

MÉTODO HEURÍSTICO PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILARES PLANOS TRELIÇADOS CONSTITUÍDOS POR PERFIS METÁLICOS TUBULARES CIRCULARES

Heuristic method for dimensioning flat metal trussed pillars constituted by circular tubular metallic profiles

Aristóteles Rafael Braga da Silva Rezende¹, Helton Cristiano Gomes², Aloisio de Castro Gomes Júnior³



PALAVRAS CHAVE:

Construção metálica;
Pilares;
Trelças;
Heurísticas;
Método da descida;
Método dos estados limites.

KEYWORDS:

Metallic construction;
Pillars;
Trusses;
Heuristics;
Descent heuristic;
Limits states method.

RESUMO: Buscando sua maior eficiência estrutural, em consonância com o método dos estados limites e os critérios definidos na NBR 8800:2008 e correlatas, foi desenvolvido neste trabalho um método heurístico para o dimensionamento de pilares metálicos planos trelçados, tendo por objetivo a minimização de seu peso. O método proposto é uma adaptação da heurística clássica da descida e foi testado e validado em um estudo de caso comparativo, no qual um pilar metálico de um galpão, a princípio dimensionado como perfil I, foi redimensionado como uma trelça Warren constituída em perfis metálicos tubulares circulares. As trelças são estruturas compostas por elementos dispostos em triângulos contíguos, única forma poliédrica que não pode alterar sua forma sem igualmente alterar o comprimento de seus lados, o que proporciona geometria estável e rígida. Constituir trelças a partir de elementos metálicos tubulares circulares, que apresentam maior raio de giração e, conseqüentemente, maiores rigidez a torção e estabilidade lateral, contribui, também, na busca por maior eficiência estrutural, especialmente em situações em que predominam esforços axiais. Considerando trelças ideais, com articulações perfeitas e carregamentos incidindo exclusivamente nos nós, tem-se essencialmente esforços axiais de tração e compressão, os mais favoráveis à estabilidade estrutural. A utilização de soluções estruturais onde elementos trelçados substituem perfis de alma contínua representa a busca por projetos mais eficientes, com estruturas mais leves e econômicas.

ABSTRACT: Searching for more structural efficiency, based on Limits States Method, on ABNT NBR 8800:2008 standard and related Brazilian's standards, a heuristic method was developed for the dimensioning flat metal trussed pillar, with the objective of minimizing their weight. The proposed method is an adaptation of the classic Descent Heuristic and was tested and validated in a comparative study case, in which a metallic pillar of a shed, initially dimensioned as I section profile, was resized as a Warren truss made of circular tubular metallic profiles. Trusses are structures composed of elements arranged in contiguous triangles, the only polyhedral shape that can't change its shape without changing its sides length, situation which provides stable and rigid geometry. Constituting trusses based on circular tubular metallic elements, which have a greater turning radius and, consequently, greater torsional stiffness and lateral stability, also contributes to the search for greater structural efficiency, especially in situations where main efforts are axials. Considering ideal trusses, with perfect joints and exclusively loaded on its nodes, there are essentially axial tensile and compression efforts, the most favorable for structural stability. Structural solutions where trusses are used instead of continuous profiles represents the search for more efficient projects, with lighter and more economical structures. Fact which was verified in this study.

* Contato com os autores:

Publicado em 12 de maio de 2023

¹ e-mail: aristotelesrafael@hotmail.com (A. R. B. S. Rezende)

Eng. Civil, Discente, Programa de Pós-graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

² e-mail: helton.gomes@ufop.edu.br (H. C. Gomes)

Eng. de Produção, Mestre em Eng. de Produção, Doutor em Eng. Civil, Prof. do Prog. de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

³ e-mail: aloisio.junior@ufop.edu.br (A. C. Gomes Júnior)

Eng. de Produção, Mestre em Eng. de Produção, Doutor em Eng. de Produção, Prof. do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

1. INTRODUÇÃO

Estrutura é um conceito universal que se aplica a diversos campos do conhecimento humano. No estudo das edificações, as estruturas são a parte resistente e podem ser constituídas por diferentes tipos de materiais, utilizados de forma exclusiva ou em combinações diversas. Os materiais mais comumente utilizados são as rochas naturais, a madeira, o concreto, a cerâmica e o aço. Em se tratando de construção metálica, o material predominante é o aço, o qual é aplicado sob a forma de elementos estruturais planos (placas ou chapas) e elementos estruturais lineares (hastes ou barras). Através da combinação de elementos lineares é possível formar sistemas estruturais planos como as grelhas (combinação de vigas), os pórticos (combinação de vigas e pilares) e as treliças (combinação de barras), os quais podem ser ainda combinados entre si, formando estruturas espaciais ainda mais complexas.

Dentre os sistemas estruturais, as treliças surgem como um dos mais econômicos, sendo capaz de vencer grandes vãos e suportar elevadas cargas com menor consumo de materiais. Elas vêm, também, ganhando espaço na função de pilar, especialmente em casos de estruturas submetidas a cargas elevadas, como no suporte de grandes coberturas e em caminhos de pontes rolantes, o que tem permitido a construção de estruturas mais esbeltas e econômicas. A economicidade natural das treliças, aliada a uma diversidade de tipologias e configurações, podendo ser remodelada a cada situação específica, as tornam, cada vez mais, objeto de interesse de estudos na área de otimização estrutural.

O processo convencional de dimensionamento de uma estrutura, como uma treliça, parte do pré-dimensionamento, passando em sequência por etapas iterativas de verificação, levando à obtenção de uma configuração com dimensões aceitáveis, dentro dos parâmetros estabelecidos para o projeto. Há neste processo de tentativa e erro uma influência direta do projetista, a considerar sua experiência, intuição e habilidades (Cortês, 2002). Sendo assim, o resultado obtido pertence ao universo de soluções possíveis, mas, não necessariamente, representa a melhor configuração estrutural. A utilização de técnicas de otimização significa um passo à frente aos processos convencionais de dimensionamento, uma vez que não se busca apenas uma solução aceitável, mas aquela que será a melhor dentre as possíveis, frente às restrições definidas. A otimização é a área da matemática aplicada que calcula e computa valores ótimos para variáveis de projeto que induzem desempenho ótimo, ao mesmo tempo em que satisfazem as restrições do problema abordado.

2. OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um método, baseado na heurística clássica da descida, que proporcionasse uma forma alternativa, mais eficiente e econômica de se configurar estruturas. No método em questão aplica-se a otimização geométrica de seção transversal ao dimensionamento de pilares metálicos planos treliçados constituídos por perfis tubulares circulares, atendo-se aos limites de resistência dos materiais, ao mesmo tempo em que se busca minimizar o consumo de matéria prima, proporcionando assim estruturas mais leves e de menor custo para os projetos.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 ESTRUTURAS E TRELIÇAS

Segundo Rebello (2000), no campo das edificações, uma estrutura pode ser definida como um conjunto de elementos que se inter-relacionam para desempenhar uma função, isto é, criar um espaço no qual as pessoas exercerão diversas atividades. Porém, o dimensionamento de estruturas capazes de resistir aos mesmos esforços e consumir menores quantidades de materiais tem se mostrado uma atividade

desafiadora. Estudos complexos têm sido desenvolvidos na busca da otimização dos mais diversos sistemas estruturais, dentre os quais têm se destacado as treliças, cujos elementos estão representados na Figura 1.

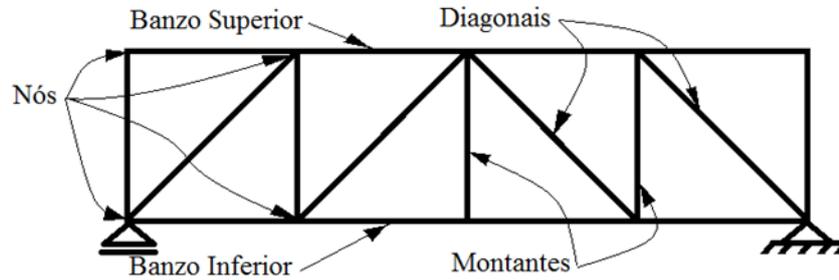


FIGURA 1: Elementos de uma treliça
Fonte: Autoria própria (2020).

Como pode ser visto na Figura 1, as treliças consistem em um sistema estrutural cuja máxima é a utilização de um arranjo de barras em formações triangulares, devidamente posicionadas e carregadas, de forma que os elementos constituintes estejam submetidos basicamente a esforços de tração e compressão, permitindo assim vencer grandes vãos com baixo consumo de materiais se comparado à aplicação de elementos singulares de alma cheia.

Estas características tornam as treliças um sistema de grande versatilidade e aplicabilidade, sendo utilizadas como elemento estrutural em coberturas, pontes, torres, guindastes, edifícios, galpões industriais, estruturas de suporte para painéis e sinalizações e estruturas efêmeras. Em especial, as treliças vêm ganhando espaço, também, como elemento estrutural que cumpre a função de pilar, sobretudo em estruturas submetidas a cargas elevadas, como grandes coberturas e pontes rolantes, permitindo a construção de estruturas mais esbeltas, econômicas e de considerável apelo estético. Nas Figuras 2 a 4 tem-se alguns exemplos de treliças utilizadas nestas condições.



FIGURA 2: Treliça como torre de linha de transmissão.
FONTE: Watanabe (2018).



FIGURA 3: Treliça formando a estrutura principal de um edifício.
FONTE: Watanabe (2018).



FIGURA 4: Conjunto de treliças suportando a cobertura de um estádio.
FONTE: Galeria da Arquitetura (2021).

A vasta aplicabilidade das treliças tornou-se um campo fértil para o desenvolvimento e aplicação de métodos de otimização estrutural. Tais métodos têm por objetivo dimensionar estruturas que não atendam somente a determinadas condições de contorno, mas que sejam mais esbeltas, eficientes e econômicas, sem deixar de lado a segurança.

3.2 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

De acordo com Vélez (2015), o termo otimização estrutural é uma fusão das áreas de engenharia, matemática, ciências e tecnologia que tem por objetivo a obtenção de uma estrutura com melhor desempenho. Diversas metodologias já foram utilizadas com esse objetivo, desde os projetos de tentativa e erro até os métodos mais sofisticados, como os heurísticos e meta-heurísticos, dentre outros. Este é um importante campo de estudos que foi altamente potencializado nas últimas décadas com o advento de computadores pessoais de alto desempenho. Conforme descreve Deichmann (2019), a otimização estrutural pode ser dividida em três áreas:

- **Otimização dimensional:** a variável a ser considerada é a seção transversal dos elementos que compõem a estrutura e o processo de otimização consiste na busca pela melhor distribuição das áreas;
- **Otimização geométrica:** o objetivo é encontrar a melhor forma para a estrutura modificando a posição dos nós que a compõe, ou seja, modificando suas coordenadas;

- **Otimização topológica:** a variável de projeto está associada à distribuição espacial do material na estrutura, permitindo que alguns dos elementos que compõem a estrutura possam ser subtraídos ou adicionados à composição, alterando seu padrão estrutural.

O processo de busca pela melhor solução para um problema de otimização estrutural tem seu início com a definição dos seguintes itens:

- **Variáveis de projeto:** descrevem o projeto e podem ser de natureza discreta ou contínua;
- **Função objetivo:** define e quantifica, por meio de um critério numérico, o objetivo a ser alcançado, seja a maximização ou minimização de um determinado aspecto;
- **Restrições do projeto:** estabelecem as regras, relações e limites do projeto.

Definidos estes itens, pode-se determinar um modelo matemático para o problema e implementar computacionalmente rotinas que possibilitem a sua resolução. Tratando-se de otimização estrutural, a solução esperada é o dimensionamento de uma estrutura eficiente, com menor consumo de materiais frente a uma determinada demanda de esforços solicitantes. Algumas aplicações de métodos de otimização estrutural encontradas na literatura são descritas a seguir.

Guilherme (2000) propôs uma metodologia para a otimização topológica de estruturas do tipo treliça ou pórtico, tomando a minimização do volume como função objetivo e adotando como restrições a flexibilidade e a estabilidade estrutural. O autor utilizou a programação linear sequencial, onde as funções objetivo e de sensibilidade foram linearizadas através da expansão da série de Taylor.

Olivieri (2004) apresentou uma formulação utilizando algoritmos genéticos para obter a seção transversal ótima de pontes rodoviárias constituídas por vigas de seção I, pré-moldadas e protendidas. Hasançebi (2007) estudou a aplicação de métodos evolucionários em projetos de pontes treliçadas. O autor combinou estratégias de evolução discreta para a otimização do tamanho e da topologia, enquanto aplicou estratégias de evolução contínua para otimizar a seção.

Guerra (2008) desenvolveu um método de otimização da massa de treliças planas e espaciais utilizando algoritmos genéticos. O autor realizou uma análise comparativa entre os resultados obtidos para uma treliça otimizada pelo método, dentro dos limites impostos pela NBR 8800:2008, e os resultados obtidos através de um *software* comercial, sendo encontrada uma diferença de 0,35% entre os resultados, considerada muito pequena pelo autor, o qual vislumbra a possibilidade de alcançar melhores resultados para estruturas de maior complexidade. Silva (2011) apresentou um método de penalização adaptativa para algoritmos genéticos não geracionais baseado no método lagrangeano aumentado para otimizar estruturas reticuladas.

Medeiros e Kripka (2012) apresentaram uma revisão dos principais métodos meta-heurísticos aplicados em otimização estrutural na última década. Os autores destacaram a utilização dos métodos Busca Tabu, *Simulated Annealing*, Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas, Enxame de Abelhas, Enxame de Partículas e Busca Harmônica. Kripka et al (2013) realizaram um estudo numérico e experimental visando o dimensionamento otimizado de treliças, no qual consideraram as seções transversais dos elementos e a geometria como variáveis de projeto. O método utilizado foi a meta-heurística *Simulated Annealing*. Partindo dos resultados obtidos, os autores construíram e ensaiaram dois protótipos e os compararam.

No presente trabalho foi tratado o problema de otimização dimensional de pilares planos treliçados constituídos por perfis metálicos tubulares circulares, para os quais foram investigadas as melhores topologia e dimensão da seção transversal das hastes constituintes, buscando assim minimizar o peso da estrutura e, conseqüentemente, seu custo. Segundo Neeraja et al (2017), a minimização do peso do material proporciona um projeto otimizado e econômico, visto que o custo do material desempenha um papel vital no projeto e na construção de uma estrutura.

4. METODOLOGIA

4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de otimização dimensional abordado neste trabalho consiste em determinar perfis para os elementos da treliça de forma que as áreas das seções transversais destes resultem em uma estrutura com peso total mínimo e, ao mesmo tempo, atendam aos esforços solicitantes e aos índices de esbeltez máximos. O peso total da treliça é determinado pelo somatório dos pesos dos elementos que a compõem. Um modelo matemático para o problema pode ser descrito como a seguir, Equações 1 a 4, o qual é uma adaptação do proposto por Kripka et al (2013).

$$\text{Min} \quad W = \gamma \sum_{i=1}^n A_i L_i \quad \text{Eq. [1]}$$

$$\text{Sujeito a} \quad N_{Sd,ij} \leq N_{Rd,ij} \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, 2 \quad \text{Eq. [2]}$$

$$\lambda_{ij} \leq \lambda_{limj} \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall j = 1, 2 \quad \text{Eq. [3]}$$

$$A_i \in A \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \text{Eq. [4]}$$

No modelo matemático, W representa o peso total da treliça, sendo calculado como função de: γ = peso específico do material utilizado (kg/m^3);

n = número total de elementos da treliça;

A_i (variável de projeto) = área da seção transversal do elemento i da treliça ($i = 1, \dots, n$) (m^2);

$A = \{1, \dots, m\}$ conjunto de possíveis valores para a área da seção transversal (m^2);

m = número de possíveis valores para a área da seção transversal;

L_i = comprimento do elemento i da treliça ($i = 1, \dots, n$) (m).

Na formulação descrita, tem-se ainda os seguintes parâmetros:

$N_{Sd,ij}$ = esforço solicitante j ($j = 1$ – tração e $j = 2$ – compressão) exercida no elemento i da treliça ($i = 1, \dots, n$) (kN);

$N_{Rd,ij}$ = esforço resistente do elemento i da treliça ($i = 1, \dots, n$) ao esforço solicitante j ($j = 1$ – tração e $j = 2$ – compressão) (kN);

λ_{ij} = índice de esbeltez do elemento i ($i = 1, \dots, n$) submetido ao esforço solicitante j ($j = 1$ – tração e $j = 2$ – compressão);

λ_{limj} = índice de esbeltez máximo para os elementos submetido ao esforço solicitante j ($j = 1$ – tração e $j = 2$ – compressão).

No modelo apresentado, a função objetivo [1] consiste em minimizar o peso total da estrutura treliçada. O conjunto de restrições [2] impõe que os esforços solicitantes sejam inferiores aos esforços resistentes em todos os elementos da treliça, assegurando a estabilidade estrutural. As restrições [3] garantem que os limites de esbeltez dos elementos não sejam maiores que os índices de esbeltez máximos. As restrições [4] estabelecem os possíveis valores para a área da seção transversal dos elementos da treliça, ou seja, o domínio das variáveis de projeto.

Os valores para os esforços solicitantes ($N_{t,Sd}$ e $N_{c,Sd}$) foram obtidos utilizando o *software* FTOOL Educational Version 3. O procedimento de cálculo dos esforços resistentes e dos limites de esbeltez, que dependem das características dos perfis utilizados, baseia-se nos princípios definidos pela norma brasileira ABNT NBR 8800:2008. Como critério para a garantia da segurança das estruturas, adotou-se o método dos estados limites. Como conceituado por Pfeil (2009), um estado limite ocorre toda vez que uma estrutura deixa de satisfazer um de seus objetivos, sejam estes a segurança estrutural (Estados Limites Últimos - ELU)

ou o desempenho adequado em condições de serviço (Estados Limites de Serviço - ELS). A ocorrência destes estados provoca efeitos estruturais que não condizem com os de uso normal a que se destina a construção ou podem indicar o comprometimento da durabilidade da estrutura. No processo de cálculo são considerados roteiros diferentes para elementos submetidos a esforços de tração e elementos submetidos a esforços de compressão, conforme descrito nas seções a seguir.

4.1.1. Elementos submetidos à força axial de tração

- Limite de esbeltez (λ)

A NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda uma limitação para o λ de elementos tracionados, sendo este calculado como a relação entre L - comprimento do elemento (m) e r - raio de giração (m) do perfil correspondente, vide Equação 5.

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300 \quad \text{Eq. [5]}$$

- Força axial resistente de tração ($N_{t,Rd}$)

Conforme determina a NBR 8800 (ABNT, 2008), $N_{t,Ed}$ (kN) deve ser menor que $N_{t,Rd}$ (kN), sendo $N_{t,Rd}$ o menor valor encontrado para as Equações 6 e 7.

Escoamento da Seção Bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad \text{Eq. [6]}$$

Ruptura da Seção Líquida

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad \text{Eq. [7]}$$

Em que:

A_g = área bruta da seção transversal do elemento (m²);

γ_{a1} = coeficiente de ponderação de resistência para escoamento do aço estrutural. Para combinações normais, o valor adotado para o coeficiente é 1,1;

f_y = tensão de escoamento do aço (MPa);

A_e = área líquida efetiva da seção transversal do elemento (m²);

γ_{a2} = coeficiente de ponderação de resistência para ruptura do aço estrutural. Para combinações normais, o valor adotado para o coeficiente é 1,35;

f_u = tensão de ruptura do aço (MPa).

Considerando o exposto na norma NBR 8800:2008, adotou-se $A_g = A_e = A$.

4.1.2. Elementos submetidas à força axial de compressão

- Limite de esbeltez (λ)

Para elementos submetidos à força axial de compressão, a NBR 8800:2008 recomenda que o λ não deva ser superior a 200, vide Equação 8.

$$\lambda = \frac{kL}{r} \leq 200 \quad \text{Eq. [8]}$$

Em que k é o coeficiente de flambagem. Considerou-se, neste trabalho, $k = 1$.

- Força axial resistente de compressão ($N_{c,Rd}$)

Para o cálculo do esforço resistente de elementos submetidos à força axial de compressão, tem-se, também, que $N_{c,Ed} \leq N_{c,Rd}$. Sendo assim, a $N_{c,Rd}$ de uma barra associada aos ELU de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local deve ser determinada pela Equação 9.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad \text{Eq. [9]}$$

Em que:

χ = fator de redução associado à resistência a compressão;

Q = fator de redução associado à flambagem local.

De acordo com a NBR 16239:2013, o χ para perfis tubulares deve ser determinado pela Equação 10.

$$\chi = \frac{1}{\left(1 + \lambda_0^{4,48}\right)^{1/2,24}} \quad \text{Eq. [10]}$$

Na equação de cálculo do χ , λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, que deve ser obtido a partir da Equação 11.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad \text{Eq. [11]}$$

Em que N_e (kN) é a força axial de flambagem elástica. Nas condições do presente trabalho, pode ser adotada a simplificação expressa pelas Equações 10.1 e 10.2.

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad \text{Eq. [10.1]}$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad \text{Eq. [10.2]}$$

Considerando seções tubulares, que são duplamente simétricas, a determinação do valor de N_e é feita analisando duas condições de instabilidade. Na primeira é considerada a flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia da seção transversal e, N_e é calculado pelas Equações 12.1 e 12.2.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(k_x L_x)^2} \quad \text{Eq. [12.1]}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(k_y L_y)^2} \quad \text{Eq. [12.2]}$$

Na Equação 12.1 tem-se:

E = módulo de elasticidade do aço (MPa);

I_x = momento de inércia da seção transversal (m⁴);

$K_x L_x$ = comprimento de flambagem por flexão, em relação ao eixo x (m).

Na Equação 12.2, I_y e $K_y L_y$ são em relação ao eixo y. Tratando-se de perfis tubulares circulares, tem-se que $I_x = I_y$ e $K_x L_x = K_y L_y$, portanto, $N_{ex} = N_{ey}$.

Na segunda condição analisada, considerando a flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal, N_{ez} é calculado pela Equação 13.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(k_z L_z)^2} + GJ \right] \quad \text{Eq. [13]}$$

Em que:

C_w = constante de empenamento da seção transversal;

G = módulo de elasticidade transversal do aço (MPa);

J = constante de torção da seção transversal (m^4);

r_0 = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento (m).

Considerando-se perfis tubulares circulares, cuja seção transversal é perfeitamente simétrica, $C_w = 0$, permitindo simplificar a Equação 13 para a Equação 14.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} (GJ) \quad \text{Eq. [14]}$$

O r_0 é calculado pela Equação 15.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad \text{Eq. [15]}$$

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), x_0 e y_0 são as coordenadas do centro de cisalhamento na direção dos eixos centrais x e y , respectivamente, em relação ao centro geométrico da seção, e r_x e r_y são os raios de giração em relação aos eixos centrais x e y , respectivamente. Em função da simetria característica dos perfis tubulares circulares, tem-se $x_0 = y_0$ e $r_x = r_y = r$, o que permite reduzir a Equação 15 para a Equação 16.

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2)} \quad \text{Eq. [16]}$$

Ou ainda, para a Equação 16.1.

$$r_0 = \sqrt{(2r^2)} \quad \text{Eq. [16.1]}$$

Sendo assim, N_{ez} pode ser calculado pela Equação 17.

$$N_{ez} = \frac{1}{2r^2} (GJ) \quad \text{Eq. [17]}$$

O valor a ser considerado para o N_e , a ser utilizado na Equação 11, é o menor dentre os obtidos para $N_{ex} = N_{ey}$ e N_{ez} .

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), a determinação do valor de Q , em se tratando de barras de seção tubular circular, deve seguir as recomendações expressas em 18.1 e 18.2.

$$\text{Para} \quad \frac{D}{t} \leq \frac{0,11E}{f_y} \rightarrow Q = 1 \quad \text{Eq. [18.1]}$$

$$\text{Para} \quad \frac{0,11E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{0,45E}{f_y} \rightarrow Q = \frac{0,038}{D/t} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \quad \text{Eq. [18.2]}$$

Em que:

D = diâmetro externo da seção tubular circular (m);

t = a espessura da parede (m).

Podem ser encontrados diversos métodos e *softwares* comerciais para a resolução do problema de dimensionamento descrito, dentre os quais destaca-se aqui os métodos heurísticos de otimização combinatória.

4.2 MÉTODO HEURÍSTICO PROPOSTO

Um método heurístico, no âmbito da otimização combinatória, consiste em um algoritmo que pode ser utilizado para encontrar boas soluções para problemas reconhecidamente difíceis como, por exemplo, o de dimensionamento estrutural. Os métodos heurísticos são notoriamente intuitivos, eficientes na resolução de diversos tipos de problemas e de fácil implementação computacional. Esses métodos permitem ainda que sejam alcançadas boas soluções com baixo tempo de processamento computacional, tornando possível a execução de um elevado número de testes em curto prazo, possibilitando alterações

em hipóteses e tipos e valores de parâmetros de projeto, em contraponto ao que ocorre na implementação de pacotes de *softwares* comerciais de cálculo estrutural convencionais.

Os métodos heurísticos podem ser divididos, basicamente, em construtivos e de refinamento. Segundo Arroyo (2002), as heurísticas construtivas são procedimentos que constroem uma solução, a partir de uma ou mais regras específicas, para um dado problema de otimização. Elas geram soluções inserindo elementos iterativamente e a escolha do elemento a ser inserido varia de acordo com o problema abordado, podendo ser aleatória ou gulosa. As heurísticas de refinamento baseiam-se na noção de estrutura de vizinhança, partem de uma solução inicial qualquer à qual aplica-se uma modificação, gerando-se uma nova solução, e caminham, a cada iteração, de vizinha em vizinha, conforme a definição de vizinhança adotada. Dentre os principais métodos heurísticos de refinamento, destacam-se o da descida, o de primeira melhora e o de descida em vizinhança variável (Souza, 2011).

Neste trabalho, uma solução S para o problema de dimensionamento estrutural abordado pode ser representada por um vetor com os valores das áreas da seção transversal dos n elementos da treliça, isto é, $S = [A_1, A_2, \dots, A_n]$, com $A_i \in \mathbf{A}$. O conjunto \mathbf{A} foi determinado a partir do catálogo de um fabricante de perfis metálicos. A cada valor de A_i estão associados alguns parâmetros referentes a um perfil específico, sendo os valores destes utilizados no cálculo dos esforços resistentes e dos limites de esbeltez.

Para a geração de uma solução inicial, optou-se por uma adaptação da heurística construtiva aleatória. O Pseudocódigo da heurística construtiva utilizada pode ser visto a seguir.

```

procedimento ConstrucaoAleatoria( )
1  $S \leftarrow \emptyset$ ;
2 Para  $i = 1$  até  $n$  faça
3      $A_i = \text{valor aleatório pertencente a } \mathbf{A}$ ;
4      $S \leftarrow S \cup A_i$ ;
5 fim-for;
6 Retorne  $S$ ;
fim ConstrucaoAleatoria;

```

No procedimento *ConstrucaoAleatoria*, a solução S inicia-se vazia e, em cada uma das n iterações, um valor para a área da seção transversal do elemento i da treliça é selecionado aleatoriamente.

Partindo da solução inicial gerada, é realizada uma busca local utilizando uma variante do método da descida. No método da descida, todos os possíveis vizinhos da solução inicial são gerados e analisados, movendo-se somente para o melhor deles, ou seja, quando um ótimo local em relação à estrutura de vizinhança utilizada é encontrado. Na adaptação do método da descida proposta, uma nova solução é gerada alterando-se o valor da área da seção transversal de um dos elementos da treliça. São percorridos todos os elementos da treliça e, o melhor valor para a área da seção transversal de cada um é escolhido, ou seja, aquele que proporciona o melhor valor para a função de avaliação ($f(\cdot)$). O Pseudocódigo do método de refinamento utilizado pode ser visto a seguir.

```

procedimento Descida( $f(\cdot)$ ,  $S$ )
1  $S^* \leftarrow S$ 
2 Para  $i = 1$  até  $n$  faça
3     Selecione  $A_i \in \mathbf{A}$ , gerando  $S'$  com o menor valor para  $f(S')$ ;
4     se  $f(S') < f(S)$ 
5          $S \leftarrow S'$ ;
6     se  $f(S) < f(S^*)$ 
7          $S^* \leftarrow S$ ;
8 fim-para;
9 Retorne  $S^*$ ;
fim Descida;

```

O procedimento *Descida* inicia-se salvando a solução inicial gerada (S) como a melhor encontrada até então (S^*). Em cada uma das n iterações, o melhor valor para a área da seção transversal do elemento i é selecionado, ou seja, aquele que gere uma solução vizinha S' com o menor valor para a função de avaliação $f(S')$. Caso S' seja melhor que a solução corrente S , S' passa a ser a solução corrente e, se ela for melhor que S^* , esta é atualizada.

Em determinados problemas de otimização, como o abordado neste trabalho, até mesmo encontrar uma solução viável representa um desafio. Porém, podem ser relaxadas algumas restrições do problema, permitindo a exploração de um universo de busca mais amplo. Nesse caso, como renuncia-se à verificação de viabilidade de cada solução, a busca poderá incluir soluções inviáveis, o que não significa que essas não sejam penalizadas. Faz-se, então, necessária a definição de coeficientes que terão a função de penalizar as violações das restrições do problema na função de avaliação. Essa é uma estratégia que amplia o universo de busca, gera um conjunto de soluções de maior abrangência e permite encontrar soluções para problemas de maior complexidade. No presente trabalho, essa estratégia foi adotada e os coeficientes α e β foram determinados para penalizar os conjuntos de restrições (2) e (3), respectivamente. Sendo assim, o valor da função de avaliação $f(S)$ é calculado pela Equação 19.

$$f(S) = \gamma \sum_{i=1}^n A_i L_i + \alpha \left(\max \left(0, \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n (TS_{ij} - TR_{ij}) \right) \right) + \beta \left(\max \left(0, \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n (\lambda_{ij} - \lambda_{lim,j}) \right) \right) \quad \text{Eq. [19]}$$

Foi adotado o valor 100.000 para os coeficientes α e β . Com isso, não foi necessário verificar a viabilidade de todas as soluções geradas, reduzindo ainda mais o tempo computacional gasto pela heurística proposta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método heurístico proposto foi implementado computacionalmente na linguagem *Python* e executado em um computador INTEL *Core i7* 2.8GHz e 16GB de memória RAM sob o sistema operacional *Windows 10 Home Single Language* 64 Bits. Visando testar e validar a eficiência do método, foi realizado um estudo de caso utilizando um pilar metálico de um galpão, originalmente dimensionado de forma convencional em perfil de aço laminado com seção transversal I. O pilar foi remodelado e redimensionado como uma treliça formada por elementos em perfis tubulares circulares e, as soluções obtidas nos dois casos foram comparadas.

No processo de dimensionamento do pilar foi determinada previamente uma tipologia para a formação da treliça. De acordo com as condições às quais será submetida a estrutura, as tipologias apresentam características que podem ser mais bem aproveitadas. Dentre as tipologias possíveis, a que apresenta menor número de elementos é a do tipo Warren (Martins, 2014), também conhecida como treliça tipo W, composta apenas por banzos e diagonais em “V” e sem a presença de montantes. Esta é a tipologia escolhida para o desenvolvimento deste trabalho. Um exemplo de uma treliça do tipo Warren é apresentado na Figura 5.

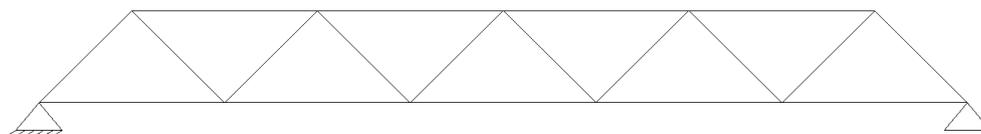


FIGURA 5: Treliça tipo Warren
Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme ressalta Martins (2014), o uso de perfis de seção circular como elementos de treliças mostra-se uma opção bastante eficiente e vantajosa perante os perfis em seção aberta, principalmente quando submetidos a esforços axiais, uma vez que os perfis circulares apresentam um maior raio de giração para uma mesma área de seção transversal, o que lhes proporciona maior rigidez a torção e, conseqüentemente, maior estabilidade lateral. Visto isso, foi adotado esse tipo de perfil para o dimensionamento do pilar. No modelo matemático proposto, a variável de projeto é discreta e, portanto, foi considerada uma lista pré-definida de 30 perfis metálicos tubulares de seção circular com área da seção transversal variando de 3,04 cm² a 135 cm², escolhidos dentre os perfis comerciais disponíveis no catálogo Tubos Estruturais – Seção circular, quadrada e retangular (VALLOUREC, 2018).

Em relação ao material utilizado, tratando-se de perfis tubulares, optou-se por perfis formados em aço segundo a ASMT A501, norma específica da *American Society for Testing and Materials* que determina um padrão de composição e características para a formação de tubos estruturais de aço galvanizados por imersão a quente e sem costura. As características mecânicas do aço ASTM A501 são:

- $f_y = 250$ MPa;
- $f_u = 400$ MPa;
- $E = 200.000$ MPa;
- $G = 77.000.000$ MPa;
- $\gamma = 7.850$ kg/m³.

O pilar escolhido para ser dimensionado pelo método proposto foi extraído do Manual de Construção em Aço – Galpões para Usos Gerais (Pravia et al., 2010). O manual apresenta o dimensionamento das estruturas de um galpão com 54.000 mm de comprimento, 15.000 mm de largura, 7.320 mm de altura, cobertura em duas águas e composto por 8 pórticos de 2 pilares e 2 pórticos de 5 pilares, totalizando 26 pilares. O esquema estrutural do galpão pode ser visto na Figura 6.

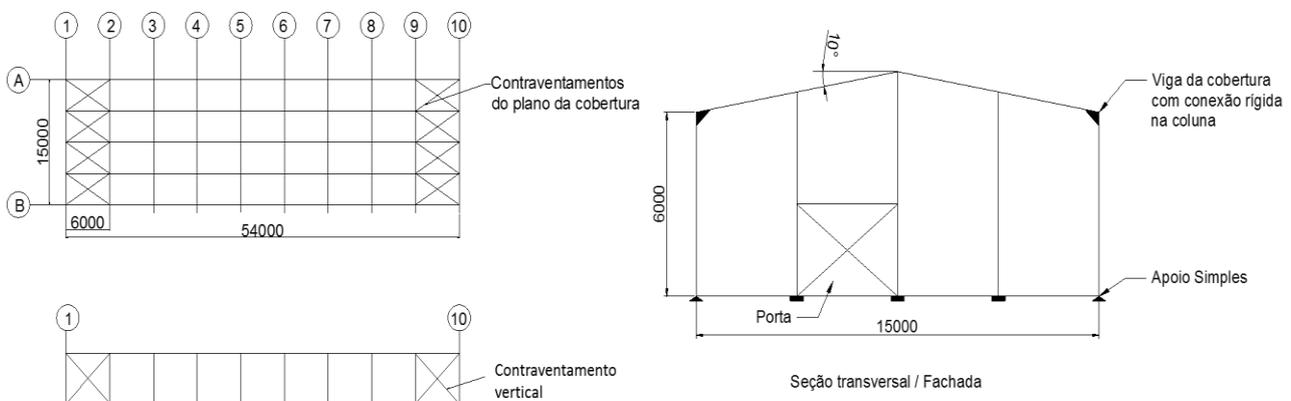


FIGURA 6: Esquema estrutural do galpão (medidas em mm)
Fonte: Elaboração própria a partir de dados de PRAVIA et al (2010).

O pilar selecionado possui 6.000 mm de comprimento e, dentre os pilares que compõe o galpão, é aquele que está sujeito aos maiores esforços solicitantes. No processo de dimensionamento foi selecionado o perfil W310x38,7, o qual foi considerado adequado para suportar os esforços solicitantes de cálculo. Nestas condições, obteve-se um pilar com peso total de 232,2 kg. O dimensionamento dos pilares do galpão foi realizado de forma convencional, ou seja, manualmente.

Para o dimensionamento utilizando o método heurístico, manteve-se as condições originais de carregamento, combinação de cargas resultantes de ações permanente e ações variáveis incidentes sobre a estrutura e propôs-se a substituição do perfil laminado W310x38,7 por uma treliçada metálica

bidimensional, esquematizada na Figura 7. A treliça é composta por 27 elementos e 15 nós configurados segundo a tipologia Warren.

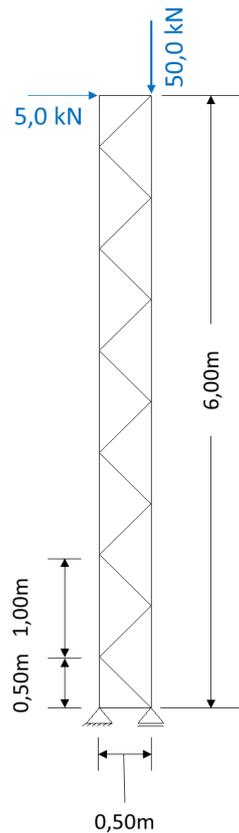


FIGURA 7: Pilar treliçado – esquema estrutural
Fonte: Autoria própria (2020).

Após o processo de dimensionamento, a solução obtida foi um pilar treliçado formado em perfis tubulares circulares, cujo peso total aferido foi de 53,45 kg. Comparando-se os resultados obtidos pelos dois processos de dimensionamento, constata-se uma considerável diferença de 178,75 kg, o que representa uma economia de 76,98% no consumo de aço. Além da análise pura e simples das soluções encontradas nos estudos, há de se considerar o esforço necessário para alcançá-las. Em se tratando de um trabalho realizado com auxílio computacional, o esforço em questão pode ser medido pelo tempo de processamento. O tempo computacional gasto pela heurística para a obtenção do pilar treliçado foi de 1,98 segundos. Demonstrou-se, com base nesses resultados, a eficiência do método.

Desconsiderando que o pilar em questão representa o pior caso, em termos de esforços solicitantes, dentre os que compõem o galpão, e extrapolando a diferença encontrada para o conjunto de 26 pilares, ou seja, padronizando-os segundo o modelo treliçado dimensionado, chega-se a uma economia de 4.647,50 kg somente com o projeto dos pilares. Dadas as circunstâncias, é possível afirmar que esta é uma diferença significativa, não podendo ser ignorada em um projeto deste porte, o que demonstra o potencial em termos de eficiência do método proposto. Levando em conta o tempo computacional gasto para o dimensionamento do pilar analisado, o método gastaria, em média, 51,48 segundos para dimensionar os 26 pilares do galpão.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo propor um método para o dimensionamento de pilares metálicos treliçados formados por perfis tubulares circulares. Buscou-se dimensionar estruturas obedecendo aos

critérios de resistência e, ao mesmo tempo, minimizar o consumo de matéria prima. Para isso, o problema de otimização dimensional a ser resolvido foi formulado e modelado matematicamente. Foram definidas, também, a tipologia para a treliça, o material e as características dos perfis metálicos a serem utilizados. Vista a dificuldade de resolução do problema, optou-se por um método heurístico para o dimensionamento dos pilares, sendo o cálculo dos esforços resistentes e dos limites de esbeltez feitos de acordo com os conceitos do método dos estados limites e seguindo as determinações da NBR8800 (ABNT, 2008).

Visando testar e validar o método heurístico proposto, foi dimensionado um pilar metálico extraído do Manual de Construção em Aço – Galpões para Usos Gerais (Pravia et al., 2010). No manual, o dimensionamento foi feito de forma convencional, obtendo um pilar metálico formado por perfil de aço laminado com seção transversal I de peso igual a 232,2 kg. Utilizando o método heurístico, gerou-se um pilar treliçado formado em perfis tubulares circulares de peso igual a 53,45 kg. Para a obtenção desse dimensionamento, o método gastou um tempo computacional de 1,98 segundos. Comparando-se as soluções obtidas pelos dois processos de dimensionamento, constatou-se uma considerável diferença de 178,75 kg, o que representa uma economia de 76,98% no consumo de material. Extrapolando essa diferença para os 26 pilares do galpão, ou seja, padronizando-os segundo o modelo de pilar treliçado dimensionado, chega-se a uma economia de 4.647,50 kg somente com o projeto dos pilares. Em relação ao tempo computacional, o método heurístico gastaria, em média, 51,48 segundos para dimensionar os 26 pilares do galpão. Portanto, pode-se dizer que o método heurístico proposto foi eficiente no dimensionamento do pilar, obtendo uma solução melhor do que a do referido manual.

Entretanto, o fato de a solução estrutural ser mais leve não necessariamente implica em um menor custo. É preciso considerar outros aspectos na avaliação de viabilidade e economicidade de uma solução como, por exemplo, os custos de transporte, fabricação e montagem, a disponibilidade de fornecedores, a compatibilidade estrutural, a disponibilidade de materiais, a qualificação e disponibilidade da mão de obra, dentre outros, que traduzem a formulação do custo/benefício final e que precisam ser avaliados em cada projeto, a cada caso. É fato, também, que haverá um aumento no tempo computacional à medida que a complexidade da estrutura dimensionada (número de elementos, nós e apoios) também aumenta, comportamento que se enquadra dentro das expectativas lógicas.

O resultado alcançado neste trabalho demonstrou o quão grande é o potencial da metodologia proposta. Foi alcançado um resultado significativo na redução do peso da estrutura antes dimensionada através de métodos convencionais. Isso leva a crer que resultados ainda mais promissores poderão ser alcançados ampliando-se o alcance do método heurístico proposto, atingindo assim as três esferas da otimização estrutural: geométrica, topológica e dimensional, bem como utilizando outras heurísticas no processo de refinamento de soluções.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARROYO, J. E. C. **Heurística e metaheurística para otimização combinatória multiobjetivo**. Tese (Doutorado em engenharia elétrica). Faculdade de engenharia elétrica e de computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002. 231 f.

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

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

CORTÊS, C. F. M. **Otimização de treliças planas**. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2002. 144

DEICHMANN, A. **Otimização dimensional, de forma e topológica de famílias de torres de linhas de transmissão de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2019. 132 f.

GALERIA DA ARQUITETURA. **Arena Castelão**. Disponível em: <https://www.galeriadaarquitetura.com.br/projeto/megaron_/arena-castelao/826>. Acesso em: 22 set. 2021.

GUERRA, C. **Otimização paramétrica de estruturas treliçadas por algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração: Mecânica dos Sólidos). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2008. 111 f.

GUILHERME, C. E. M. **Otimização topológica de treliças e pórticos com restrições de flambagem e flexibilidade**. 2000. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração: Mecânica dos Sólidos). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

HASANÇEBI, O. **Optimization of truss bridges within a specified design domain using evolution strategies**. Engineering Optimization, setembro, 2007, Ankara, Turkey, v. 39, n. 6, 737-756 p.

KRIPKA, M., Z. M. C. PRAVIA, M. M. DIAS, G. F. MEDEIROS. **Minimização do peso de treliças de alumínio pela otimização simultânea da seção transversal dos elementos e da geometria: análise numérica e validação experimental**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.7, n.2, 2013, 19-26 p.

MARTINS, J. D. **Estudo teórico, numérico e experimental de treliças mistas em perfis tubulares**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica). Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2014. 162 f.

MEDEIROS, G. F., M. KRIPKA. **Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas**. Revista CIATEC – UPF, 2012, Passo Fundo, RS, vol.4 (1), 19-32 p.

NEERAJA, D., T. KAMIREDDY, P. S. KUMAR, V. S. REDDY. **Weight optimization of plane truss using genetic algorithm**. 14th ICSET - International Conference on Science, Engineering Technology, 2017, Bandung, Indonésia, 570-578 p.

OLIVIERI, B. P. **Otimização do projeto de pontes protendidas pré-moldadas pelo método dos algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração: Engenharia Civil). Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2004. 131 f.

PFEIL, W., M. PFEIL. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PRAVIA, Z. M. C.; DREHMER G. A.; MESACASA JÚNIOR, E. **Galpões para Usos Gerais**. Rio de Janeiro, RJ: IABr/CBCA, 2010.

REBELLO, Y. C. P. **A Concepção Estrutural e a Arquitetura**. São Paulo, SP: Zigurate, 2000.

SILVA, F. B. S. **Algoritmos genéticos para otimização de estruturas reticuladas baseadas em modelos adaptativos e lagrangeano aumentado**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2011. 186 f.

SOUZA, M. J. F. **Inteligência Computacional para Otimização**. Notas de aula, 2011. Disponível em: <<http://www.iceb.ufop.br/decom/prof/marcone>> (acesso em 24 de nov. de 2019).

VALLOUREC. **Tubos Estruturais – Seção circular, quadrada e retangular**. Disponível em: <<http://www.vallourec.com/countries/brazil/products-and-services/automotive-industrial-tubes/documents/catalogo%20estruturais.pdf>>. Acesso em: 24 Jul. 2018.

VÉLEZ, D. I. A. **Otimização de estruturas reticuladas utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015. 97 f.

WATANABE, R. M. **Treliça**. Notas técnicas digitais. Disponível em: <<http://www.ebanataw.com.br>>. Acesso em: 21 nov. 2018.