BELLEI (2010).

2.2. Tesouras

As tesouras são vigas principais da cobertura. São elas que recebem a ação permanente da cobertura por meio das terças, bem como as cargas acidentais decorrentes do vento, do acúmulo de pó, da água da chuva, etc. Normalmente, para efeito de cálculo, a soma das componentes acidentais resulta em um acréscimo de carga que varia entre 10 e 50 Kg/m².

A distância entre as tesouras é geralmente ditada pelos espaçamentos entre colunas na direção longitudinal do galpão, que dependem sobretudo da função a que

se destina o galpão. No caso de espaçamentos grandes entre colunas, torna-se uma solução mais econômica o uso de tesouras intermediárias, apoiadas em vigas longitudinais nos beirais, e às vezes também na cumeeira. O banzo inferior, ou no caso de tesouras de alma cheia, a mesa superior, deve ser preferencialmente projetada paralela à cobertura. A inclinação da cobertura é função do material empregado para cobrimento, ou do efeito estético que se deseja obter, respeitada a declividade mínima permitida para o material utilizado.

A tesoura treliçada é usualmente utilizada como viga bi apoiada, com banzo inferior horizontal. A Figura 4 indica algumas formas de tesouras treliçadas, sendo a trapezoidal a mais empregada.

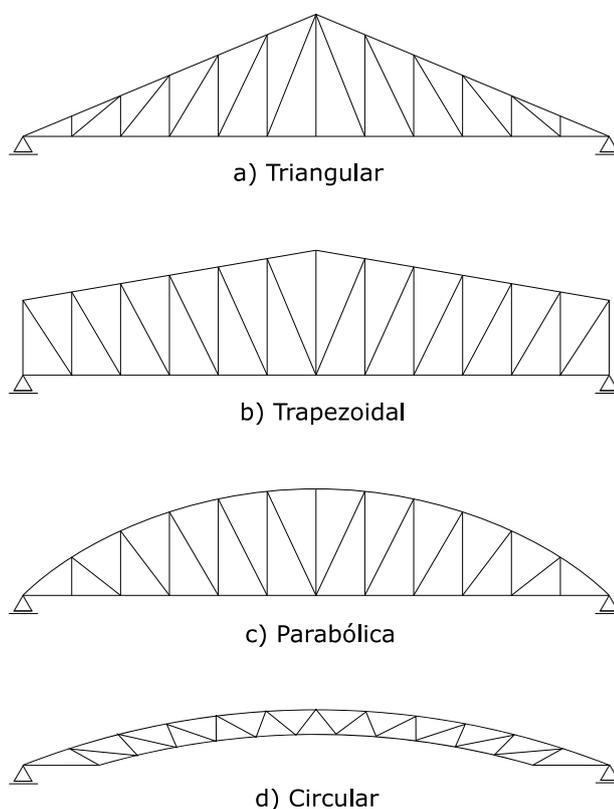


Figura 4 – Formas de coberturas treliçadas. Fonte: o autor.

A treliça triangular é utilizada em vãos pequenos devido ao fato de que o ângulo bastante agudo, junto aos apoios, provoca esforços elevados nas barras. Como vantagem, pode-se apontar seu baixo custo comparativamente aos outros sistemas de construção de galpões.

2.3. Contraventamento

Um dos elementos estabilizadores e que proporciona contraventamento para as tesouras são as terças. Sua função principal é servir de apoio às telhas. Os esforços que atuam nas terças são transferidos para as tesouras, que devido aos seus vãos, podem apresentar problemas de estabilidade lateral. Apoiando-se nas tesouras, as terças reduzem o comprimento de flambagem do banzo superior a um comprimento igual à distância entre terças. Para garantir a indeslocabilidade dos pontos de apoio das terças nas tesouras, é necessário prever contraventamento no plano da cobertura.

Nas tesouras treliçadas, rotuladas ou engastadas, deve-se considerar os efeitos de sucção do vento ou, se for o caso, os esforços de engastamento, pois é possível que ocorram problemas de instabilidade nos trechos comprimidos do banzo inferior, que não dispõem de contenção lateral das terças (Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas - Vol. 1, 1986), o que vale para o banzo superior também. Para que a tesoura seja dimensionada considerando-se estes efeitos, deverão ser tomadas medidas preventivas como, por exemplo, a utilização de terças com mão francesa ou de contraventamento do banzo que apresente problemas de instabilidade.

Considerando todos os elementos discutidos até agora, a Figura 5 apresenta a estrutura típica de um edifício baixo, do tipo galpão de vão simples, com os nomes e funções dos componentes estruturais esquematizados tridimensionalmente e atuando conjuntamente.

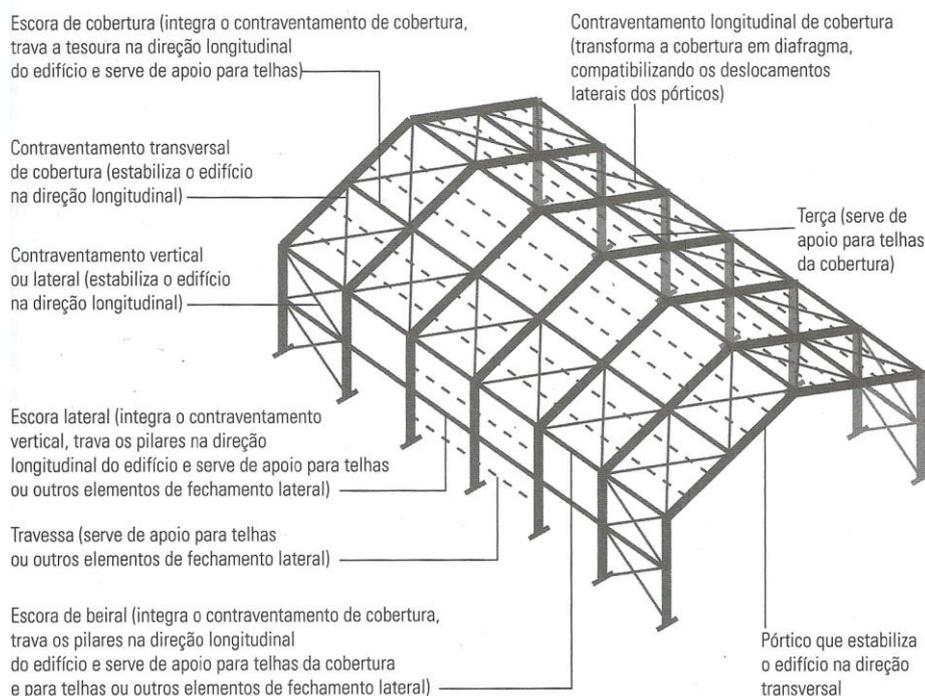


Figura 5- Esquema estrutural de galpão de vão simples. Fonte: FAKURY; SILVA; CALDAS (2016)

3. Otimização Estrutural

Objetivos de projeto que podem mensurar a qualidade do mesmo incluem custo mínimo de construção, peso mínimo e máxima rigidez, assim como outros tantos. Normalmente, o projeto é limitado por restrições como a escolha do material, deslocamentos, carregamentos, condições de apoio, tipo e tamanho disponíveis dos elementos estruturais e seções transversais, etc. Portanto, o projetista deve decidir quais parâmetros podem ser modificados durante o processo de otimização; esses parâmetros então se tornam as variáveis de otimização. É comum que problemas de otimização estrutural envolvam a procura do peso mínimo das estruturas. Este peso mínimo está sujeito a diversas restrições que dizem respeito a medidas de desempenho, tais como as tensões e deslocamentos, e também limitado por seções transversais ou dimensões de elementos estruturais mínimos. Se as variáveis de projeto podem ser variadas continuamente na otimização, o problema é classificado como “contínuo”, enquanto se as variáveis de projeto representam uma seleção de um conjunto de partes, o problema é considerado “discreto”.

3.1. Formulação matemática geral de um problema de otimização estrutural

Os seguintes elementos estão sempre presentes em uma otimização estrutural (CHRISTENSEN; KLARBRING, 2008):

- Função objetivo ($f(x)$): uma função usada para classificar projetos. Para todos os possíveis projetos, $f(x)$ retorna um número que indica a qualidade do projeto. Usualmente, [...] escolhemos $f(x)$ tal que um valor pequeno é melhor do que um grande (problema de minimização). Na otimização estrutural, $f(x)$ frequentemente mede o peso, deslocamento em uma determinada direção, tensão ou mesmo custo de produção.
- Variável de projeto (x): vetor que descreve o projeto e que pode ser alterado durante a otimização. Pode representar geometria ou escolha de material. Quando descreve a geometria, pode relacionar-se com uma interpolação sofisticada da forma ou pode ser simplesmente a área de uma barra.

O problema de otimização estrutural é o de selecionar valores ótimos para as variáveis de projeto de tal forma que a função objetivo especificada é minimizada e um grupo de restrições especificadas é satisfeita (KIRSCH, 1993).

A forma tradicional de otimização de uma função contínua é:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } f(x) \\ & \text{sujeita a } \quad g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & \quad \quad \quad h_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, p \end{aligned}$$

Onde $f(x)$ é a função objetivo, x é o vetor das variáveis de projeto, $g_i(x) \leq 0$ são as m restrições de desigualdade e $h_j(x) = 0$ as p restrições de igualdade.

A função objetivo que representará o problema de otimização será acrescida de penalidades para cada restrição violada. Com isso, o problema será minimizar apenas a função penalizada, convertendo um problema restrito em um completamente

não restrito (ROTHWELL, 2017). Assim, a função penalidade $F(x)$ será da seguinte forma:

$$F(x) = f(x) + r * \phi(x) \quad (1)$$

Onde:

$$f(x) = \sum_n \rho * L_n * A_n \quad (2)$$

Representa o peso total da estrutura. Seus termos são:

- $\rho = 78,6 \text{ KN}/\text{m}^3$ (massa específica do aço);
- L_n : comprimento da barra n da treliça;
- A_n : área da barra n da treliça

E

$$r * \phi(x) = r * \sum_{j=1}^m \{\max[0, g_j(x)]\}^2 \quad (3)$$

que é o termo de penalização. Seus componentes são:

- r : constante definida pelo usuário;
- $g_j(x)$: termo de penalização à função objetivo caso a restrição j imposta ao problema seja violada.

Conforme MOE e GISVOLD (1971), o processo de criação do projeto estrutural pode ser dividido em quatro estágios:

- a) *Formulação dos requisitos de funcionamento*: requerimentos que frequentemente são estabelecidos antes do processo de projeto. Exemplos de tais situações seriam definir o número necessário de longarinas em uma ponte ou o espaço necessário em uma construção industrial.
- b) *Projeto conceitual*: caracterizado pela habilidade, criatividade e julgamento crítico do projetista, é a parte crucial do processo de desenvolvimento do projeto. Esta parte lida com o planejamento geral de um sistema que serve para

sua finalidade funcional. Neste estágio, o projetista se depara com os maiores desafios, assim como chances de sucesso ou fracasso. Seleção da topologia geral e tipo de estrutura são algumas das decisões feitas pelo projetista no estágio do projeto conceitual.

- c) *Otimização*: dentro de um conceito selecionado, há inúmeras estruturas que satisfazem os requerimentos funcionais, e um procedimento de tentativa e erro deverá ser empregado para encontrar a melhor solução. A escolha da melhor geometria de uma treliça ou as seções transversais dos membros são exemplos de procedimentos de projetos otimizados. O computador é o mais adequado para executar essa parte do projeto, usando métodos de busca automatizada pelas soluções otimizadas. Portanto, otimização no contexto atual é um processo de projeto automatizado fornecendo os valores ótimos de certas variáveis de projeto.
- d) *Detalhamento*: Depois de completar o processo de otimização, os resultados obtidos devem ser conferidos. No estágio final do detalhamento, senso crítico e experiência são necessários.

Em geral, não é prático introduzir um programa automatizado que resolve todo o problema do projeto sem interação humana. Métodos de otimização são normalmente usados para resolver subproblemas específicos, e o campo do projeto automatizado é fortemente conectado com o projeto auxiliado de computador (KIRSCH, 1993).

3.1. Métodos de otimização

Os métodos de otimização estrutural podem ser convenientemente subdivididos em duas categorias diferentes chamadas métodos analíticos e métodos numéricos (KIRSCH, 1993):

Métodos Analíticos: são normalmente empregados usando a teoria matemática do Cálculo, métodos variacionais, etc., em estudos de [...] formas geométricas de elementos estruturais simples, como vigas, pilares e lajes. Esses métodos são mais adequados para estes estudos fundamentais de componentes

singulares das estruturas, mas não são indicados para lidar com sistemas estruturais maiores.

Métodos Numéricos: geralmente empregam um ramo no campo do cálculo numérico chamado programação matemática [..]. Um palpite inicial é usado como ponto de partida para uma busca sistemática por projetos melhores. A busca é encerrada quando certos critérios são satisfeitos, indicando que o projeto atual está suficientemente próximo do ótimo. Problemas resolvidos por métodos numéricos são chamados de problemas de otimização finita ou de problemas de otimização de parâmetros discretos. Isto é devido ao fato de que os problemas podem ser formulados por um número finito de variáveis. Atribuir valores numéricos para estas variáveis especifica uma estrutura única. Otimização de projeto de estruturas práticas é realizado principalmente pelo uso de formulações finitas.

3.2. Tipos de problemas de otimização

Quanto aos tipos de problemas de otimização estrutural, eles são divididos em três classes (CHRISTENSEN; KLARBRING, 2008):

- **Otimização de dimensões (*sizing optimization*):** é quando a variável de projeto assume formas que mudam as propriedades de rigidez do elemento, como a seção transversal de barras de treliça.
- **Otimização de forma (*shape optimization*):** problemas de otimização de forma empregam as variáveis que ditam a geometria do problema como as variáveis de projeto. Neste tipo de problema, a topologia permanece intacta.
- **Otimização topológica (*topological optimization*):** é um método matemático que otimiza o traçado do material dentro de um determinado espaço de projeto, para um determinado conjunto de cargas, condições de contorno e restrições com o objetivo de maximizar o desempenho do sistema. É diferente da otimização de forma e otimização de dimensões no sentido de que o projeto pode atingir qualquer forma dentro do espaço de projeto, em vez de lidar com configurações predefinidas.

Exemplos de cada classe de otimização são encontrados na Figura 6.

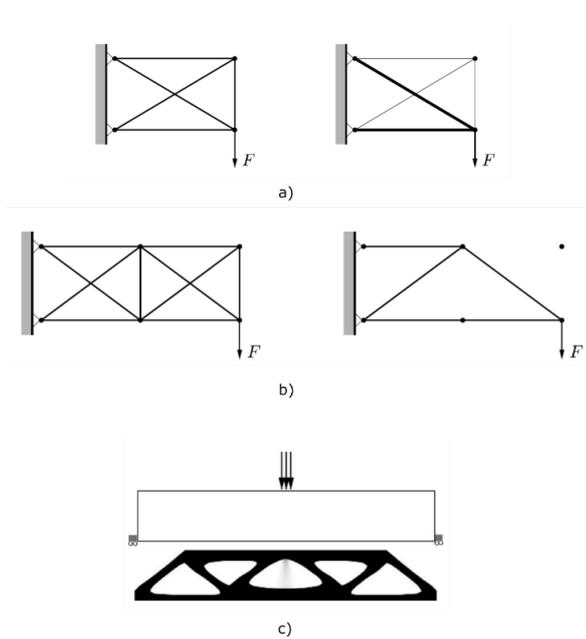


Figura 6– Exemplos de representações gráficas de cada classe de otimização estrutural. a) “*sizing*” b) topológica c) topológica (em meio contínuo). Fonte: CHRISTENSEN; KLARBRING (2008)

4. Algoritmo Harmony Search

O algoritmo computacional utilizado para otimizar as estruturas será o Harmony Search (HS). Este algoritmo tem como base para o seu funcionamento o processo de criação de melodias por um músico. A Figura 7 expressa graficamente esta ideia. Cada músico (variável de projeto), executa uma nota (valor que a variável de projeto recebe), dentre um conjunto de notas (grupo de todos os possíveis valores da variável de projeto), para compor a melodia de melhor sonoridade (encontrar a solução ótima da função objetivo).

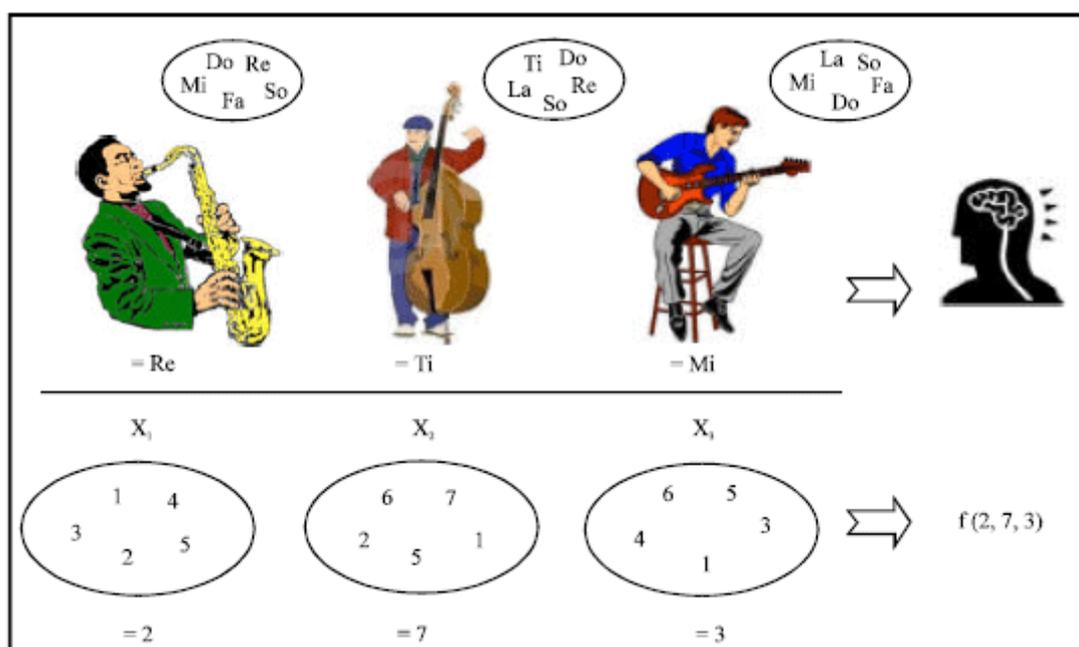


Figura 7– Analogia de referência do funcionamento do Harmony Search. Fonte: OLIVA et al. (2013)

O processo de operação do algoritmo pode ser descrito em quatro passos, conforme descritos à seguir (GEEM; KIM; LOGANATHAN, 2001):

1º passo: Inicialização

É inicialmente atribuído o número de variáveis discretas (D) e contínuas (C) que serão tratadas no problema. Considerando a função objetivo como $f(X_D, X_C)$, onde X_D e X_C são respectivamente os vetores de variáveis discretas e contínuas, com

cada variável discreta de projeto do vetor $X_D = \{x_1, x_2, \dots, x_D\}$ assumindo $K_D = \{k_1, k_2, \dots, k_D\}$ possíveis valores, e cada variável contínua de projeto do vetor $X_C = \{x_{D+1}, x_{D+2}, \dots, x_C\}$ variando conforme limites inferior e superior l e u $\{x_i \mid i = D + 1, D + 2, D + 3, \dots, C \text{ e } x_i^l \leq x_i \leq x_i^u\}$.

Os parâmetros do HS que são necessários para resolver o problema de otimização também são especificados neste passo. Estes incluem o *Harmony Memory Size* (HMS), *Harmony Memory Considering Rate* (HMCR), *Pitch Adjusting Rate* (PAR), e critério de parada (número de iterações do algoritmo ou de avaliações da função objetivo). O HMCR e o PAR são parâmetros que são utilizados para melhorar o vetor solução. Ambos estão definidos no segundo passo. Subsequentemente, a matriz do *Harmony Memory* (HM), que é a memória em que os vetores solução ficam armazenados, é gerada randomicamente a partir dos possíveis valores contínuos e discretos para as variáveis de projeto. O parâmetro HMS representa o número de vetores abrigados no HMS.

Figura 8– Matriz do Harmony Memory, que contém os valores dos “hms” vetores de “n” variáveis de projeto. Fonte: o autor.

$$\text{HM} = \left[\begin{array}{ccc|c} \mathbf{x}_1^1 & \cdots & \mathbf{x}_n^1 & \mathbf{f}(\mathbf{x}^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{x}_1^{\text{hms}} & \cdots & \mathbf{x}_n^{\text{hms}} & \mathbf{f}(\mathbf{x}^{\text{hms}}) \end{array} \right]$$

2º passo: Geração de um novo vetor

No algoritmo HS, um novo vetor $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_p)$ é improvisado a partir do HM gerado inicialmente ou de todo o intervalo possível de valores. O novo vetor procede de acordo com consideração da memória, ajustes de tom e randomização.

No processo de consideração da memória, o valor da primeira variável de projeto (x'_1) do novo vetor é escolhido entre qualquer valor do intervalo de HM

$\{x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{HMS}\}$. Valores das demais variáveis de projeto são escolhidos similarmente. Aqui, a possibilidade de um novo valor ser escolhido é indicado pelo parâmetro HMCR, que varia entre 0 e 1. O HMCR estabelece a taxa de escolha de um valor a partir do HM, e $(1-HMCR)$ define a taxa de escolher randomicamente um valor no intervalo inteiro possível (processo de randomização). Por exemplo, um HMCR de 0,90 indica que o algoritmo HS escolherá a o valor da variável de projeto de acordo com valores armazenados historicamente no HM com probabilidade de 90%, e do intervalo inteiro de valores possíveis com 10% de probabilidade.

Cada componente do novo vetor $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_p)$ é examinado para determinar se ele deve receber ajuste de tom usando o processo de ajuste de tom. Este procedimento usa o parâmetro PAR. Este processo é executado apenas após um valor ter sido escolhido do HM. O valor $(1-PAR)$ defini a taxa em que o valor permanece inalterado. Um PAR de 0,3 indica que o algoritmo escolherá um valor de vizinhança com $30\% \times HMCR$ de probabilidade. Se a decisão do algoritmo relativa ao ajuste de tom for “sim”, e x'_i assumido como $x'_i(l)$, o l -ésimo elemento de X_i , o valor com tom ajustado de $x'_i(l)$ é

$$x'_i \rightarrow x_i^l \leq x_i(l \pm rand(bw_D)) \leq x_i^u \text{ para variáveis de projeto discretas}$$

$$x'_i \rightarrow x_i^l \leq x_i + \alpha \leq x_i^u \text{ para variáveis de projeto contínuas} \quad (4)$$

Onde bw_D é a distância da largura de banda da variável discreta; α é o valor de $bw_C \times u(-1,1)$; bw_C é um valor arbitrário de distância de largura de banda para a variável contínua, e $u(-1,1)$ é uma distribuição uniforme entre -1 e 1. Nota-se que o HMCR e o PAR introduzidos no algoritmo o ajudam a encontrar ótimos globais e locais. Um esquema do funcionamento deste passo é apresentado na Figura 9.

3º passo: Avaliação do novo vetor e atualização do HM

O novo vetor improvisado no passo 2 é analisado, e sua aptidão é determinada usando uma estratégia de rejeição de acordo com as restrições. Se o novo vetor solução é melhor que o pior vetor solução armazenado no HM, em termos de valor da função objetivo, o novo vetor é incluso no HM e o pior vetor existente nele é excluído.

4º passo: Repetir os passos 2 e 3

Os cálculos terminam quando o critério de parada é satisfeito. Caso contrário, os passos 2 e 3 são repetidos.

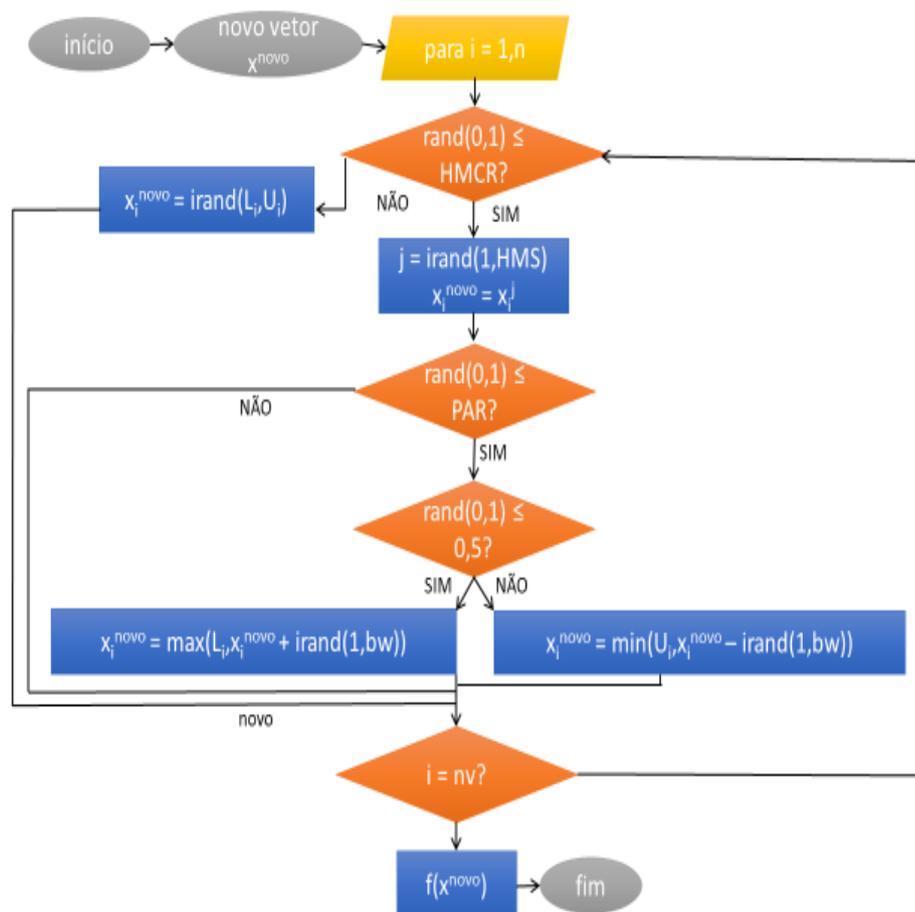


Figura 9– Fluxograma de geração de novos vetores (3º passo) L_i e U_i referem-se aos limites inferiores da variável de projeto i . Fonte: o autor.

5. Definições da análise do problema

A análise deste trabalho se baseará na cobertura treliçada trapezoidal com carregamentos nodais verticais, comprimento de vão " l ", distância entre pórticos " b ", e alturas dos montantes de extremidade e central " h_1 " e " h_2 " respectivamente, conforme esquematizado na Figura 10.

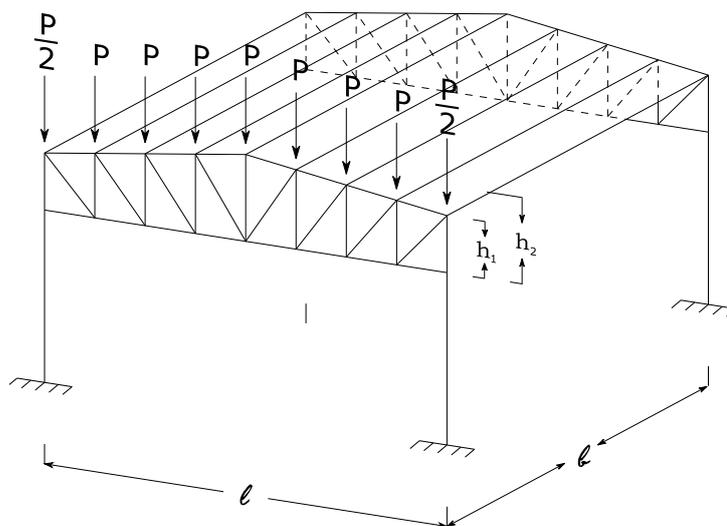


Figura 10– Esquema simplificado do problema de otimização proposto para análise. Fonte: o autor.

A seção transversal das barras desta treliça será composta por perfis cantoneira de abas iguais "T" em disposição geométrica de acordo com a Figura 11. Esta seção foi escolhida

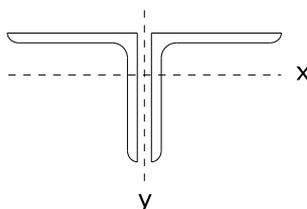


Figura 11 – Aspecto geométrico da seção transversal das barras de treliça. Fonte: o autor.

A lista de cantoneiras utilizada foi retirada da 15ª edição do Manual de Construções de Aço da *American Institute of Steel Construction* (AISC), e totalizam 61 seções transversais diferentes.

O aço considerado para esta análise é da classe MR 250, da categoria de perfis laminados para uso estrutural, que é o caso dos perfis L considerados neste estudo. Esse material tem como propriedades mecânicas resistência ao escoamento $f_y = 250 \text{ MPa}$, resistência à ruptura $f_u = 400 \text{ MPa}$ e módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ MPa}$.

A carga relativa ao peso próprio de cada barra da treliça foi distribuída igualmente aos nós conectados pela barra (Figura 13).

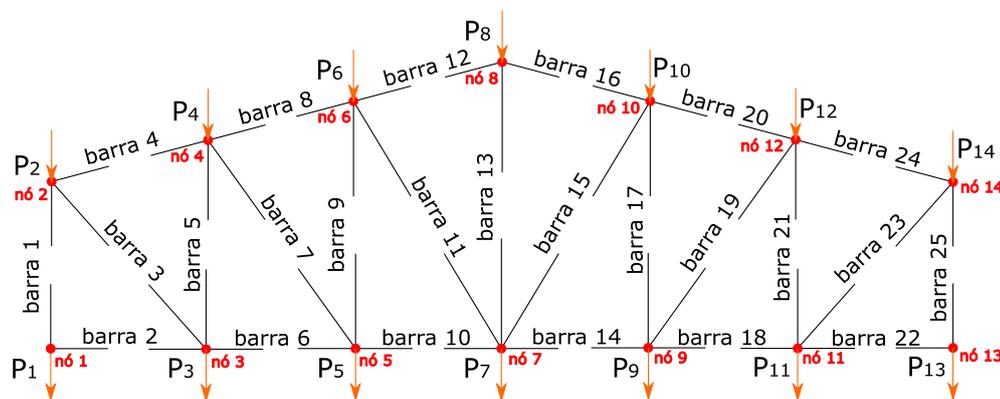


Figura 12 – Esquema de distribuição do peso próprio da estrutura. Fonte: o autor

Assim, a solicitação devido ao peso próprio para cada nó é:

$$P_j = \rho_{aço} * \sum_1^{n_{barras}} A_i * \frac{l_i}{2} * \varphi(i, j) \quad (5)$$

Onde:

j : número do nó da estrutura, $j = \{1, 2, \dots, n_{nós}\}$;

i : número da barra da estrutura, $i = \{1, 2, \dots, n_{barras}\}$;

l_i : comprimento da barra i ;

A_i : área da seção transversal da barra i ;

$\varphi(i,j)$: termo que assume valor 1 caso a barra i seja conectada ao nó j ; caso contrário, assume valor 0;

$\rho_{aço}$: peso específico do aço, $7800 \frac{kg}{m^3}$.

A Figura esquematiza a divisão das áreas de influência da cobertura e a limitação do comprimento das terças a ser considerado para o cálculo das cargas nodais.

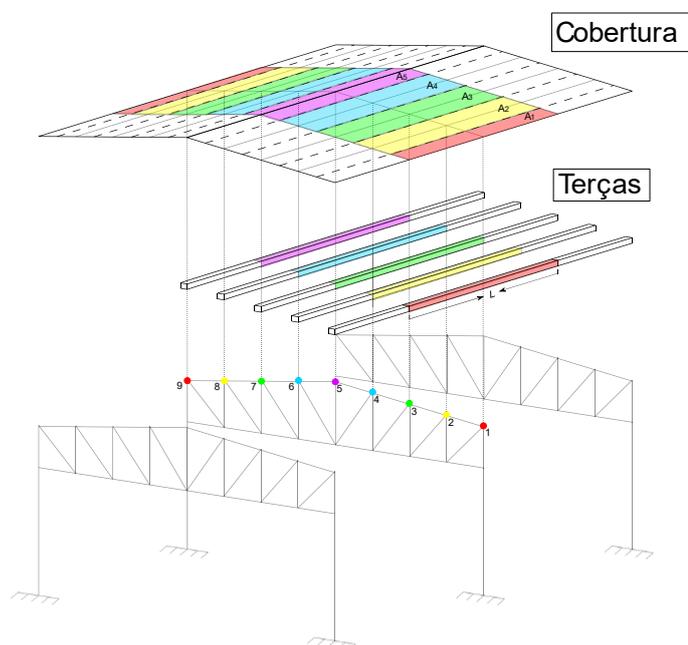


Figura 13 – Considerações acerca da cobertura e das terças para o cálculo das cargas nodais. Fonte: o autor.

A carga da cobertura e das terças será calculada, para cada nó n , da seguinte forma:

$$P_{n,cob} = \gamma_{cobertura} * A_n \quad (6)$$

$$P_{n,ter} = \gamma_{ter} * L \quad (7)$$

onde:

$P_{n,cob}$ [KN] : contribuição de carga no nó n devido ao peso da cobertura;

$\gamma_{cobertura}$ [KN/m²] : densidade de área das telhas;

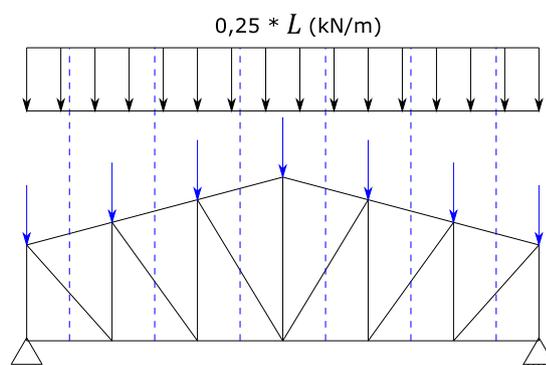
$A_n [m^2]$: área de influência referente ao nó n ;

$P_{n,ter} [KN]$: contribuição de carga no nó n devido ao peso da terça;

$\gamma_{ter} [KN/m]$: densidade linear das terças;

$L [m]$: comprimento de influência da terça para o nó n .

Foi adotado valor de sobrecarga igual a $0,25 \text{ KN/m}^2$, atuando na projeção horizontal da cobertura. Este valor é o mínimo exigido pela NBR 8800:2008 na ausência de especificação mais rigorosa. A obtenção das cargas nodais oriundas da sobrecarga se fez de forma análoga ao método utilizado para o peso pr



A carga devido ao vento foi calculada de acordo com a NBR 6123:2013. A caracterização completa de todos os fatores que influenciam a obtenção de valor numérico para a pressão do vento na estrutura ainda será discutida. Porém, os passos necessários para efetuar esse cálculo, no que diz respeito à ação do vento na cobertura, são: determinação da velocidade característica (V_k) do vento; da pressão dinâmica (q); do coeficiente de pressão externa (C_e) em função do ângulo de inclinação da cobertura θ para ventos de direção 0° e 90° , conforme a Tabela 5 da NBR 6123; do coeficiente de pressão interna C_{pi} , que, para o caso mais usual (duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis), são adotados os valores $0,2$ e $-0,3$. Por fim, faz-se a combinação, para obtenção dos casos críticos tanto de pressão positiva quanto de pressão negativa, de C_e e C_{pi} (Figura 12).

Assim, o valor a ser obtido de pressão devido à ação do vento na cobertura e suas resultantes nos nós da treliça, para cada coeficiente distinto, será, respectivamente:

$$Q_{vento} = C * q * b \quad (8)$$

$$P_{n,vento} = Q_{vento} * \sum_i^{n_{barras}} \frac{1}{1000} * \frac{l_{i,banzo superior(n)}}{2} \quad (9)$$

onde:

C : coeficiente obtido através das combinações de C_e e C_{pi} ;

$q[N/m^2]$: pressão dinâmica do vento;

$b [m]$: distância entre pórticos.

$Q_{vento} [N/m]$: carga do vento atuante perpendicularmente à água do telhado na direção do banzo superior;

$l_{i,banzo superior(n)}$: comprimento de cada barra i do banzo superior que se encontra dentro da área de influência do nó n ;

$P_{n,vento} [KN]$: carga atuante no nó n devido ao vento.

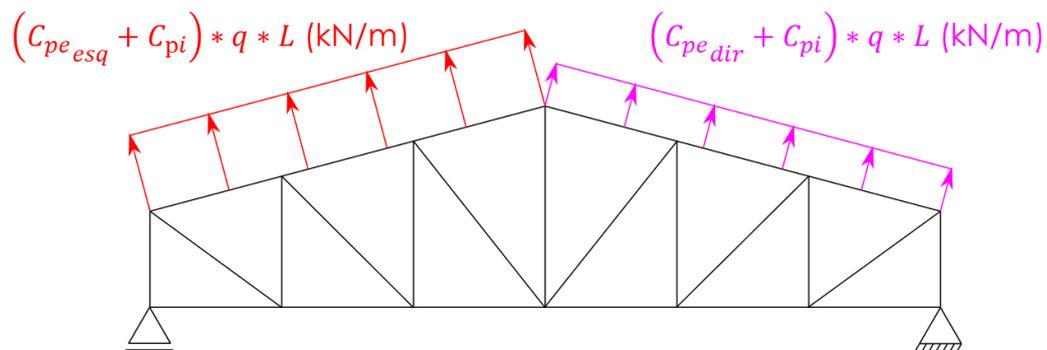


Figura 12 – Consideração de carga de vento na estrutura de treliça. Fonte: o autor

Os problemas que serão analisados possuem em comum características e particularidades essenciais para a descrição plena destes. Essas definições são: contraventamento horizontal para cada nó dos banzos inferior e superior, de forma que o comprimento de todas as barras equivalha ao comprimento medido entre nós consecutivos nestas regiões (Figura 13); coeficiente de flambagem $K = 1$, para a consideração de barras bi-rotuladas conforme Tabela E.1 da NBR 8800:2008; galpão

sem aberturas na região de cobertura; treliças isostáticas apenas; análises referentes às treliças localizadas no interior do galpão, onde as cargas atuantes são mais elevadas; consideração de barras de seções exclusivamente “T”; geometria das treliças exclusivamente trapezoidal; não consideração dos esforços devido à dilatação térmica; e diretrizes de cálculo seguindo as prescrições da NBR 8800:2008 para barras submetidas somente a esforços de tração e de compressão.

As ligações entre as treliças, para formar o perfil 2L, assim como as ligações entre barras, não foram contempladas neste trabalho, e portanto, a influência desta simplificação na resistência e custo da estrutura não foi mensurada. A construtibilidade das soluções, por consequência desta simplificação, também foi ignorada no processo de otimização.

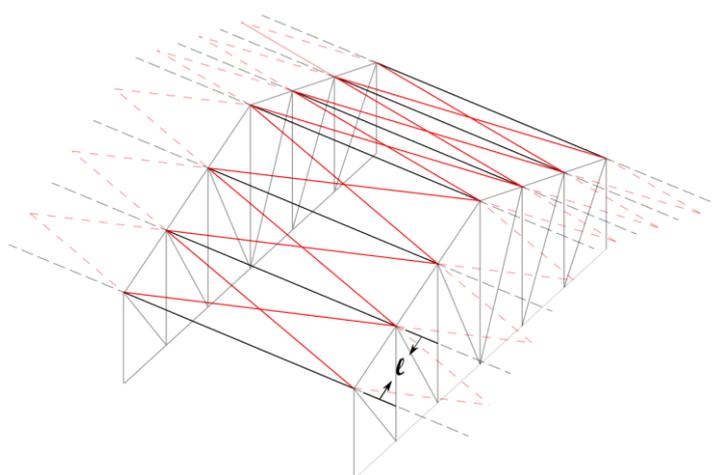


Figura 13 – Consideração de contraventamento das treliças estudadas. Fonte: o autor.

6. Descrição do problema de engenharia como um problema de otimização

A treliça selecionada para efetuar a otimização foi retirada do livro “Estruturas Metálicas – Cálculos, detalhes, exercícios e projetos” de Antônio Carlos da Fonseca Bragança Pinheiro. Os detalhes construtivos iniciais utilizados para calcular as cargas da estrutura consideraram ângulo de inclinação de 15° do banzo superior; construção permeável, de acordo com os critérios de permeabilidade da NBR 6123:2013; rugosidade do local = 4; local de construção: cidade de Manaus; pé direito de 5 metros; altura z para cálculo do fator S2 igual a 10 metros; distância de 6 metros entre treliças consecutivas; e comprimento do banzo inferior = 20 metros. A geometria do problema está esquematizada abaixo:

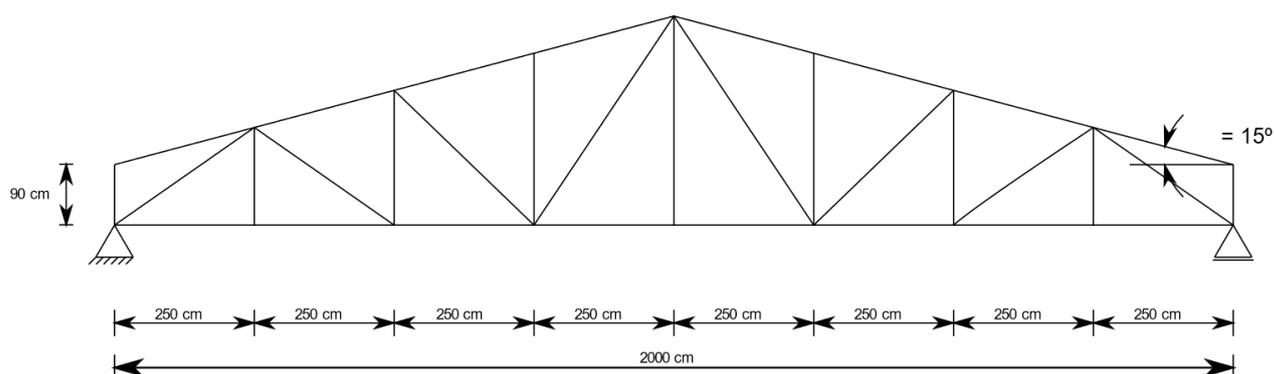


Figura 14 – Geometria inicial da treliça avaliada no problema de otimização. Fonte: o autor.

A função objetivo deste problema é composta pelo peso total da estrutura, acrescida por um termo de penalização devido à possibilidade de violação das restrições impostas ao problema. Assim, o problema de otimização para os casos tratados neste trabalho equivale a:

$$\text{Minimizar } f_p(X) = f(X) + \alpha \sum_{i=1}^n (1 + g_i(X))^{k_i} * H(g_i(X)), \text{ com } X = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}^T \quad (10)$$

$$f(X) = \sum_i^{n_{barras}} A_i(X) * l_i * \rho_{aço}, \quad \text{com } X = [x_1, x_2, x_3, x_4] \quad (11)$$

onde:

- $f(X)$: função objetivo;
- x_1, x_2, x_3, x_4 : índices que variam de 1 a 61 (número total de seções transversais iguais de dupla cantoneira em “T” de acordo com tabela da AISC, como mencionado na seção 5), para os quais cada número representa uma seção transversal de dimensões distintas. A ordem dos índices diz respeito à discretização da estrutura proposta pelo autor (banzo superior, banzo inferior, diagonal e montante, respectivamente);
- $A_i(X)$: Área da seção transversal correspondente a barra i ;
- l_i : comprimento de cada barra i ;
- $\rho_{aço} = 78,6 \text{ KN}/\text{m}^3$ (massa específica do aço);
- $f_p(X)$: função objetivo com os termos de penalização oriundos das restrições impostas para o problema; α é uma constante de ponderação da função objetivo, k_i é o valor do expoente da i -ésima penalidade, $g_i(X)$ é o valor da restrição i e $H(g_i(X))$ é a função Heaviside, cujo valor é 0 para $g_i(X) < 0$ ou 1 no caso de valores acima de 1. O termo X é o vetor das variáveis de projeto. O problema foi avaliado com $\alpha = 1,75$ e $k_i = 2$.

O modelo gráfico da discretização utilizada no trabalho está representado na Figura 15.

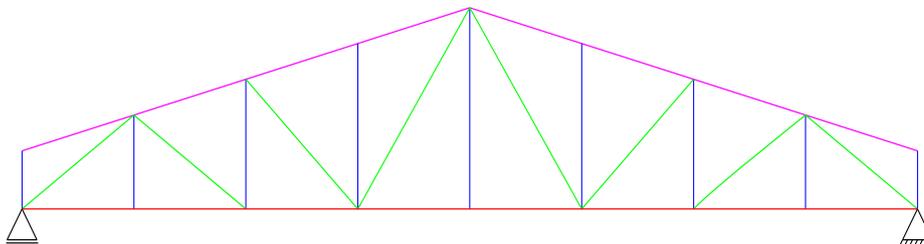


Figura 15 – Modelo de discretização utilizado no trabalho. Divisão da estrutura: banzo superior (rosa), banzo inferior (vermelho), montante (azul) e diagonais (verde). Fonte: o autor.

As restrições que foram impostas derivam das imposições da NBR 8800:2008, e referem-se à resistência e esbeltez das barras, assim como ao deslocamento vertical máximo do banzo inferior da treliça:

- **Resistência:** na compressão, o limite será a força axial crítica de flambagem ($N_{c,Rd}$). Na tração, o limite será a força axial de tração resistente de cálculo ($N_{t,Rd}$). Ambos os limites são calculados conforme as prescrições do capítulo 5 da NBR 8800:2008.

$$g_1 = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} - 1 \quad (\text{elementos tracionados}) \quad (12)$$

$$g_1 = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} - 1 \quad (\text{elementos comprimidos}) \quad (13)$$

- **Esbeltez:** na tração, o limite será $L/r_{\min} \leq 300$, onde L é o comprimento da barra e r_{\min} o raio de giração mínimo da seção composta. Para a compressão, o limite será $L/r_{\min} \leq 200$. Estas definições constam na NBR 8800: 2008, capítulo 5.

$$g_2 = \frac{L}{r_{\min}} - 300 \quad (\text{elementos tracionados}) \quad (14)$$

$$g_2 = \frac{L}{r_{\min}} - 200 \quad (\text{elementos comprimidos}) \quad (15)$$

- **Deslocamento:** será utilizado o limite prescrito na NBR 8800: 2008 de $L/250$ (tabela C.1 do Anexo C) para vigas de cobertura, onde L é a dimensão do vão do pórtico.

$$g_3 = \text{MAX}(\delta) * \frac{250}{L} - 1 \quad (16)$$

onde δ é o deslocamento vertical de maior magnitude dentre os nós da estrutura.

O carregamento da estrutura levou em consideração: a carga do peso próprio da estrutura, composto pela combinação de treliça, terças e telhas; a sobrecarga, de valor 0,25 kN/m² (valor mínimo estipulado pela NBR 8800:2008), aplicada na projeção horizontal da cobertura e a carga de vento, levando em consideração os detalhes

construtivos mencionados anteriormente. Isto ficou expresso pelas seguintes equações, para cada nó:

$$P_{n,x} = P_{n,V} * \text{sen}(\theta) \quad (17)$$

$$P_{n,y} = c_{PP} * P_{n,PP} + c_{SC} * P_{n,SC} + c_V * P_{n,V} * \text{cos}(\theta) \quad (18)$$

onde:

$P_{n,x}$: carga pontual aplicada no nó n , na direção x ;

$P_{n,y}$: carga pontual aplicada no nó n , na direção y ;

$P_{n,PP}$: carga no nó n devido ao peso próprio;

c_{PP} : coeficiente de ponderação da carga devido ao peso próprio;

$P_{n,SC}$: carga no nó n devido à sobrecarga;

c_{SC} : coeficiente de ponderação da carga devido à sobrecarga;

$P_{n,V}$: carga no nó n devido ao vento;

c_V : coeficiente de ponderação da carga devido ao vento;

θ : ângulo de inclinação do banzo superior.

Os coeficientes c_{PP} , c_{SC} e c_V foram obtidos através da NBR 8800:2008, considerando os valores de coeficientes de ponderação de ações permanentes (γ_g) e variáveis (γ_q) da Tabela 1 — “Valores dos coeficientes de ponderação das ações” e do fator de combinação de ações variáveis ψ_0 da Tabela 2, para o caso de Combinações Últimas Normais. Assim, foram estabelecidas combinações diferentes para cada ação variável ocupando o posto de principal. A composição final pode ser expressa para este problema em particular como:

$$F_d = \gamma_g * F_{g,k} + \gamma_{q1} * F_{Q1,k} + \gamma_{q2} * \psi_0 * F_{Q2,k} \quad (19)$$

Assim, no primeiro caso, considerando a carga de vento de máxima sucção ($V_{sucção}$) como a variável principal, a combinação mais desfavorável fica:

$$P_{n,d} = 1,00 * P_{n,PP} + 1,4 * P_{V,sucção} \quad (20)$$

No segundo caso, na consideração das cargas descendentes mais elevadas, é feita a composição de cargas considerando a sobrecarga ($P_{sobrecarga}$) como a ação variável principal:

$$P_{n,d} = 1,25 * P_{n,PP} + 1,5 * P_{sobrecarga} \quad (21)$$

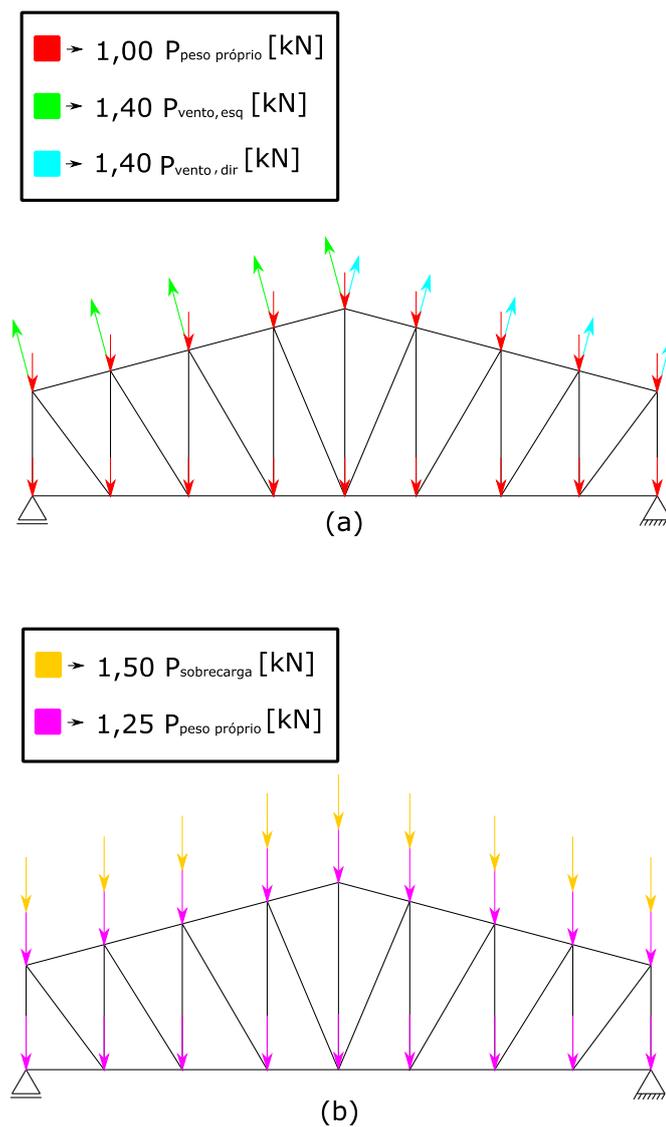


Figura 16 – a) combinação de cargas correspondentes à "sucção" b) combinação de cargas correspondentes à "sobrepessão". Fonte: o autor.

De forma sistemática, a operação completa do problema de otimização foi sequenciado conforme a Figura 17. A inicialização, isto é, a parte do programa em que o código é lido somente uma vez, compreende os primeiros quatro passos. Os demais são executados tantas vezes quanto for estabelecido pelo critério de parada.



Figura 17 – Sequência dos passos executados pelo programa no processo de otimização. Fonte: o autor

7. Resultados

Os resultados obtidos consideraram, para todas as análises, barras formadas por dupla cantoneira em forma de “T”. Assim, é importante ressaltar que a estrutura mais leve possível se limita, no caso deste estudo, a barras com o dobro de peso de uma cantoneira unitária de mesma seção. Porém, o intuito deste trabalho é o de avaliar a qualidade do algoritmo Harmony Search na otimização estrutural de treliças metálicas, o que independe da seção da barra.

Para cada item de cada caso analisado, foram executados 10 vezes o programa de otimização. Cada caso analisado teve apenas um de seus parâmetros de projeto variados de cada vez, mantendo os demais constantes. O número total de avaliações da função objetivo (AF) estabelecido para cada uma das execuções foi 3.000. A validação, que consiste em testar todos os casos para chegar ao menor valor possível de peso da estrutura dentro das restrições impostas, terá seu processo completo omitido, já que para cada caso, foram necessários testar 61^4 possibilidades. Os parâmetros de entrada do algoritmo utilizados durante todo o trabalho foram: números máximos de 65.000 iterações e 3.000 avaliações da função objetivo; HMS = 24, que é o número de vetores armazenado na memória do programa; HMCR = 0,95; PAR = 0,2 e bw = 3. O critério de parada escolhido foi o de atingir a totalidade do número de execuções estabelecidos para a função objetivo.

O programa desenvolvido para este trabalho foi escrito em linguagem FORTRAN. Todas as subrotinas relacionadas à montagem da estrutura, à atribuição das cargas de vento, de sobrecarga e de peso próprio, à montagem da matriz de rigidez para cálculo dos esforços nas barras e sua ligação com as demais subrotinas foram elaboradas exclusivamente pelo autor. Entretanto, o algoritmo utilizado neste trabalho teve como base a versão programada por DE ALMEIDA (2016). O trabalho do autor com relação ao algoritmo foi o de fazer a comunicação deste com o restante do programa.

O número de nós da treliça é gerado pelo código do programa através do número de divisões do banzo inferior, e assim, seria possível realizar a otimização considerando. O programa ainda permite trabalhar com a variação do ângulo superior, das dimensões em planta do galpão, da distância longitudinal entre treliças

consecutivas e da altura do montante de extremidade. Entretanto, neste estudo, estes componentes foram apenas estudados somente como parâmetros fixos, pois foi dada preferência neste estudo de fazer a otimização de tamanho (*sizing optimization*) das seções transversais das barras somente. O programa deste trabalho, entretanto, foi escrito para construir apenas três topologias diferentes (Figura 18).

7.1. Treliça com vão de 20 metros

Para as avaliações deste trabalho, A variável “L” será tomada, como a dimensão total do vão do banzo inferior. Foram testadas três topologias diferentes, cujas configurações geométricas estão representadas na Figura 18.

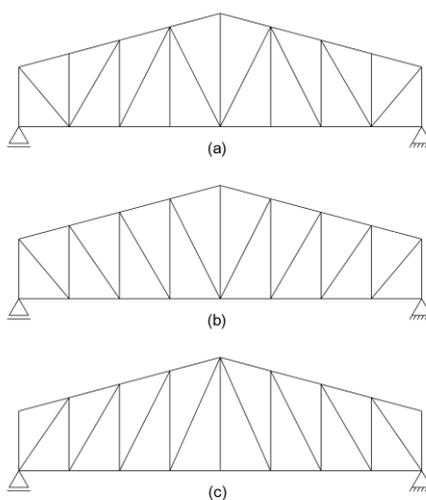


Figura 18 – a) Topologia 1; b) Topologia 2; c) Topologia 3. Fonte: o autor.

7.1.1. Topologia 1

Neste caso, foi testado a topologia 1, com vão do banzo inferior $L = 20$ metros. Fazendo o teste de validação, onde todas as possibilidades são verificadas, obteve-se como menor valor possível 7,560 kN para o peso total da estrutura. Vê-se através da Figura 19 que, das 10 execuções, apenas uma não alcançou o menor peso possível (execução 4, 7,918 kN), tendo esta resposta 4,73% de massa a mais. Para a solução ótima, a área transversal das barras do banzo superior e dos montantes foi a seção L64X64X4.8, enquanto a do banzo inferior e das diagonais foram L51X51X3.2 e L76X76X4.8, respectivamente. A Tabela 2 relaciona o número, em ordem crescente, da avaliação da função objetivo e a quantidade de execuções que nesta avaliação foram capazes de alcançar o peso mínimo.

Tabela 2 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 1. Fonte: o autor

		Topologia 1 L = 20m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	3	3	4	6	7	9

A execução que convergiu mais rapidamente ao resultado desejado o fez em 417/3.000 (13,9% do total) avaliações da função objetivo, enquanto que a mais demorada, desconsiderando a que não convergiu, o fez em 2882 (96,1% do total) das avaliações. Se analisado de 1.000 em 1.000 avaliações, o crescimento foi constante de 3 novas execuções bem-sucedidas a cada milhar de avaliações. A curva da média de todas execuções se encontra na Figura 20.

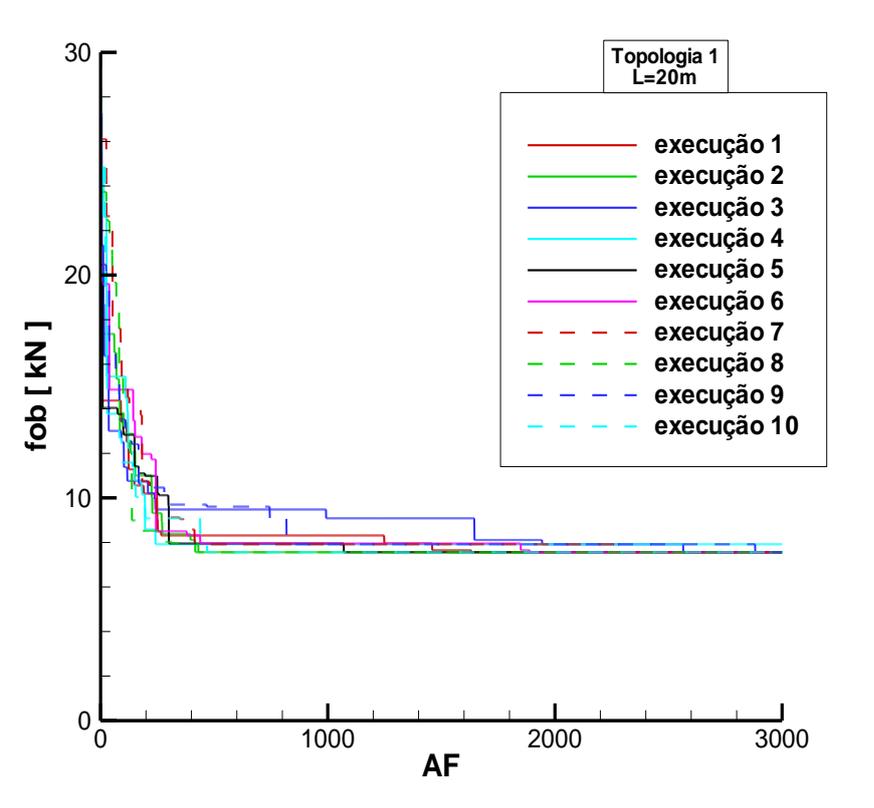


Figura 19 – Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 1. Fonte: o autor

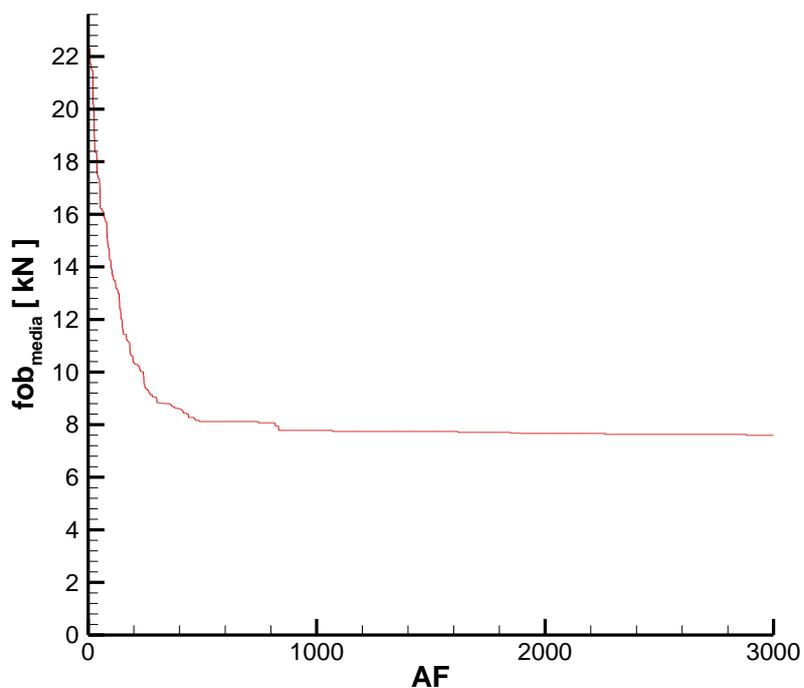


Figura 20 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 1. Fonte: o autor

7.1.2. Topologia 2

Neste caso, o mínimo absoluto possível, após teste de validação, revelou-se como 6,892 kN. Para este caso também, o algoritmo falhou em encontrar este valor apenas uma vez (execução 9, 8,073 kN), com variação percentual de 17,1%. Estes resultados se encontram na Figura 21. A curva da média de todas as execuções se encontra expressa na Figura 22. As seções transversais das barras da solução ótima são L64X64X4.8 para as barras do banzo superior, diagonal e montante, e L51X51X3.2 para as barras do banzo inferior.

O avanço mais rápido, em termos de número de avaliações da função objetivo necessárias para se chegar a 6,892 kN, aconteceu na execução 10, que precisou de 348 avaliações para obter este valor. Em contrapartida, a execução 6 precisou de 2039 avaliações para chegar no mesmo valor. É válido ressaltar que este valor considera apenas os casos que convergiram, já que a execução 9 falhou em convergir para o mínimo absoluto da função objetivo deste caso. Mesmo falhando, a nona execução seria uma alternativa possível, já que este valor não sofreu acréscimos de penalização na função objetivo.

Este problema, embora com a mesma taxa de sucesso do caso anterior (9 de 10 funções objetivo chegando ao peso mínimo), teve um desempenho melhor no que diz respeito à velocidade de convergência dos casos satisfatórios (2039 execuções contra 2882 no caso anterior), como também é possível identificar pela Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 2. Fonte: o autor

		Topologia 2 L = 20m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	3	5	6	8	9	9

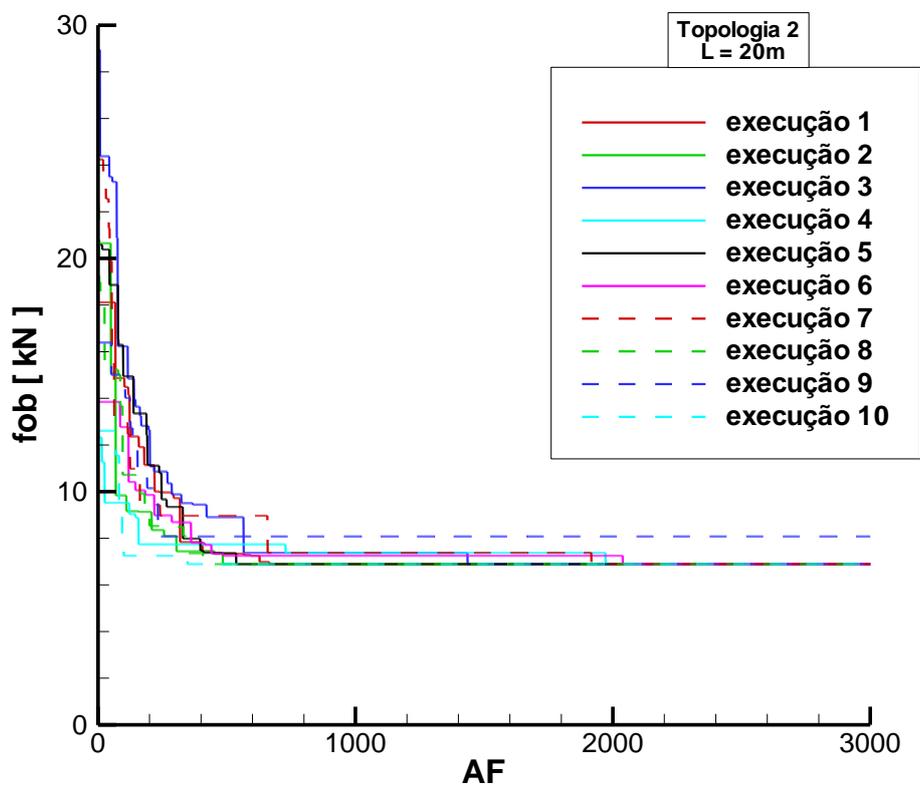


Figura 21 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 2. Fonte: o autor

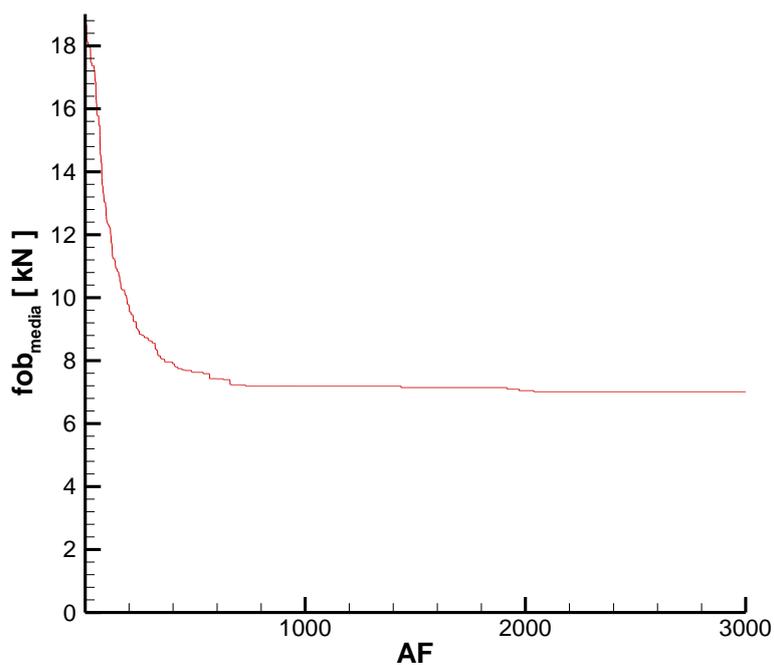


Figura 22 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 2. Fonte: o autor

7.1.3. Topologia 3

Para este caso, a estrutura mais leve resultou em 7,754 kN, com mesma composição de seções transversais ótimas das barras do caso 1. Para este caso também, apenas uma execução do programa não foi capaz de chegar ao valor mínimo (execução 10, 8,112 kN), com variação percentual em relação à melhor resposta de 4,61%. O gráfico com a curva de cada execução se encontra na Figura 23, e na Figura 24 se encontra a curva da média das 10 execuções do programa.

A execução que chegou mais rapidamente ao menor valor possível atingiu 7,754 kN em 273 avaliações da função objetivo, ao passo que a mais demorada levou 1306 avaliações para chegar ao mesmo valor. Entretanto, observa-se que oito das nove execuções encontraram a solução ótima em até 1.000 avaliações, com apenas uma desta no intervalo entre 500 e 1000 avaliações. Sendo assim, sete das nove execuções bem-sucedidas chegaram ao resultado ideal em até 500 avaliações da função objetivo, o que representa uma velocidade consideravelmente superior aos casos 1 e 2.

Comparativamente às outras topologias, esta teve seu peso ótimo convergido mais rapidamente, em média, com todas as execuções que nele chegaram o fazendo em menos de 1500 execuções (Tabela 4).

Tabela 4 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 3. Fonte: o autor

		Topologia 3 L = 20m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	7	8	9	9	9	9

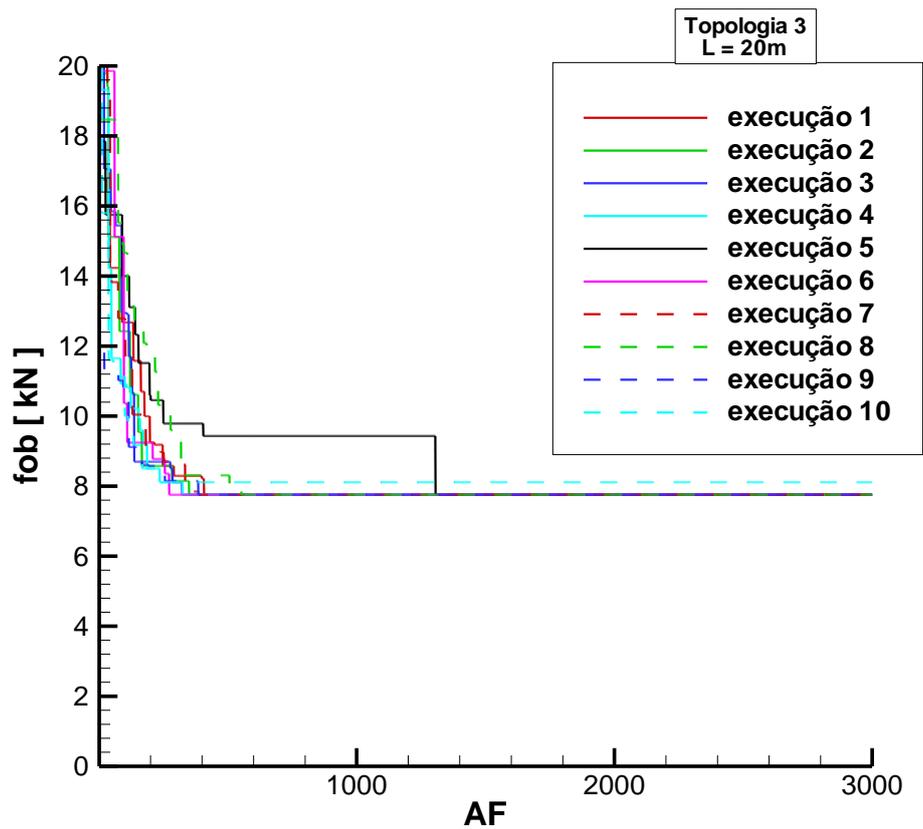


Figura 23 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 3. Fonte: o autor

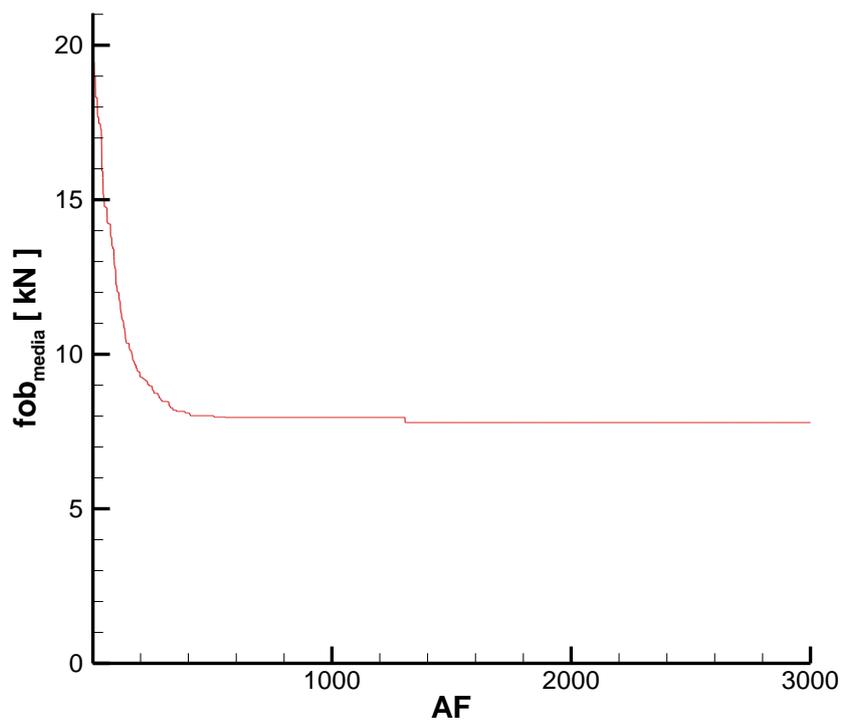


Figura 24 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 3. Fonte: o autor

7.2. Treliça com vão de 30 metros

Para os casos da seção 7.2, a análise efetuada na seção 7.1 é mantida. O vão do banzo inferior, entretanto, sofre um acréscimo de 10 metros, enquanto os demais parâmetros de projeto são mantidos constantes, com exceção do comprimento longitudinal do galpão, que é aumentado de 30 para 45 metros, tornando as dimensões em planta de 20x30 para 30x45 metros.

7.2.1. Topologia 1

Através do teste de validação, a estrutura mais leve para o caso 7.2.1 encontrada possui peso de 20,307 kN. Após utilização do programa para achar a estrutura mais leve, apenas metade conseguiu encontrar 20,307 kN como valor ótimo ao final das 3.000 avaliações. Entretanto, os resultados quase-ótimos foram bastante próximos do mínimo, com 4 execuções chegando a 20,3126 kN (variação percentual de 0,025%) e uma alcançando até o final 20,4684 kN (variação percentual de 0,79%). Portanto, é possível dizer que, mesmo o algoritmo alcançando o mínimo absoluto apenas na metade das execuções, a proximidade das outras soluções sugere alta capacidade do mesmo em gerar composições estruturais de peso bastante semelhante para o caso em questão.

A composição de seções transversais das barras de treliça para o valor ótimo foi: L89X89X6.4 (banzo superior), L64X64X4.8 (banzo inferior) e L102X102X6.4 (diagonal e montante). A execução de mais rápida convergência ao ótimo chegou em 20,307 kN na 348ª avaliação da função objetivo. A mais demorada chegou neste mesmo valor em 860 avaliações. A convergência acumulada das execuções que encontraram a solução ótima em relação ao número da avaliação em que isto ocorre se encontra na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 4. Fonte: o autor

		Topologia 1 L = 30m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	4	5	5	5	5	5

A relação de todas as curvas e seus históricos de convergência para a função objetivo ótima se encontram na Figura 25. Na Figura 26, a curva do valor médio das 10 execuções para cada avaliação da função objetivo.

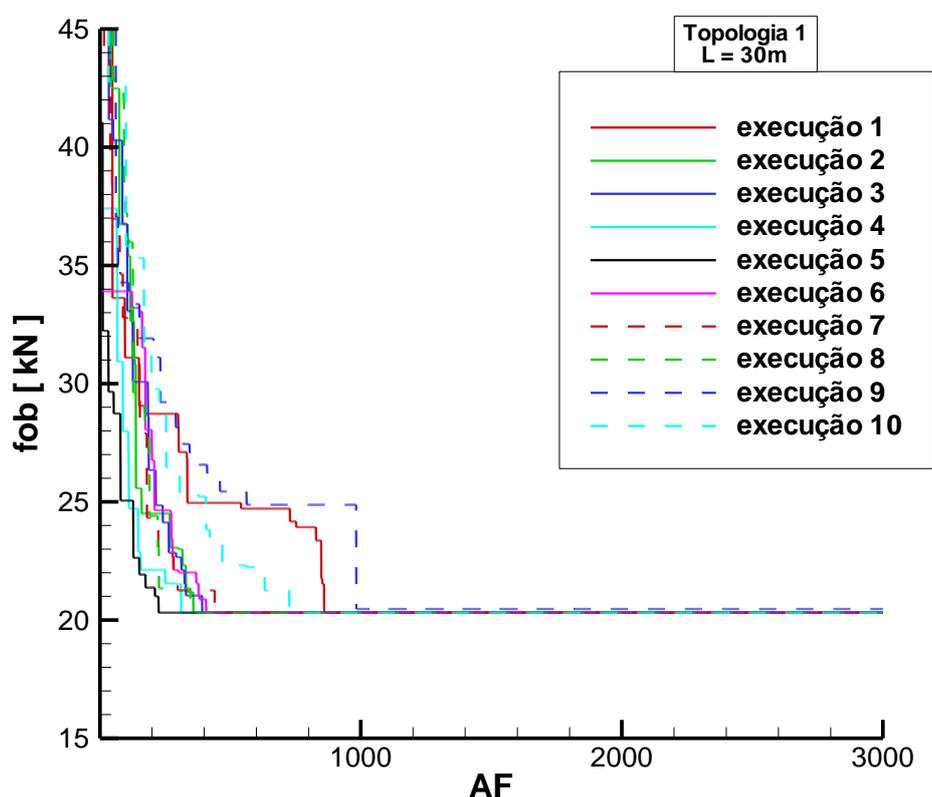


Figura 25 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 4. Fonte: o autor

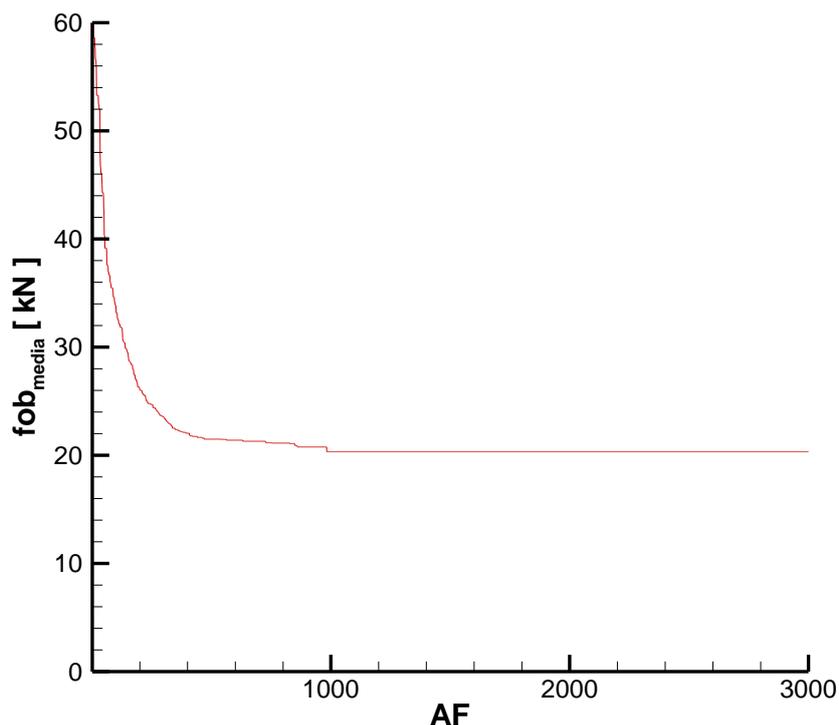


Figura 26 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 4. Fonte: o autor

7.2.2 . Topologia 2

Neste caso, a estrutura mais leve possível, após teste de validação, foi de 19,025 kN. As seções transversais que compõe essa estrutura têm dimensões L89X89X6.4 para as barras do banzo superior, das diagonais e dos montantes, e L76X76X4.8 para as barras do banzo inferior. O algoritmo encontrou a estrutura mais leve possível em 6 das 10 execuções efetuadas para este caso. Das execuções que falharam em encontrar a melhor solução, a 7ª execução encontrou 19,591 kN (variação percentual de 2,975%, com alteração apenas da seção transversal do montante para L102X102X6.4), a 1ª e a 3ª encontraram 19,878 kN (variação percentual de 4,48%, com alteração apenas das diagonais para L102X102X6.4 em relação à solução ótima) e a 10ª encontrou (variação percentual de 6,08% em relação à solução ótima, com alteração do banzo inferior para L64X64X6.4 e das diagonais para L102X102X6.4).

O avanço cumulativo das execuções bem-sucedidas em relação ao número de avaliações da função objetivo se encontra na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 5. Fonte: o autor

	Topologia 2 L = 30m						
Avaliação da função objetivo (AF) n ^o	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min	0	5	5	5	5	6	6

Os gráficos referentes a cada uma das execuções e da média das execuções se encontram nas Figura 27 e Figura 28 respectivamente.

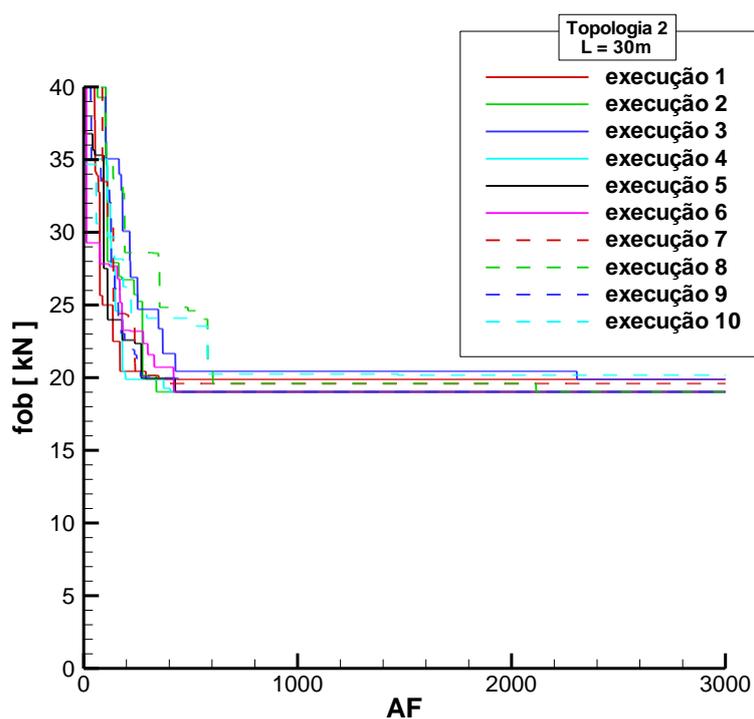


Figura 27 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 5. Fonte: o autor

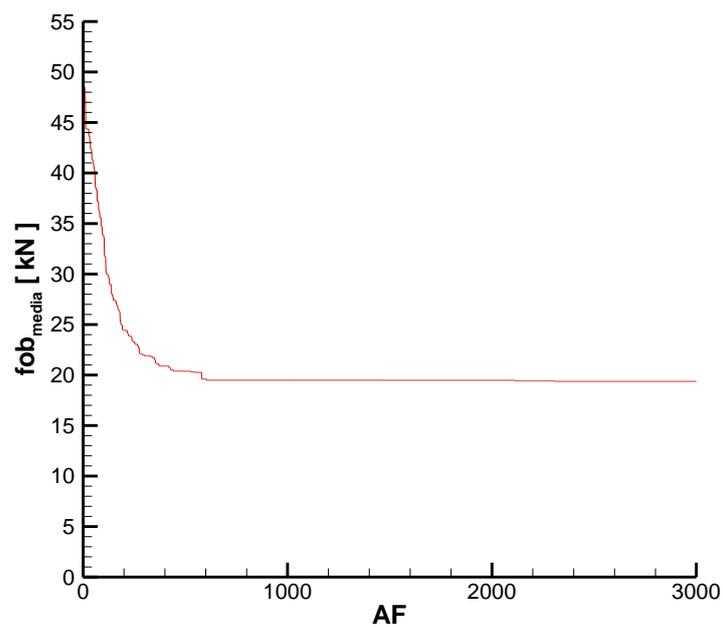


Figura 28 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 5. Fonte: o autor

7.2.3. Topologia 3

A validação deste caso encontrou como peso total da estrutura mais leve possível 20,215 kN. O algoritmo também conseguiu encontrar este valor, mas o fez em 4 das 10 tentativas, o que representou a eficiência mais baixa em encontrar a estrutura mais leve até este ponto. Esta estrutura é composta por seções transversais L89X89X6.4 nas barras de montante e do banzo superior, L64X64X4.8 nas barras do banzo inferior e L102X102X6.4 nas barras das diagonais. Os demais valores obtidos durante as 10 execuções do programa foram 20,4577 kN na execução 9 (variação percentual de 1,20%, com troca das seções transversais do banzo superior e diagonal para L89X89X6.4 e L102X102X6.4 respectivamente), 20,7811 kN nas execuções 6 e 10 (variação percentual de 2,80%, com troca dos montantes para e L102X102X6.4 em relação a execução 9), 20,7811 kN nas execuções 4 e 8 (variação percentual de 2,82%) e 20,9422 kN na execução 1 (variação percentual de 3,59%). É possível observar que, não sendo capaz de achar o melhor resultado, as estruturas geradas nas soluções quase-ótimas variaram no máximo 3,59% do peso ótimo.

A execução que mais rapidamente chegou ao valor mínimo de peso foi a 3ª, e o fez em 333 avaliações da função objetivo. Descontando aquelas que não conseguiram alcançar o valor ótimo em 3.000 avaliações, a que demorou mais para convergir foi a 2ª, na 2329ª avaliação.

A Tabela 7 apresenta resumidamente a relação entre o número, em ordem crescente, da avaliação da função objetivo e a quantidade de execuções que nesta avaliação foram capazes de alcançar o peso mínimo.

Tabela 7 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 6. Fonte: o autor

		Topologia 3 L = 30m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	1	1	1	2	4	4

Os gráficos referentes a cada uma das execuções e da média das execuções se encontram nas Figuras Figura 29 e 30 respectivamente.

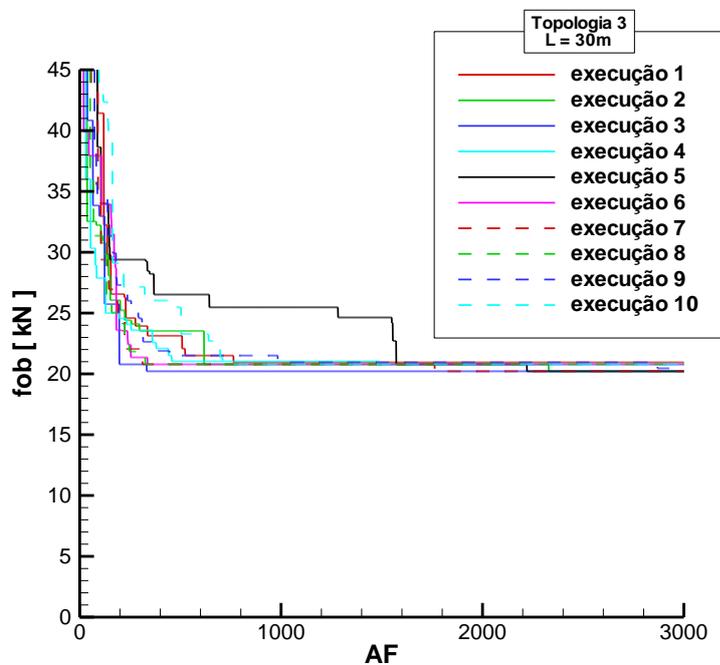


Figura 29 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 6. Fonte: o autor

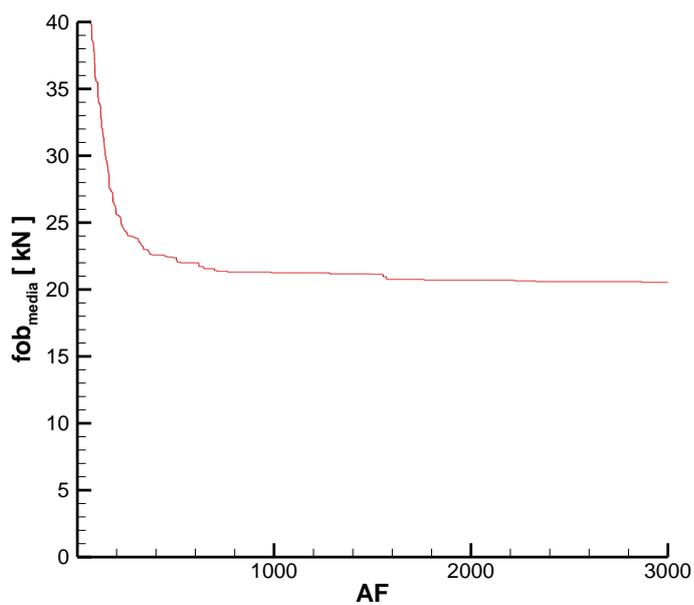


Figura 30 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 6. Fonte: o autor

7.3. Variação das topologias, L = 40m, demais parâmetros fixos

Para os casos da seção 7.3, a análise efetuada nas seções 7.1 e 7.2 é mantida. O vão do banzo inferior, entretanto, sofre um acréscimo de 10 metros, enquanto os demais parâmetros de projeto são mantidos constantes, com exceção do comprimento longitudinal do galpão, que é aumentado de 45 para 60 metros, tornando as dimensões em planta de 30x45 na seção 7.2 para 40x60 metros.

7.3.1. Topologia 1

Através do teste de validação, a estrutura mais leve para este caso pesa 43,148 kN. Esta estrutura é composta por L102X102X9.5 no banzo superior, L89X89X6.4 no banzo inferior, L152X152X7.9 nas diagonais e L102X102X6.4 nos montantes. O algoritmo encontrou este valor 6 das 10 vezes em que foi executado. Nas demais ocasiões, encontrou 43,987 kN na execução 7 (variação percentual de 1,95%), 48,960 kN na execução 10 (variação percentual de 13,47%), 49,140 kN (variação percentual de 13,88%) e 49,436 kN na execução 6 (variação percentual de 14,57%). É importante ressaltar que o valor encontrado de 48,960 kN, 49,140 kN e 49,436 kN são valores de função objetivo penalizada, de pesos originais de 43,005 kN, 43,368 kN e 43,875 kN respectivamente. Assim, nenhum desses valores seriam soluções válidas para o problema devido à violação de restrições do mesmo.

O avanço cumulativo das execuções bem-sucedidas em relação ao número de avaliações da função objetivo se encontra na Tabela 8.

Tabela 8 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 7. Fonte: o autor

		Topologia 1 L = 40m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	2	2	3	5	6	6

Os gráficos referentes a cada uma das execuções e da média das execuções se encontram nas Figuras Figura 31 e Figura 32 respectivamente.

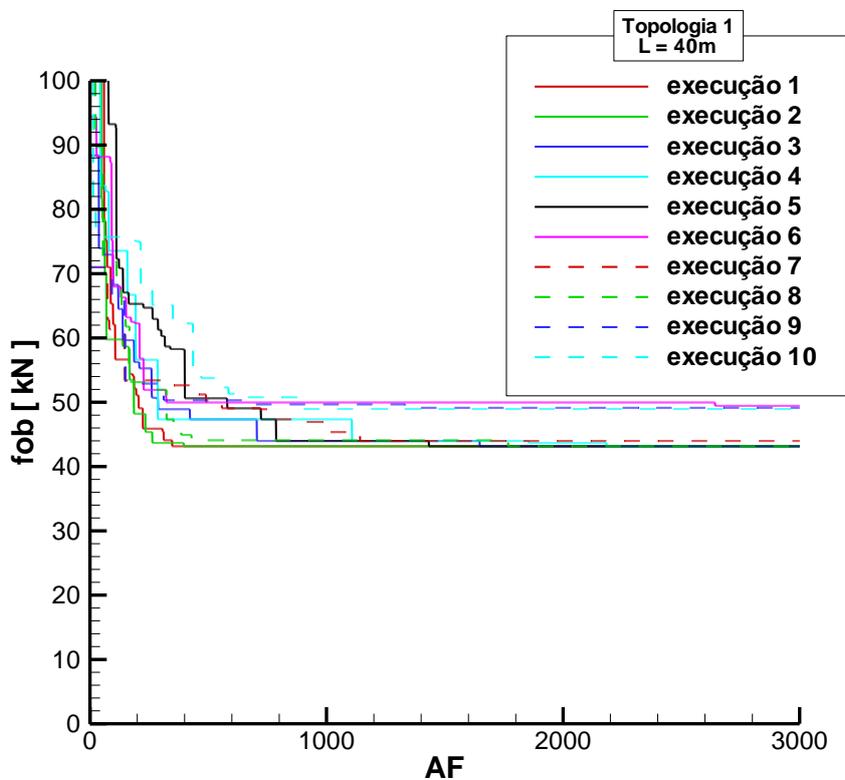


Figura 31 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 7. Fonte: o autor

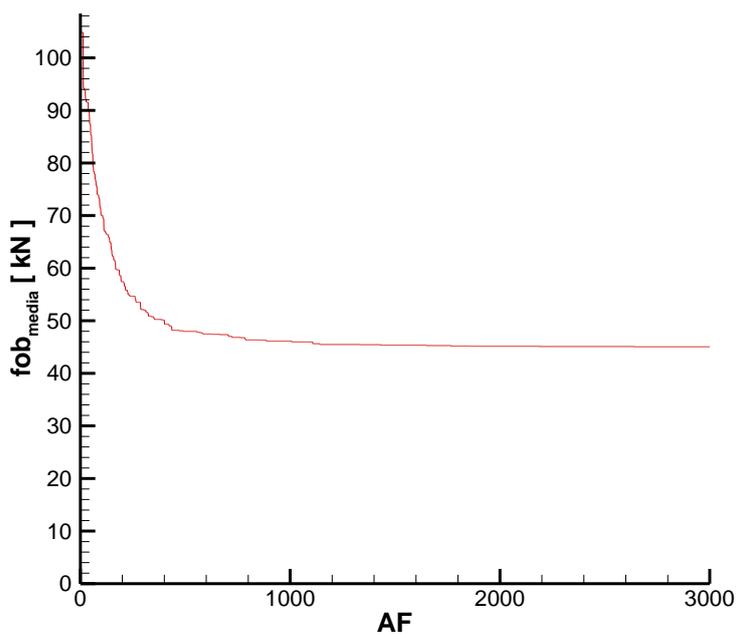


Figura 32 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 7. Fonte: o autor

7.3.2. Topologia 2

Para o caso 8, a validação encontrou como menor valor possível 39,229 kN. A estrutura ótima é composta por L102X102X9.5 no banzo superior, L89X89X6.4 no banzo inferior, L127X127X7.9 nas diagonais e L102X102X6.4 nos montantes. Das 10 execuções do programa, o algoritmo foi bem-sucedido em 9 das 10 ocasiões. Na única execução em que falhou em alcançar a estrutura ótima, chegou a 40,165 kN (variação percentual de 2,38%), valor este que não sofreu penalização durante a execução do programa, o que indica outra composição que não viola restrições. A convergência acumulada das execuções que encontraram a solução ótima em relação ao número da avaliação em que isto ocorre se encontra na Tabela 9Tabela 5.

Tabela 9- Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 8. Fonte: o autor

		Topologia 2 L = 40m					
Avaliação da função objetivo (AF) nº	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min	0	3	4	5	7	8	9

Os gráficos referentes a cada uma das execuções e da média das execuções se encontram nas Figuras 33 e 34 respectivamente.

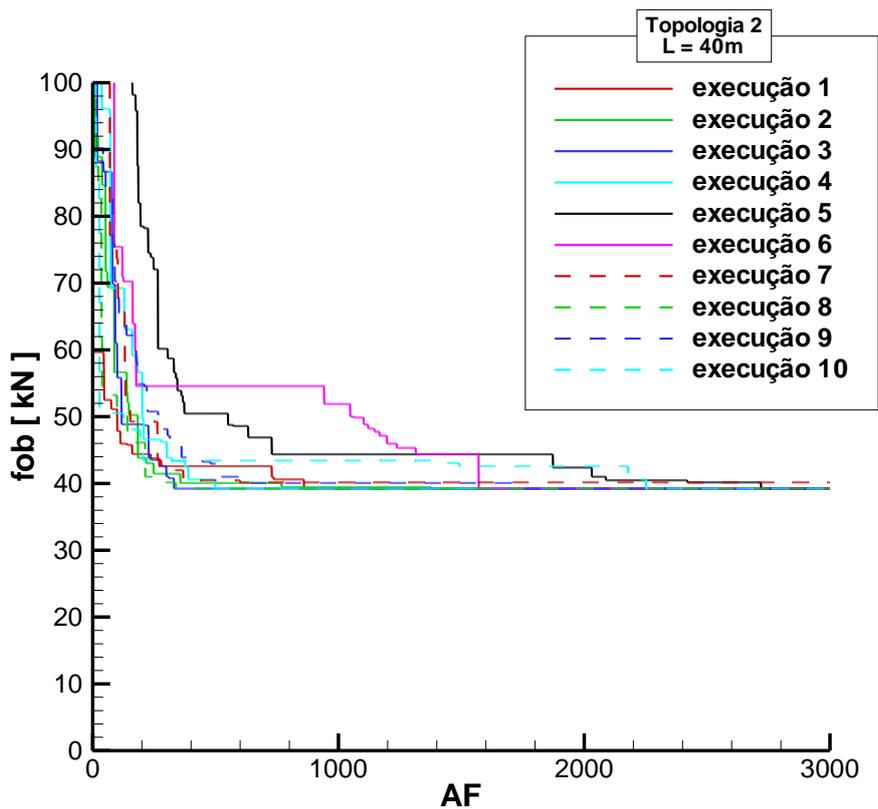


Figura 33 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 8. Fonte: o autor

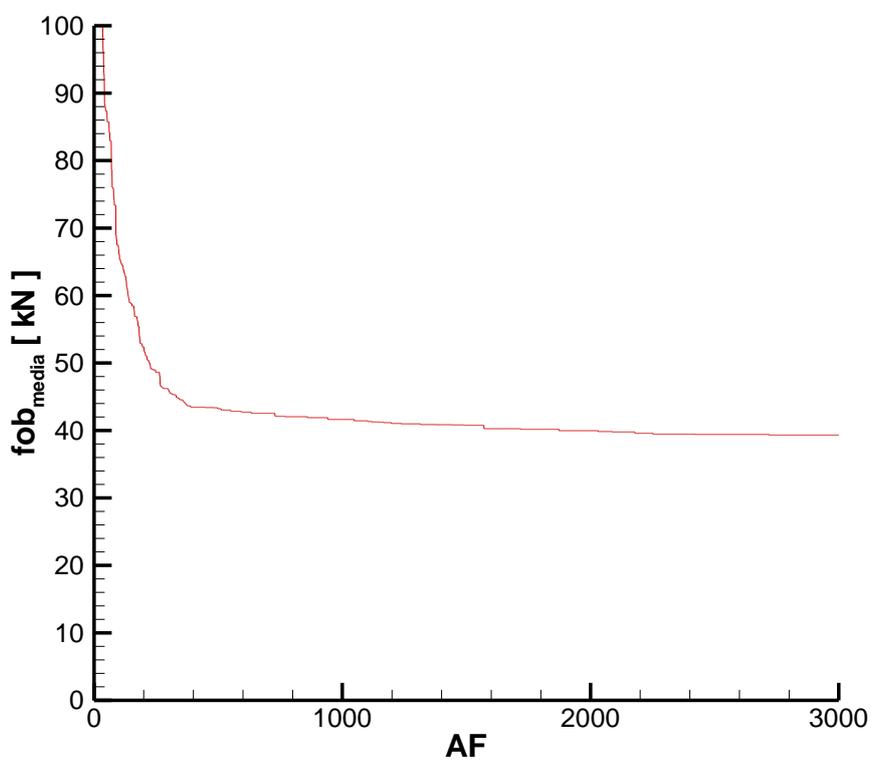


Figura 34 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 8. Fonte: o autor

7.3.2. Topologia 3

Para este caso, o teste de validação obteve como estrutura mais leve possível foi de 44,283 kN. As barras constituintes desta configuração são as mesmas encontradas no caso 7. Das execuções do programa, 7 das 10 vezes o algoritmo chegou ao valor de 44,283 kN. Nas demais ocasiões, encontrou como solução válida mas não ótima 45,123 kN (variação percentual de 1,90%, troca das barras do banzo superior para L102X102X9.5 em relação ao caso ótimo). As demais funções objetivo, entretanto, são inválidas devido à penalização (52.468 kN, peso original 49.816; 51.369 kN, peso original 48.413 kN).

O avanço cumulativo das execuções bem-sucedidas em relação ao número de avaliações da função objetivo se encontra na Tabela 10.

Tabela 10 - Relação entre o número da avaliação da função objetivo e a convergência acumulada das execuções que alcançam o peso mínimo. Caso 9. Fonte: o autor

		Topologia 3 L = 40m						
Avaliação da função objetivo (AF) nº		250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Número de execuções que alcançaram fob min		0	2	4	6	6	6	7

Os gráficos referentes a cada uma das execuções e da média das execuções se encontram nas Figuras 35 Figura 366 respectivamente.

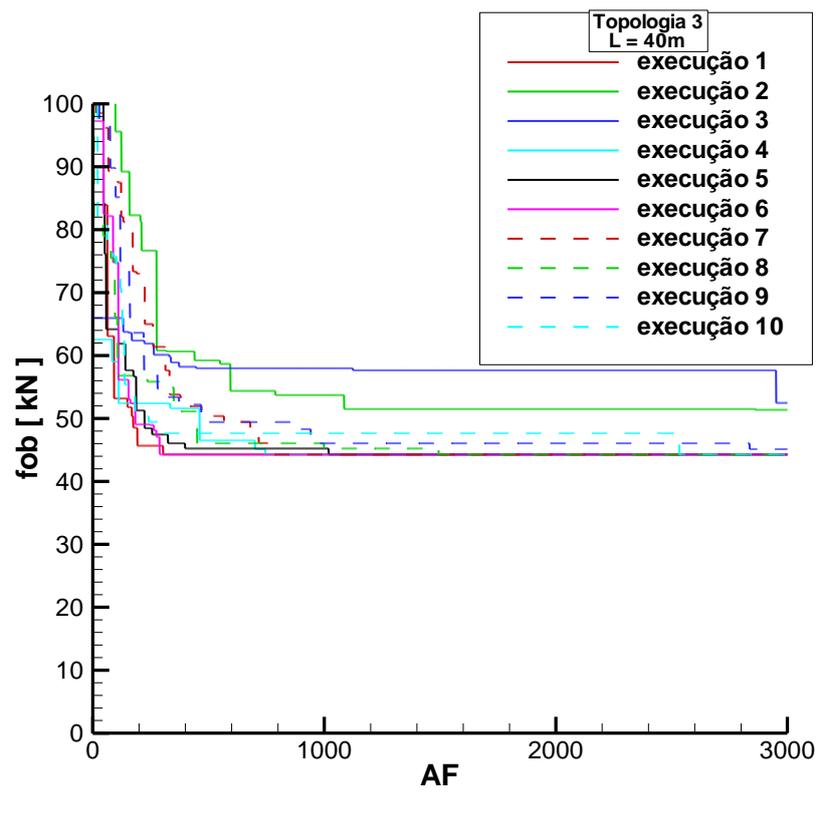


Figura 35 - Relação entre o peso mínimo da estrutura obtido para cada uma das 10 execuções do algoritmo HS e o número da avaliação da função objetivo (AF) correspondente. Caso 9. Fonte: o autor

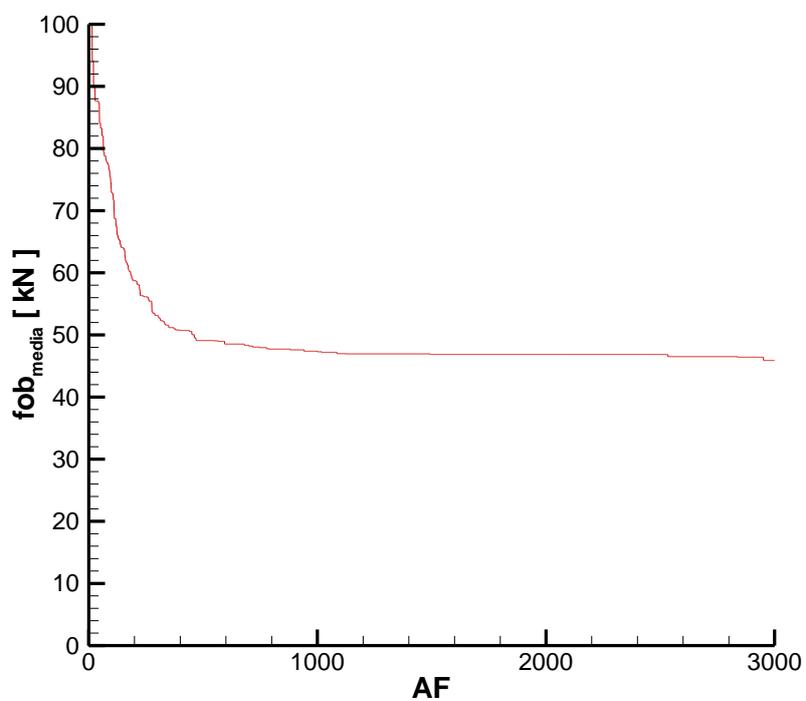


Figura 36 - Relação entre valor médio da função objetivo das 10 execuções do algoritmo para cada AF. Caso 9. Fonte: o autor

8. Considerações finais

O objetivo deste trabalho foi cumprido, tendo em vista que o programa de otimização desenvolvido foi capaz, com mais ou menos dificuldade, encontrar a solução ótima para os problemas de otimização propostos neste trabalho. Embora tenha sido necessário fazer diversas restrições para o problema ser analisado através da ótica da otimização estrutural, o fato de o algoritmo ter sempre, em amostras de dez execuções do programa, com 3.000 avaliações da função objetivo cada, encontrado a solução ótima de problemas com 13.845.841 possibilidades mostra que o uso de métodos de otimização estrutural através de recursos computacionais é uma alternativa indispensável para, não só achar a solução ideal, como um economizador de tempo gigantesco.

Na Figura 37, é colocado, em gráfico de barras, as topologias agrupadas por dimensão do vão do banzo inferior. É possível constatar que em todos os casos, a topologia 2 coincidiu com a estrutura mais leve. Mesmo todos estes valores representando as composições mais leves possíveis, a topologia 2 no caso $L = 40\text{m}$ conseguiu ser 12,90% mais leve do que a topologia 3, e 10,00% mais leve que a topologia 1. Isso evidencia que a obtenção da estrutura mais leve não pode desconsiderar a topologia das estruturas.

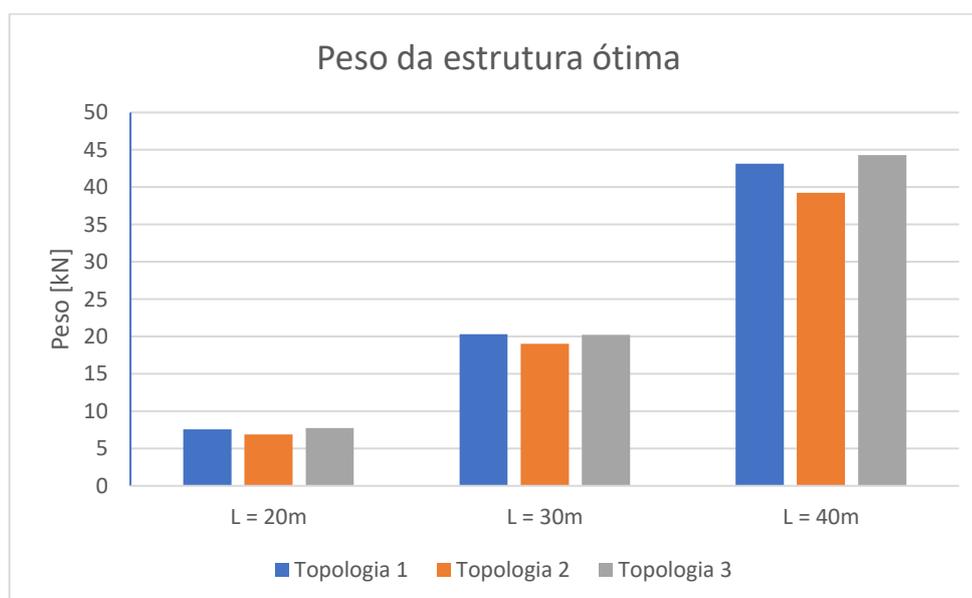


Figura 37 – Agrupamento das topologias testadas para cada dimensão de banzo inferior analisada.
Fonte: o autor

Como os parâmetros do algoritmo de otimização não foram alterados durante o uso do programa, a avaliação da eficiência da análise de cada caso não pôde ser satisfatoriamente estabelecida, visto que para isso seria necessário focar nos parâmetros de entrada para o algoritmo, e o foco deste trabalho se concentrou na variação dos parâmetros e das variáveis de projeto apenas.

O potencial desta ferramenta, entretanto, não foi explorado ao máximo. Durante o trabalho de programação, diversos parâmetros de projeto com possibilidade de serem variados não foram analisados neste estudo. Entre eles, o ângulo de inclinação do banzo superior, seções transversais compostas por cantoneiras simétricas em forma de cruz e por cantoneiras simples, e o número de nós da estrutura. Assim, ainda é possível extrair mais resultados relevantes em futuras aplicações do programa desenvolvido neste trabalho.

9. Referências bibliográficas

ALMEIDA, Felipe Schaedler De. Stacking sequence optimization for maximum buckling load of composite plates using harmony search algorithm. **Composite Structures**, [s. l.], v. 143, p. 287–299, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**, Rio de Janeiro, 2013.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios industriais em aço: projeto e cálculo**. 6. ed. São Paulo: Pini, 2010.

CBCA. **Centro Brasileiro de Construção de Aço**. 2015. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=7072>>.

CHRISTENSEN, Peter W.; KLARBRING, Anders. **An Introduction to Structural Optimization**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. v. 153.

FAKURY, Ricardo; SILVA, Ana Lydia R. Castro E.; CALDAS, Rodrigo B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. 1. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

GEEM, Zong Woo; KIM, Joong Hoon; LOGANATHAN, G. V. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. **Simulation**, [s. l.], 2001.

HAFTKA, Raphael T.; GÜRDAL, Zafer. **Elements of Structural Optimization**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 11.

KIRSCH, Uri. **Structural Optimization - Fundamentals and Applications**. 1. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993.

Ministério da Indústria e do Comércio (MIC). Secretária de Tecnologia Industrial. **Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas**. v. 1. Brasília, 1986.

MOE, Johannes; GISVOLD, Kaare Moursund (EDS.). **Optimization and automated design of structures**. [s.l.] : Universitetet, Norgestekniske Høgskole, 1971.

OLIVA, Diego et al. Multilevel Thresholding Segmentation Based on Harmony Search Optimization. **Journal of Applied Mathematics**, [s. l.], v. 2013, p. 1–24, 2013.

ROTHWELL, Alan. **Optimization Methods in Structural Design**. Cham: Springer International Publishing, 2017. v. 242.