

Mariane Isabel Flôr

# **Otimização de Coberturas em Aço de Edifícios Industriais**

Florianópolis

2015



Mariane Isabel Flôr

## **Otimização de Coberturas em Aço de Edifícios Industriais**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheira Civil.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Centro Tecnológico – CTC

Departamento de Engenharia Civil – ECV

Orientador: Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Florianópolis

2015

Flôr, Mariane Isabel

Otimização de Coberturas em Aço de Edifícios Industriais/ Mariane Isabel Flôr. – Florianópolis, 2015-  
84 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Centro Tecnológico – CTC  
Departamento de Engenharia Civil – ECV, 2015.

1. Engenharia Civil. 2. Otimização de Coberturas. 3. Edifícios Industriais. 4. SGA.  
I. Leandro Fleck Fadel Miguel. II. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. III.  
Graduação em Engenharia Civil. IV. Título

Mariane Isabel Flôr

## Otimização de Coberturas em Aço de Edifícios Industriais

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheira Civil.

Trabalho aprovado. Florianópolis, 26 de novembro de 2015:



---

**Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.**  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.**  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Eng. Rafael Rodrigues de Souza**

Florianópolis  
2015



# Agradecimentos

A Rafael Rodrigues de Souza, por toda a ajuda com o processo de otimização.

A Matheus Gonçalves Silva, pelas dicas com o *SGA*.

Ao meu orientador, Leandro Fleck Fadel Miguel, pelas correções, incentivos e por toda paciência e atenção ao longo deste ano.

A Ramon Facchin, pela companhia e por me aconselhar e confortar em todos os momentos de dificuldades e incertezas.

A Caroline Bernardo Silva, Marcela Alejandra Juliani e Maria Luiza Fernandez, pela amizade e pelo companheirismo em todos os momentos, bons ou ruins, ao longo da graduação.

A Isabel de Abreu Flôr, Ilso Redusino Flôr e Fernando Mateus Flôr, por todos os sacrifícios e incentivos que me fizeram chegar até aqui.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.





# Resumo

O presente trabalho apresenta um procedimento de otimização para estruturas de coberturas em aço de edifícios industriais. A formulação baseia-se em determinar telhas, terças, tirantes, contraventamentos dos banzos inferiores e barras a serem utilizados no projeto, como também as coordenadas nodais e o espaçamento entre pórticos que minimizem a massa da cobertura, e por consequência, o consumo de aço. Para tanto, utiliza-se o algoritmo de otimização *Search Group Algorithm (SGA)*, ou Algoritmo do Grupo de Busca, obedecendo-se os critérios das normas ABNT NBR6123 (1988) – Forças devidas ao vento em edificações e ABNT NBR8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Propõem-se dois problemas, nos quais primeiramente se busca a cobertura com menor massa por meio da otimização dimensional, em seguida pela otimização dimensional em conjunto com a geométrica, e por último pela otimização dimensional em conjunto com a geométrica considerando o número de pórticos como variável. Os resultados mostraram a importância de se considerar o número de pórticos como uma variável de projeto, assim como o melhor espaçamento entre terças, devido a sua influência nas telhas e estas na massa final da cobertura.

**Palavras-chave:** otimização. estruturas de coberturas. edifícios industriais. aço. *SGA*.



# Abstract

This paper presents an optimization procedure of steel roofing structures for industrial buildings. The formulation is based on determining tiles, purlins, risers, bracing of the bottom chord and bars to be used in the design, as well as nodal coordinates and the spacing between frames to minimize the roofing mass, and therefore decreasing steel consumption. To do so, it uses the optimization algorithm named Search Group Algorithm (SGA), and follows the criteria of ABNT NBR6123 (1988) - Building construction - Bases for design of structures - Wind loads - Procedure and ABNT NBR8800 (2008) - Design of steel and composite structures for buildings. It proposes two problems, in which firstly seeks to the roofing a smaller mass through size optimization, then through size optimization together with shape optimization and at last through size optimization together with shape optimization considering the number of frames as a variable. The results showed the importance of considering the number of frames as a design variable, as well as the best spacing between purlins due to its influence on tiles and these on the roofing structures final mass.

**Keywords:** optimization. roofing structures. industrial buildings. steel. *SGA*.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Tipos de Otimização Estrutural – Treliças . . . . .	19
Figura 2 – População Inicial gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional	32
Figura 3 – População Inicial: Quanto maior o círculo, melhor é a função objetivo do indivíduo . . . . .	32
Figura 4 – Grupo de Busca Inicial: Exemplo composto por cinco membros . . . . .	33
Figura 5 – Geração das famílias dos indivíduos do Grupo de Busca nas Iterações Globais . . . . .	34
Figura 6 – Geração das famílias dos indivíduos do Grupo de Busca nas Iterações Locais . . . . .	34
Figura 7 – Mutação do Grupo de Busca . . . . .	35
Figura 8 – Pseudo-código do <i>SGA</i> . . . . .	36
Figura 9 – Graus de Liberdade de um Elemento de Treliça Plana . . . . .	39
Figura 10 – Estruturas para Edifícios Industriais: Cobertura e Pilares Entrelaçados	41
Figura 11 – Estruturas para Edifícios Industriais: Treliças e Pilares em Perfis <i>I</i> . . .	41
Figura 12 – Estruturas para Edifícios Industriais: Vigas em Perfis <i>I</i> e Pilares Entrelaçados . . . . .	42
Figura 13 – Estruturas para Edifícios Industriais: Vigas e Pilares em Perfis <i>I</i> . . . . .	42
Figura 14 – Direções dos Esforços de Vento – Vista superior . . . . .	44
Figura 15 – Detalhe Genérico – Região de Cargas para uma Terça . . . . .	45
Figura 16 – Detalhe Genérico – Região de Cargas para um Tirante . . . . .	45
Figura 17 – Detalhe Genérico – Cargas Concentradas em uma Treliça . . . . .	45
Figura 18 – Detalhe Genérico – Contraventamento do Banzo Inferior de uma Treliça	46
Figura 19 – Coberturas do Edifício Industrial . . . . .	49
Figura 20 – Treliça – Problema 1 . . . . .	50
Figura 21 – Numeração de Barras e Nós da Treliça – Problema 1 . . . . .	50
Figura 22 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional – Problema 1 . . . . .	51
Figura 23 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 1	53
Figura 24 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1 . . . . .	57

Figura 25 – Comparações das Treliças: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1 . . . . .	58
Figura 26 – Massas Finais das Otimizações Realizadas - Problema 1 . . . . .	58
Figura 27 – Treliça – Problema 2 . . . . .	59
Figura 28 – Numeração de Barras e Nós da Treliça – Problema 2 . . . . .	59
Figura 29 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional – Problema 2 . . . . .	60
Figura 30 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2 . . . . .	63
Figura 31 – Comparações das Treliças: Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2 . . . . .	64
Figura 32 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2 . . . . .	67
Figura 33 – Comparações das Treliças: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2 . . . . .	68
Figura 34 – Massas Finais das Otimizações Realizadas - Problema 2 . . . . .	68
Figura 35 – Seção Típica – Cantoneira de Abas Iguais . . . . .	82
Figura 36 – Seção Típica – Perfil <i>U</i> Formado a Frio . . . . .	82
Figura 37 – Seção Típica – Barra Redonda Trefilada . . . . .	83
Figura 38 – Seção Típica – Telha Trapezoidal 40 . . . . .	84

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Grupos de Simetria da Treliça – Problema 1 . . . . .	51
Tabela 2 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional – Problema 1 . . .	52
Tabela 3 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional – Problema 1 . . . .	52
Tabela 4 – Perfis Resultantes – Otimização Dimensional – Problema 1 . . . . .	52
Tabela 5 – Resultados das Massas da Dimensional e Geométrica – Problema 1 . .	54
Tabela 6 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Pro- blema 1 . . . . .	54
Tabela 7 – Perfis Resultantes e Altura da Treliça – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 1 . . . . .	54
Tabela 8 – Resultados das Massas da Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1 . . . . .	56
Tabela 9 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1 . . . . .	56
Tabela 10 – Perfis Resultantes, Altura e Número de Pórticos – Otimização Dimensi- onal e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1 . . . . .	56
Tabela 11 – Comparações das Massas: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1 . . . . .	57
Tabela 12 – Grupos de Simetria da Treliça – Problema 2 . . . . .	60
Tabela 13 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional – Problema 2 . . .	61
Tabela 14 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional – Problema 2 . . . .	61
Tabela 15 – Perfis Resultantes – Otimização Dimensional – Problema 2 . . . . .	61
Tabela 16 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2 . . . . .	63
Tabela 17 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Pro- blema 2 . . . . .	63
Tabela 18 – Perfis Resultantes e Altura da Treliça – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2 . . . . .	64

Tabela 19 – Comparações das Massas: Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2 . . . . .	64
Tabela 20 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2 . . . . .	66
Tabela 21 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2 . . . . .	66
Tabela 22 – Perfis Resultantes, Altura e Número de Pórticos – Otimização Dimensi- onal e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2 . . . . .	67
Tabela 23 – Comparações das Massas: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2 . . . . .	67
Tabela 24 – Comparação dos Preços das Treliças e Telhas . . . . .	70
Tabela 25 – Perfis Cantoneira de Abas Iguais . . . . .	82
Tabela 26 – Perfis <i>U</i> Formados a Frio . . . . .	83
Tabela 27 – Perfis de Barras Redondas Trefiladas – Tirante . . . . .	83
Tabela 28 – Perfis de Barras Redondas Trefiladas – Contraventamento dos Banzos Inferiores . . . . .	83
Tabela 29 – Perfis de Telhas Trapezoidais 40 . . . . .	84



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Generalidades</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>20</b>
1.2.1	Objetivos Gerais	20
1.2.2	Objetivos Específicos	21
<b>1.3</b>	<b>Método</b>	<b>21</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>22</b>
<b>1.5</b>	<b>Notações Adotadas</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>APRESENTAÇÃO DO ALGORITMO OTIMIZADOR SGA</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Parâmetros de entrada</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>População Inicial</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Grupo de Busca</b>	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>Iterações Globais</b>	<b>33</b>
<b>3.5</b>	<b>Iterações Locais</b>	<b>33</b>
<b>3.6</b>	<b>Mutação</b>	<b>34</b>
<b>3.7</b>	<b>Pseudo-código do SGA</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>FORMULAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Problema de Otimização</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise estrutural</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Casos de Carregamentos</b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>40</b>
<b>4.5</b>	<b>Considerações</b>	<b>41</b>
<b>4.6</b>	<b>Propriedades</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>PROBLEMAS ESTUDADOS</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Problema 1</b>	<b>50</b>
5.1.1	Otimização Dimensional	51

5.1.2	Otimização Dimensional e Geométrica . . . . .	53
5.1.3	Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos	55
<b>5.2</b>	<b>Problema 2 . . . . .</b>	<b>59</b>
5.2.1	Otimização Dimensional . . . . .	60
5.2.2	Otimização Dimensional e Geométrica . . . . .	62
5.2.3	Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos	65
<b>5.3</b>	<b>Discussão . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A – PROPRIEDADES DOS PERFIS ADOTADOS . .</b>	<b>81</b>
<b>A.1</b>	<b>Cantoneiras de Abas Iguais . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>A.2</b>	<b>Perfis <i>U</i> de Chapas Dobradas . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>A.3</b>	<b>Barras Redondas Trefiladas . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>A.4</b>	<b>Telhas Trapezoidal 40 . . . . .</b>	<b>81</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Generalidades

Busca-se cada vez mais praticidade e rapidez para a execução de estruturas, e as treliçadas, por serem leves e de fácil montagem, vêm ganhando espaço e importância econômica. Além disso, são versáteis, sendo adaptáveis à diversas situações. As suas aplicações mais comuns são em pontes, torres, guindastes e estruturas de coberturas (DOMINGUEZ; STIHARU; SEDAGHATI, 2006).

O aço, devido às suas características, possibilita a execução de estruturas mais esbeltas, se comparadas com as de madeira ou de concreto. Desta forma, tem-se uma ótima relação entre o vão da estrutura e seu peso próprio (GERDAU, 2004). Os edifícios industriais, ou galpões, em sua maioria, possuem suas estruturas em aço. Isto, pois, por serem geralmente de único pavimento, resultam em estruturas mais leves, de fácil execução e com fundações mais simples.

Os edifícios industriais costumam ser constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos regularmente espaçados, com a cobertura apoiada em terças e vigas ou treliças (BELLEI, 2004), o que possibilita a construção de grandes áreas cobertas, criando regiões de importância econômica. Isto em razão de serem utilizados para fins industriais, agrícolas e comerciais, como para lojas, estacionamentos e centros de distribuição (CBCA, 2010).

Dentre os possíveis carregamentos atuantes em estruturas metálicas, um dos mais importantes a ser considerado é a ação do vento, principalmente se não houver as ações de pontes rolantes (BELLEI, 2004). Isto devido à pouca massa que possuem. Por serem leves e esbeltas, são sensíveis aos esforços de sucção gerados pelo vento e aos devidos à carga móvel resultante da ponte rolante. Logo, segundo Bellei (2004), coloca-se a estrutura sob risco de colapso ao se negligenciar esses carregamentos.

Visando a diminuição dos custos de construção e a conservação dos recursos naturais, busca-se cada vez mais a otimização da utilização de materiais na Construção Civil. Sem comprometer a eficiência das estruturas, as mesmas devem continuar atendendo os requisitos pelos quais foram projetadas. Segundo Sonmez (2011), para atingir este objetivo, através das últimas cinco décadas, muitas técnicas de otimização têm sido

aplicadas com sucesso em uma ampla gama de problemas de otimização estrutural.

A otimização estrutural pode ser definida como um conjunto de ferramentas matemáticas iterativas que ajudam no dimensionamento da estrutura (ARORA, 2012). Estas são utilizadas de forma a buscar o perfil da estrutura com o melhor comportamento possível, de forma que satisfaça as condições de esforços e restrições fornecidas.

Muitos problemas de engenharia têm diversas soluções possíveis, e selecionar a que se adeque melhor pode ser uma tarefa complicada (SONMEZ, 2011). Isto acontece, pois os problemas do mundo real de projeto de engenharia são modelados com base em diversas variáveis e possuem uma grande quantidade de configurações e considerações que podem ser adotadas. Com base nisto, podem ser classificados e formulados como problemas de otimização multiobjetivo. Esse termo, segundo Kelesoglu (2007), pode ser aplicado em todas as áreas de engenharia, mas foi originalmente utilizado para a otimização de estruturas de engenharia civil.

Pode-se otimizar as estruturas, como visto em Rajan (1995) e ilustrado na Figura 1, nos seguintes fatores:

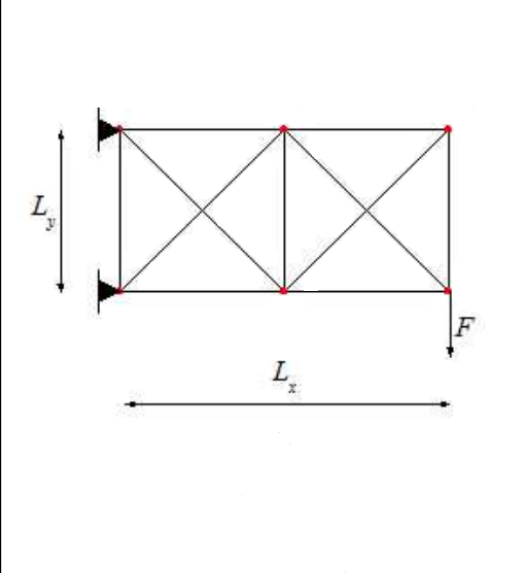
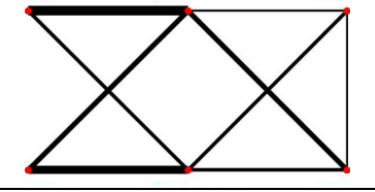
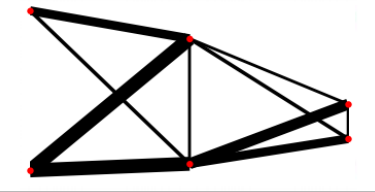
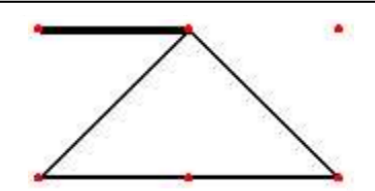
- (i) Otimização dimensional, cuja modificação é feita nas dimensões das seções transversais dos elementos que integram a estrutura;
- (ii) Otimização geométrica, quando a forma das estruturas é variável, ou seja, as posições das coordenadas dos nós podem ser modificadas. Contudo, não há a retirada de nós ou elementos, apenas pode-se gerar um traçado melhorado;
- (iii) Otimização topológica, podendo-se citar para o caso de estruturas treliçadas o *Ground Structure*, cujos elementos e nós tidos como desnecessários à estrutura são retirados.

Embora as três otimizações possam ser discutidas separadamente, para Deb e Gulati (2001), a forma mais eficiente de projetar a otimização de estruturas treliçadas é considerar todos os três métodos de otimização simultaneamente. Isto se deve ao fato de que há uma combinação das melhorias geradas em cada situação, culminando em resultados mais aprimorados.

Segundo Arora (2012), todo modelo estrutural que passa por um processo de otimização matemático possui: uma ou mais função objetivo, as variáveis de projeto e as restrições de projeto.

No caso de otimização estrutural, a função objetivo é uma função matemática que define, através das variáveis de projeto e das características da estrutura, a propriedade

Figura 1 – Tipos de Otimização Estrutural – Treliças

		<b>Dimensão</b>
		<b>Geometria</b>
		<b>Topologia</b> <i>(Ground Structure)</i>

Fonte: Adaptado (TORII; LOPEZ; BIONDINI, 2012; LOPEZ et al., 2014)

que será minimizada. Para Dominguez, Stiharu e Sedaghati (2006), esta função descreve os critérios de desempenho, os quais geralmente estão em conflito. Pode-se considerar como função objetivo a massa da estrutura (TANG; TONG; GU, 2005), o custo final da construção ou o volume de material (GRIERSON; PAK, 1993).

As variáveis de projeto são os aspectos da estrutura que irão sofrer variações para que se possa alcançar o modelo otimizado. No geral, costuma-se adotar como variáveis as dimensões das seções transversais das barras, as coordenadas nodais ou a conexão entre os elementos (GRIERSON; PAK, 1993). Contudo, para estruturas de coberturas, deve-se dedicar particular atenção ao espaçamento entre pórticos, visto que influencia diretamente as demais variáveis. O dimensionamento das estruturas de composição da cobertura e boa parte das verificações normativas são em função desta característica.

As restrições de projeto são as condições impostas que limitam o comportamento da estrutura (GRIERSON; PAK, 1993). Variam conforme os diferentes tipos de estruturas e são balizadas por critérios mecânicos, tecnológicos, econômicos e normativos.

Segundo Rajeev e Krishnamoorthy (1992), Salajegheh e Vanderplaats (1993), Wu e Chow (1995), Galante (1996), Dominguez, Stiharu e Sedaghati (2006), em problemas mais práticos de engenharia, as variáveis de projeto são discretas. Dado que as seções de perfis ou espessuras de chapas são selecionadas com base no que está disponível no mercado. Por outro lado, as coordenadas nodais podem ser discretas, mas costuma-se restringi-las a

certos intervalos de valores. Estas considerações são devidas ao fato de se procurar por uma estrutura exequível, não apenas matematicamente viável.

Desta forma, muitos projetos podem ter variáveis mistas, ou seja, discretas e contínuas na mesma formulação. E ainda, pode-se ter um problema não linear e não convexo, com muitos mínimos locais (TORII; LOPEZ; BIONDINI, 2012; MIGUEL; LOPEZ; FADEL MIGUEL, 2013). Em consequência, vários algoritmos heurísticos têm sido utilizados no processo de otimização, dentre eles os algoritmo genético (*GA*) (LOPEZ et al., 2014), pois possuem bom desempenho nestas situações.

Os algoritmos genéticos são mecanismos de busca e, para tanto, utilizam métodos probabilísticos (WU; CHOW, 1995). Foram inspirados nos processos da genética orgânica e na seleção natural darwiniana (RAJEEV; KRISHNAMOORTHY, 1992), principalmente no que diz respeito às mutações, à variabilidade e à escolha dos mais aptos. Segundo Goldberg (1989 apud RAJEEV; KRISHNAMOORTHY, 1992), os algoritmos genéticos possuem diversas vantagens, dentre elas, pode-se destacar que possuem uma busca aleatória; pesquisam a partir de uma população de pontos em vez de por um único ponto de melhoria, assim, aumenta o espaço de busca, evitando estagnação em algum mínimo local; usam informações da função objetivo sem necessitar de qualquer informação de gradiente, ou seja, não necessitam da presença de versores que indiquem os pontos de máximo.

Utilizou-se o algoritmo *Search Group Algorithm (SGA)*, desenvolvido por Gonçalves, Lopez e Miguel (2015), que demonstrou ótimo desempenho quando aplicado em problemas clássicos da literatura.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Otimizar coberturas em aço utilizadas em edifícios industriais, afim de diminuir sua massa, e por consequência, o consumo de aço, obedecendo os critérios das normas ABNT NBR6123 (1988) – Forças devidas ao vento em edificações e ABNT NBR8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- (i) Otimizar dimensionalmente coberturas para um edifício industrial, modificando as dimensões das seções transversais das barras das treliças, das terças, das telhas, dos tirantes e dos contraventamentos dos banzos inferiores;
- (ii) Otimizar dimensional e geometricamente coberturas para um edifício industrial, modificando as dimensões das seções transversais de todos os elementos das mesmas e as coordenadas dos nós das treliças;
- (iii) Definir o número de pórticos para o edifício industrial, em função da variação do espaçamento entre os mesmos;
- (iv) Comparar os resultados obtidos.

## 1.3 Método

Inicialmente, analisou-se treliças em aço comumente utilizadas em cobertura de edifícios industriais. Fez-se o cálculo manualmente com o apoio de calculadora científica e do *Matlab*<sup>®</sup> para a determinação da matriz de rigidez dos elementos e os esforços presentes nos mesmos. Utilizou-se as normas ABNT NBR6123 (1988) – Forças devidas ao vento em edificações e ABNT NBR8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Em seguida, fez-se um algoritmo no *Matlab*<sup>®</sup> para a realização das verificações de Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço necessárias, conforme as normas já citadas. Concomitantemente, estudou-se sobre otimização e sobre o algoritmo heurístico *SGA*.

Implementou-se o algoritmo *SGA* nos algoritmos desenvolvidos para otimizar a seção transversal de cada elemento de forma independente, buscando a com menor massa. Após, aplicou-o para a otimização dimensional e geométrica, considerando também as coordenadas dos nós e o afastamento entre treliças como variáveis.

Por fim, ampliou-se o problema para a otimização da cobertura como um todo, buscando o dimensionamento otimizado das treliças, terças, telhas, contraventamentos dos banzos inferiores e tirantes.

## 1.4 Organização do Trabalho

**Capítulo 2 – *Revisão de Literatura*:** Descreve-se, resumidamente, algumas publicações encontradas na literatura sobre otimização dimensional, geométrica e topológica de estruturas treliçadas. Destaca-se os autores que otimizam treliças para fins de cobertura, assim como os trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal de Santa Catarina.

**Capítulo 3 – *Apresentação do Algoritmo Otimizador SGA*:** Apresenta-se o algoritmo *SGA* e se descreve o seu funcionamento.

**Capítulo 4 – *Formulação do Problema*:** Formula-se os problemas a serem desenvolvidos, tendo como base a caracterização da otimização, a análise estrutural, os casos de carregamentos atuantes na estrutura, a forma de dimensionamento, as considerações adotadas e as propriedades dos elementos constituintes da cobertura.

**Capítulo 5 – *Problemas Estudados*:** Desenvolve-se a otimização de duas coberturas para um edifício industrial, apresentando os resultados obtidos, assim como as discussões sobre os mesmo.

**Capítulo 6 – *Conclusão*:** Realiza-se as conclusões acerca do apresentado no trabalho.

**Capítulo 7 – *Trabalhos Futuros*:** Elenca-se os possíveis trabalhos futuros.

## 1.5 Notações Adotadas

As notações adotadas neste trabalho são apresentadas a seguir:

- (i) Letras maiúsculas em negrito: matrizes;
- (ii) Letras maiúsculas em itálico: variáveis e conjuntos;
- (iii) Letras minúsculas em negrito: vetores;
- (iv) Letras minúsculas em itálico: funções, variáveis e parâmetros.



## 2 Revisão de Literatura

A otimização de estruturas treliçadas vem sendo discutida desde o início da utilização de computadores em projetos de engenharia, e nas últimas décadas vem ganhando mais enfoque nas pesquisas acadêmicas. Porém, a maioria dos exemplos encontrados na literatura resolvem problemas simples e com poucas restrições, não sendo aplicáveis para situações reais. Dentre as pesquisas de estrutura treliçadas, poucas são as treliças de coberturas encontradas, e nessas, nem sempre são considerados o dimensionamento de telhas, terças e contraventamentos, ou ainda, os esforços gerados por sobrecargas e vento. E como pode ser visto a seguir, em poucas situações as restrições normativas são verificadas.

Iniciando pela otimização dimensional de estruturas treliçadas na literatura, Adeli e Kamal (1986) propõem a otimização do peso de cinco estruturas treliçadas com geometrias fixas, empregando a técnica de Programação Geométrica Geral (*GGP – General Geometric Programming Technique*). Nesse método, inicia-se a otimização com todos os elementos da treliça possuindo a mesma área de seção transversal. Posteriormente, Adeli e Kamal (1991) utilizam o *GGP* em outros três exemplos de estruturas treliçadas, também com a geometria fixa, e chegam a conclusão que o algoritmo não exige um ponto de partida viável.

Rajeev e Krishnamoorthy (1992) utilizam o Algoritmo Genético Simples (*SGA – Simple Genetic Algorithm*), proposto por Goldberg (1989), na otimização dimensional com geometria fixa de três estruturas treliçadas, sendo duas de grande porte.

Wu e Chow (1995) assumem que as variáveis da otimização dimensional são discretas e utilizam um algoritmo genético. Resolvem quatro exemplos de estruturas treliçadas, divididas em dois ou três casos cada. Os primeiros casos são com as áreas das seções transversais dentro de um conjunto de valores decimais em progressão geométrica. O último caso é com valores de áreas tabelados, conforme perfis disponíveis. Os exemplos são comparados com os da literatura, mostrando melhor desempenho.

Sonmez (2011) realiza a otimização dimensional baseada no algoritmo colônia de abelhas artificiais (*ABC – Artificial Bee Colony*) para estruturas treliçadas com variáveis discretas. O algoritmo *ABC* é uma técnica de otimização meta-heurística que imita o processo de procura por alimento das abelhas. Quatro problemas estruturais, sendo três

de grande porte, foram resolvidos e os resultados foram comparados com os obtidos por outras técnicas de pesquisa meta-heurísticas, mostrando bom desempenho.

Com relação à otimização dimensional em conjunto com a geométrica, Bennett (1978) usa o método de programação não-linear (*nonlinear programming method*). Mostra a otimização de estruturas treliçadas, uma bidimensional e outra tridimensional.

Salajegheh e Vanderplaats (1993), utilizaram um algoritmo genético para a otimização dimensional e geométrica. Primeiramente assumem que todas as variáveis de concepção são contínuas para executar a otimização. Com os resultados do obtidos, utilizam derivação e limite no mesmo problema para alcançar uma solução discreta. O algoritmo é aplicado em três exemplos: uma treliça plana, uma treliça espacial e uma torre plana.

Galante (1996), utilizando um algoritmo genético, analisa uma treliça de dez barras em duas situações diferentes. Primeiramente, tem-se a otimização dimensional, buscando o menor peso e o número mínimo de tipos de secção transversal tomadas a partir do mercado. Levou-se em conta os limites de tensão de tração e de compressão para os perfis de alumínio. Da mesma forma, mostrou-se a otimização dimensional e geométrica. Em um segundo momento, há uma otimização que busca ser mais realista, considerando, além dos limites de tensão de tração e de compressão, a flambagem e os diferentes limites de esbeltez em barras comprimidas e tracionadas. É mostrada a otimização dimensional e posteriormente dimensional e geométrica.

Soh e Yang (1996) otimizam buscando o menor peso de estruturas treliçadas com a geometria variável. Levam em conta as restrições de projeto relacionadas: às tensões de escoamento e à flambagem nas barras; aos deslocamento dos nós. Quatro exemplos são apresentados para demonstrar a eficiência da abordagem do algoritmo híbrido proposto (considerando lógica difusa) em comparação com a utilização de algoritmos genéticos puros e outros métodos numéricos.

Kelesoglu (2007) propôs um método para a resolução de otimização multiobjetivo difusa de treliças espaciais com um algoritmo genético. Deslocamento, tensão de escoamento, restrições de dimensão mínima, conjuntos difusos e as funções de pertinência que os caracterizam são considerados na formulação do problema. O algoritmo é exemplificado com uma treliça espacial de 56 barras.

Lopez et al. (2014) apresentam uma metodologia para executar a otimização dimensional e geométrica de estruturas treliçadas com a otimização do projeto baseado em confiabilidade (*RBDO – Reliability Based Design Optimization*). Utiliza uma restrição

---

global e o método de superfície de resposta em conjunto com o algoritmo *Firefly (FA)*. Dois exemplos são analisados a fim de mostrar a eficácia do método.

Há, também, a otimização topológica. Kirsch (1989) otimiza a topologia de estruturas treliçadas assumindo zero como o limite mais baixo das seções transversais. Mostra que a topologia ótima pode corresponder a uma solução singular, mesmo para estruturas simples. Formula a análise estrutural pelo método das forças, resultando em uma forma de programação linear (*LP*), desde que sob determinados pressupostos. Em seguida, deriva analiticamente algumas condições e as relaciona com topologias ótimas.

Hajela e Lee (1995) usam algoritmos genéticos no desenvolvimento de topologias de estruturas treliçadas de suporte de carga. Nos problemas abordados, a geometria estrutural é criada a partir de uma especificação de condições de carga e de pontos de apoio disponíveis. As geometrias encontradas devem satisfazer aos requisitos de estabilidade cinemática, além das exigências de resistência estrutural e rigidez. A abordagem é uma adaptação do método de otimização estrutural do solo. Primeiramente são encontradas as topologias com estabilidade cinemática. Posteriormente, são considerados simultaneamente restrições por tensões de escoamento, deslocamentos e flambagem para se encontrar o menor peso.

Rajan (1995) desenvolve um procedimento de otimização de estruturas treliçadas combinando dimensional, geométrica e topológica. Para isto, utiliza um algoritmo genético modificado. Valores discretos e contínuos são usados para definir as áreas transversais das barras. As posições dos nós são tratadas como variáveis contínuas. As conectividades entre os elementos e as condições de contorno são tratadas como variáveis booleanas na otimização topológica. Dois exemplos numéricos são resolvidos para ilustrar a metodologia proposta.

Ohsaki (1995) apresenta um algoritmo de pesquisa global baseado no algoritmo genético para otimização topológica de estruturas treliçadas. A eficiência do método proposto é demonstrada em dois exemplos de treliças planas e é discutido o efeito do custo nodal em topologias ótimas.

Shrestha e Ghaboussi (1998) apresentam uma metodologia que utiliza o algoritmo genético para otimizar estruturas treliçadas que são livres para assumir qualquer geometria e topologia. As áreas das seções transversais, a geometria e os aspectos topológicos são tratados simultaneamente e os comprimentos das barras são considerados variáveis discretas. A metodologia proposta é aplicada a dois exemplos de estruturas treliçadas.

Deb e Gulati (2001) buscam as seções transversais, a topologia e a geometria ideais

de estruturas treliçadas bidimensionais e tridimensionais. Para a otimização são utilizados algoritmos genéticos. Apresentam um princípio de exclusão de elementos para obter diferentes topologias e apresentam o conceito de nós básicos e não básicos. Consideram restrições por tensão de escoamento, deformação e estabilidade cinemática. Os exemplos apresentados encontram estruturas treliçadas ótimas ou quase ótimas, possuindo peso menor do que aquelas que são relatadas na literatura.

Tang, Tong e Gu (2005) apresentam esquemas de codificação mistas devido à natureza das variáveis discretas e contínuas das otimizações dimensional, geométrica e topológica propostas. Exemplos são resolvidos e os resultados numéricos, ao serem comparados com os da literatura, demonstram que o algoritmo genético reforçado com as codificação mistas é eficaz.

Dominguez, Stiharu e Sedaghati (2006) utilizam algoritmo genético para a otimização simultânea da seção transversal, da geometria e da topologia de estruturas treliçadas. O método dos elementos finitos é aplicado para analisar os resultados. As áreas das seções transversais foram extraídas a partir de perfis padrões, de acordo com os códigos *AISC* (*American Institute of Steel Construction*), a fim de obter desenhos realistas. Considerou-se restrições de tensão de escoamento e de esbeltez. Três exemplos ilustram a eficácia do método proposto, sendo um deles uma treliça de cobertura tridimensional.

Torii, Lopez e Biondini (2012) apresentam uma abordagem para otimizar simultaneamente a geometria e a topologia de estruturas treliçadas estaticamente indeterminadas considerando as forças que atuam e a tensão de escoamento das barras como variáveis aleatórias.

Miguel, Lopez e Fadel Miguel (2013) utilizam o algoritmo *Firefly* (*FA*) para otimizar simultaneamente as seções transversais, a geometria e a topologia de estruturas treliçadas. Busca-se a menor massa da estrutura e se impõe restrições de deslocamentos, tensões de escoamento e estabilidade cinemática. Considerou-se um problema de variáveis mistas, pois as áreas das seções transversais são discretas. Os resultados dos exemplos propostos são melhores do que os relatados na literatura.

Shallan et al. (2014) apresentam uma abordagem baseada em algoritmo genético para o projeto ótimo de estruturas treliçadas planas e espaciais submetidas a um conjunto de restrições. A topologia e as seções transversais são estimadas após o uso de critérios de resistência. A abordagem proposta foi aplicada em problemas clássicos da literatura, mostrando bons resultados.

Com relação a otimização de treliças com o objetivo específico de serem utilizadas em estruturas de coberturas, Thomas Jr. e Brow (1977) apresentam um algoritmo que engloba a aplicação de métodos de otimização não-linear elástica, desenvolvido para o projeto de menor custo de sistemas de telhado composto por: treliças de aço, vigas treliçadas e telhas. O método é capaz de projetar treliças rígidas que podem ser fabricadas a partir de diferentes qualidades de aço e vários tipos de seções padrão. O projeto é baseado em valores admissíveis do *AISC (American Institute of Steel Construction)*. Os comprimentos são calculados usando a equação flambagem característica para um elemento cujas extremidades são elasticamente contidas contra a rotação. O procedimento desenvolvido considera alterações nas propriedades mecânicas dos elementos, variações nas seções transversais das barras e variações geométricas na configuração da treliça. Conjuntos de barras podem ser escolhidos para serem idênticos, facilitando a simetria das estruturas. Três exemplos de treliças de cobertura submetidas aos carregamentos de vento e peso próprio são apresentados para demonstrar a flexibilidade e a generalidade da abordagem de algoritmo desenvolvido.

Saka (1991) considera dois casos de carregamento fixos e iguais em todos os exemplos. Compara a otimização de área com a geometria fixa de quatro formas de treliças. Depois de encontrar a melhor forma, para obter uma maior redução no peso, inclui a inclinação do telhado como variável. O método de projeto considera as restrições de deslocamento, de tensões de escoamento, de flambagem e de dimensão mínima.

Koumousis e Georgioui (1994) otimizam dimensional e geometricamente telhados típicos com treliças de aço de edifícios industriais. Utilizam o Algoritmo Genético Simples (*SGA - Simple Genetic Algorithm*) para isto. As telhas de cobertura são otimizadas dimensionalmente através de um programa de lógica. As dimensões do edifício industrial são dados de entrada, assim como a altura total máxima. O número de treliças utilizados para ao longo de toda a cobertura é uma variável livre, assim como os espaçamentos entre as terças e as alturas da treliça. Além destas, as áreas das seções transversais de todos os elementos são consideradas variáveis e devem satisfazer às exigências do *Eurocode nº 3 (1989)* para estruturas de aço. Consideram como forças atuantes na estrutura o peso próprio da mesma, sobrecarga devido à neve e cargas de vento. Os resultados numéricos apresentados mostram a eficácia do método, principalmente com relação a otimização de variáveis discretas.

Sakla e Elbeltagi (2003) apresentam um procedimento para a concepção de cober-

turas em aço sujeitas a cargas não uniformes, tais como as de neve acumulada pela ação do vento (*snowdrift*). Utilizam algoritmos genéticos, que procuram o número ideal ou quase ótimo de terças para o telhado, assim como o espaçamento entre elas que minimize o peso da estrutura. Realizam todas as verificações do *SDI (Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks)* e da *AISC-ASD (American Institute of Steel Construction – Allowable Stress Design)*. Quatro exemplos de aplicações são apresentados para demonstrar as capacidades do modelo. Os dois primeiros são realizados com cargas uniformes de peso próprio e vento, sem considerar a carga de neve. Os dos últimos são similares aos primeiros, porém considerando a carga não-uniforme da neve.

Hamza, Mahmoud e Saitou (2003) abordam a otimização de uma classe de treliças planas com armações em forma de *N*. Este formato apresentada aplicação no mundo real, por isso, evitou-se simplificações que comprometessem a aplicabilidade. Otimizam a topologia, geometria e áreas das seções transversais da treliça. Três implementações de algoritmos genéticos são avaliadas, juntamente com a busca tabu reativa (*RTS – Reactive Taboo Search*). São testados em um exemplo simples e posteriormente comparados. A treliça deste exemplo é submetida a carregamentos de vento e do peso próprio da estrutura, que inclui as barras, os componentes de reforços longitudinais, as terças e uma estimativas de todas as placas de conexão.

Frans e Arfiadi (2014) consideram algoritmos genéticos híbridos para otimizações dimensional, geométrica e topológica de treliça de coberturas. No processo de otimização, o ângulo de inclinação dos banzos superiores é definido como constante, enquanto as coordenadas dos nós são determinadas por meio de algoritmos genéticos. Três exemplos são desenvolvidos considerando cargas pontuais em nós específicos.

Salienta-se, ainda, que o proposto está inserido na linha de pesquisa sobre otimização estrutural, que recentemente vem sendo desenvolvida na Universidade Federal de Santa Catarina (*UFSC*), por meio do Departamento de Engenharia Civil (*ECV*), do grupo de pesquisa Centro de Otimização e Confiabilidade em Engenharia (*CORE*) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (*WGEC*). Dentre os projetos realizados pelo *CORE*, está o algoritmo genético utilizado, *SGA*, de Gonçalves, Lopez e Miguel (2015). A seguir, lista-se as monografias e dissertações desenvolvidas no *ECV/WGEC*.

Carlou (2013) aplica o *Imperialistic Competitive Algorithm (ICA)* na otimização dimensional, geométrica e topológica de três treliças planas metálicas. Verifica a estaticidade, a tensão admissível e as deformações.

---

Assis (2014) adapta o algoritmo *Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA)* para a resolução de problemas de otimização com variáveis mistas e com restrições. O avalia com a resolução de oito problemas clássicos da literatura. As comparações demonstram a eficiência e validade do algoritmo proposto.

Souza (2014) propõe a otimização topológica de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica. Submete a estrutura a oito casos de carregamento e a avaliada segundo restrições normativas. Utiliza os algoritmos *Firefly Algorithm (FA)* e *BSA*, chegando em melhores resultados com o *BSA*. Além disso, calcula o número de parafusos necessários em cada barra da estrutura otimizada.

Ribeiro (2014) otimiza dimensional e geometricamente três exemplos de treliças utilizando o algoritmo *FA*. Compara os resultados com os obtidos na literatura.

Carraro (2015) utiliza o *SGA* para a otimização estrutural de pórticos planos de aço. Desenvolve três problemas já estudados na literatura. Em dois destes, chega a resultados similares ou melhores, com um número menor de iterações. Porém, em um dos problemas, apesar de satisfatório, não é melhor que os presentes na literatura.

Hülse (2015) apresenta um algoritmo que calcula e atualiza a força do vento juntamente com as otimizações dimensionais e geométricas torre de linha de transmissão de energia elétrica. Utiliza o algoritmo heurístico *BSA*.

Carlou (2015) implementa um operador de maximização da rigidez da estrutura com o objetivo de melhorar a convergência de algoritmos meta-heurísticos na otimização dimensional, geométrica e topológica de treliças com variáveis mistas. O algoritmo *ICA* é usado para testá-lo em três problemas clássicos da literatura. Mostra-se eficaz principalmente quando há restrições de deslocamentos máximos.

Além dos apresentados do *ECV/WGEC* sobre otimização, Demarche (2011) descreve os procedimentos para o dimensionamento de um edifício industrial (galpão) em estrutura metálica.

Analisando as publicações citadas, vê-se que a grande maioria utiliza algoritmos genéticos nas suas resoluções, com alguns parâmetros alterados, em busca da estrutura treliçada ótima. Isto se dá pelo bom desempenho dos mesmos com relação aos problemas com variáveis discretas ou mistas, o que acontece em quase todos os casos, já que a maioria dos autores utilizam as áreas de seções transversais das barras de perfis definidos, conforme os disponíveis no mercado.

Constata-se também, o já mencionado por Deb e Gulati (2001), que as otimizações

geométricas em conjunto com as dimensionais tendem a ter melhores resultados do que apenas com as dimensionais. Da mesma forma, considerar todos os três métodos de otimização simultaneamente tende a gerar resultados ainda mais eficientes.

Com relação às treliças de estruturas de coberturas, por possuírem aplicações reais, nota-se uma maior tendência pela utilização de restrições de códigos e normas, em comparações com os exemplos puramente literários. Porém, tendem a otimizar apenas as treliças, com poucos exemplos de dimensionamento de telhas e terças. Ao decorrer deste trabalho se pode perceber a importância das telhas no peso final da cobertura, e otimizar apenas a treliça isoladamente pode não gerar os melhores resultados.

Além do exposto, apenas um dos autores analisados leva em conta o espaçamento entre pórticos como uma variável de projeto. E em nenhum dos casos estudados envolvendo treliças há a atualização nas forças do vento devido as mudanças da inclinação da cobertura durante o processo de otimização.

Este trabalho leva em consideração os fatores apresentados e possui o intuito de gerar contribuições para sanar as limitações por eles gerados, além de incentivar novas pesquisas na área. Com isso, busca otimizar todos os elementos constituintes da cobertura, determinando telhas, terças, tirantes, contraventamentos dos banzos inferiores e barras a serem utilizados no projeto, como também as coordenadas nodais e o espaçamento entre pórticos que minimizem a massa da cobertura. E ainda, para reduzir as incertezas e automatizar a determinação da força do vento, desenvolveu-se um procedimento que corrige, a cada iteração, os parâmetros necessários para o cálculo da mesma, em função das novas características da estrutura.



# 3 Apresentação do Algoritmo Otimizador

## *SGA*

O *Search Group Algorithm (SGA)*, ou Algoritmo do Grupo de Busca, é um algoritmo meta-heurístico de otimização global. Através do ajuste dos seus parâmetros de entrada, pode ter aplicabilidade em diversos problemas.

A seguir, tem-se observações sobre as características e funcionalidades do *SGA*, descritas conforme a publicação de Gonçalves, Lopez e Miguel (2015).

### 3.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada do *SGA*, juntamente com os seus propósitos no processo de otimização, estão listados a seguir:

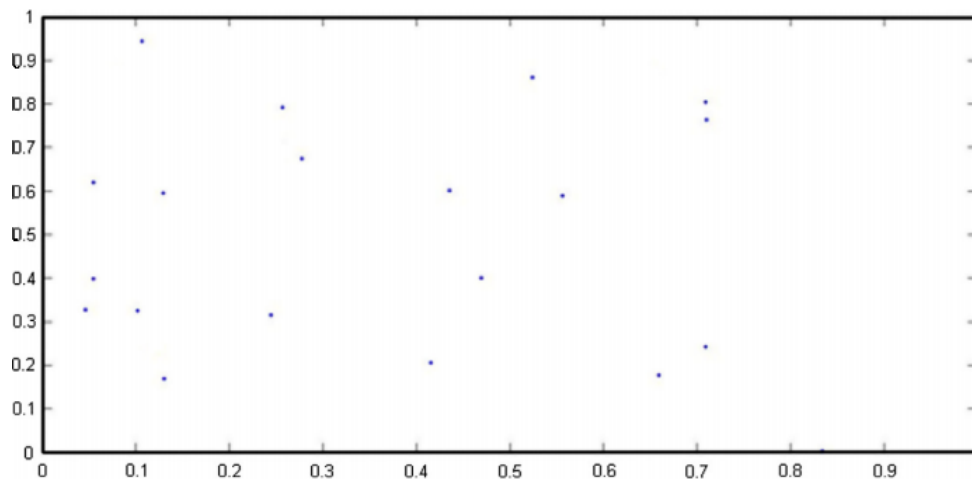
- (i)  $n_{pop}$ : Número de indivíduos na população. Este valor é mantido constante durante todo o processo de otimização. Utilizou-o com o valor 100 em todos os exemplos neste apresentado;
- (ii)  $it^{max}$ : Número máximo de iterações. É o critério de término do processamento e, juntamente com  $n_{pop}$ , define o tempo computacional. Utilizou-o com os valores de 1500, 3000 e 3500;
- (iii)  $it_{global}^{max}$ : Número máximo de iterações da fase global. Quanto mais próximo de um for o valor deste parâmetro, mais avaliações de função serão empregadas para encontrar regiões promissoras. Manteve-se constante com o valor de 0.3, ou seja, 30% do  $it^{max}$ ;
- (iv)  $\alpha^k$ : Controla a distância que um novo indivíduo é gerado a partir do seu membro do grupo de busca. Este parâmetro é responsável pelas capacidades de exploração e aproveitamento do *SGA*. Seu valor diminui ao longo das iterações, refinando as soluções encontradas nas regiões promissoras. Utilizou-o com o valor dois para  $\alpha^0$ ;
- (v)  $\alpha_{min}$ : Valor mínimo para  $\alpha^k$ . Garante uma mobilidade mínima para os novos indivíduos gerados. Utilizou-o com o valor 0.1;
- (vi)  $n_{mut}$ : Número de mutações em cada iteração. É responsável pela capacidade do algoritmo de explorar o espaço de projeto, evitando que o mesmo fique preso em

- mínimos locais. Manteve-se constante com o valor de 3% da população;
- (vii)  $n_g$ : Número de membros do grupo de busca. Manteve-se constante com o valor de 20% da população;

## 3.2 População Inicial

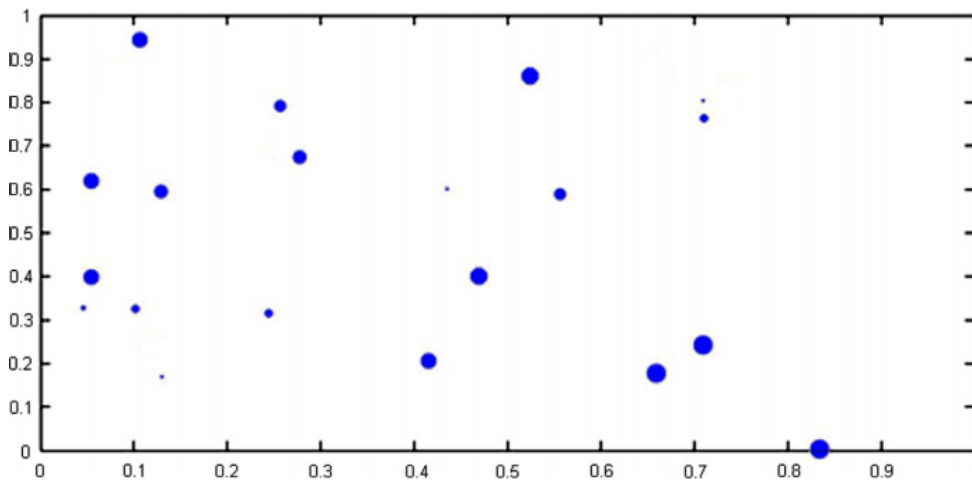
O processo de otimização se inicia com a geração da população inicial, através de pontos aleatórios do domínio da função objetivo (Figura 2), que são avaliados pela mesma (Figura 3) e usados para a formação dos grupos de busca.

Figura 2 – População Inicial gerada aleatoriamente em um domínio bidimensional



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015)

Figura 3 – População Inicial: Quanto maior o círculo, melhor é a função objetivo do indivíduo

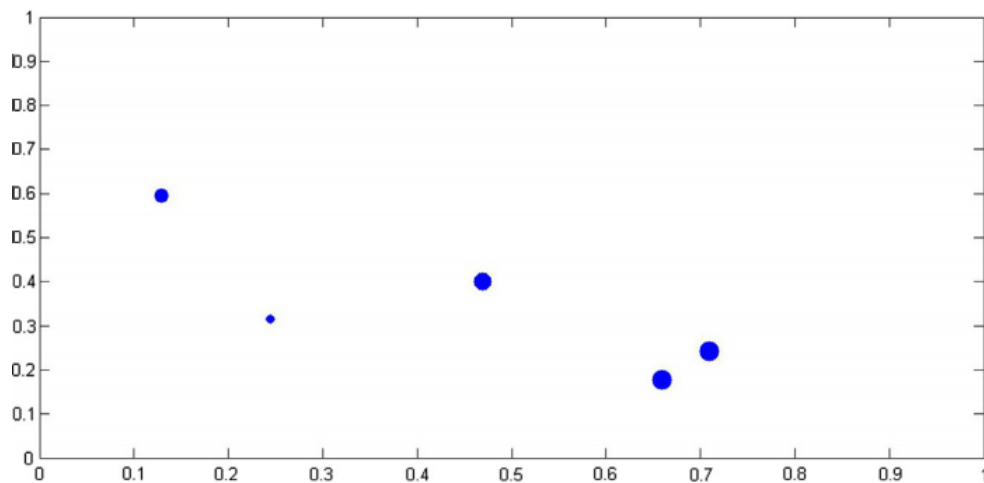


Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015)

### 3.3 Grupo de Busca

O grupo de busca é formado pelos indivíduos que foram selecionado da população e de um grupo gerado aleatoriamente, conforme Figura 4. A seleção acontece em função do bom desempenho no que diz respeito aos menores valores de avaliação da função objetivo.

Figura 4 – Grupo de Busca Inicial: Exemplo composto por cinco membros



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015)

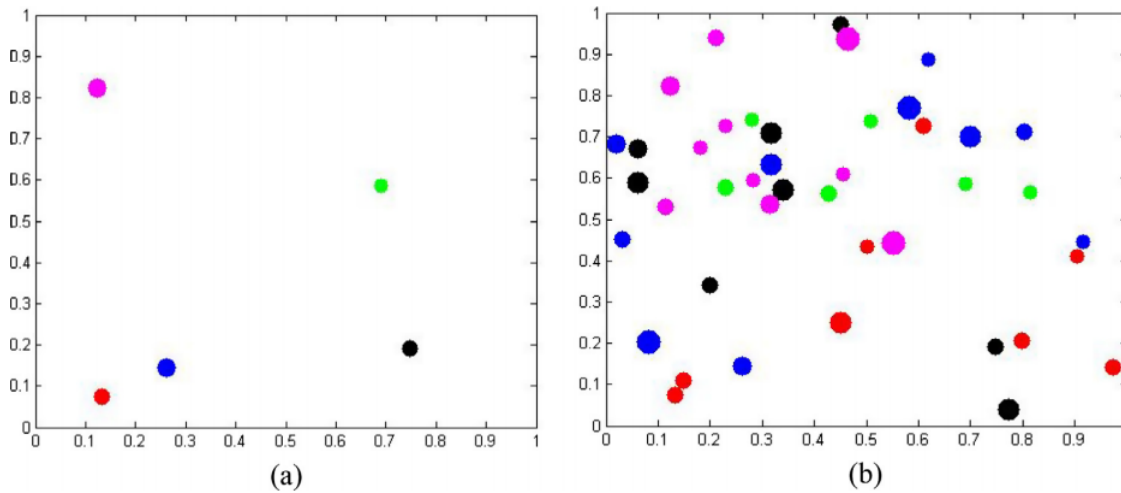
### 3.4 Iterações Globais

Nas iterações globais, cada indivíduo do grupo de busca (Figura 5a) pode gerar uma família de indivíduos (Figura 5b). O novo grupo de busca será composto com um indivíduo de cada família gerada, sendo escolhido o que apresentar o melhor desempenho dentro da mesma.

### 3.5 Iterações Locais

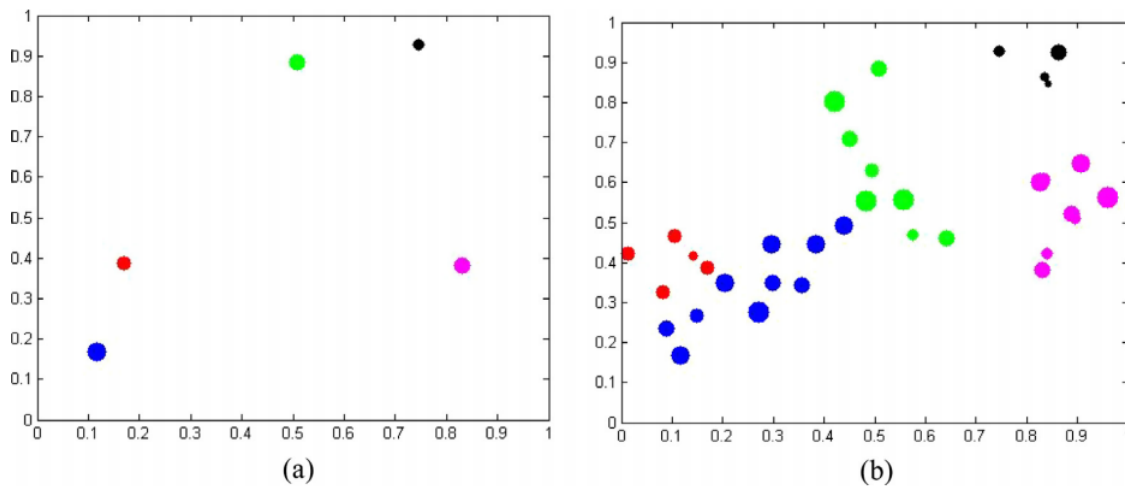
Nas iterações locais, os resultados encontrados nas iterações globais são refinados, pois se busca o valor ótimo da função objetivo. Logo, é esperado que o algoritmo já tenha se estabelecido em regiões de prováveis mínimos. Cada indivíduo do grupo de busca (Figura 6a) gera uma família de indivíduos (Figura 6b), e diferente da etapa global, os indivíduos são avaliados independentemente da sua família de origem, cujos com melhor desempenho formam o novo grupo de busca.

Figura 5 – Geração das famílias dos indivíduos do Grupo de Busca nas Iterações Globais



Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015)

Figura 6 – Geração das famílias dos indivíduos do Grupo de Busca nas Iterações Locais

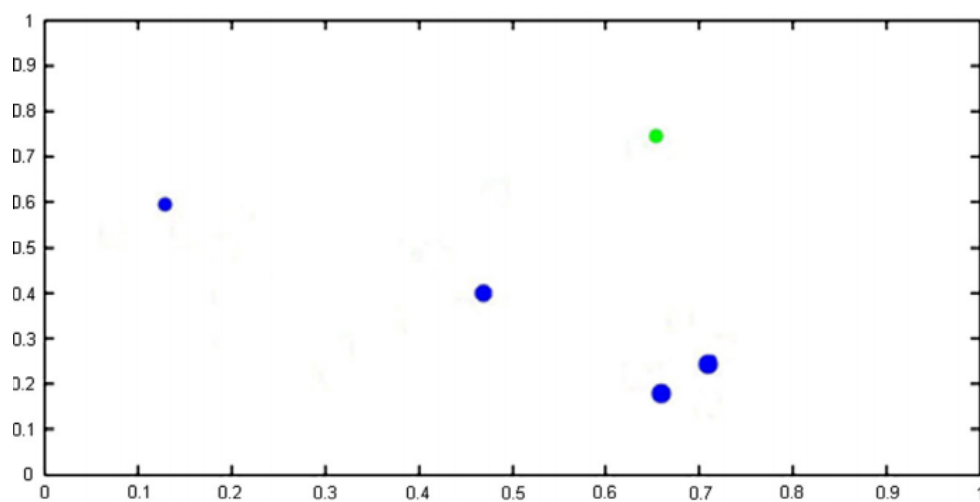


Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015)

### 3.6 Mutação

Os indivíduos do grupo de busca, em cada iteração, podem sofrer mutações antes de gerarem suas famílias. Estas acontecem com a substituição de alguns indivíduos por novos gerados com base na m dia e no desvio padrão do grupo de busca em questão (Figura 7). Desta forma, os indivíduos são separados aleatoriamente em subgrupos, que por sua vez são analisados isoladamente. Cada subgrupo terá seu indivíduo com pior desempenho substituído por algum mutado.

Figura 7 – Mutação do Grupo de Busca

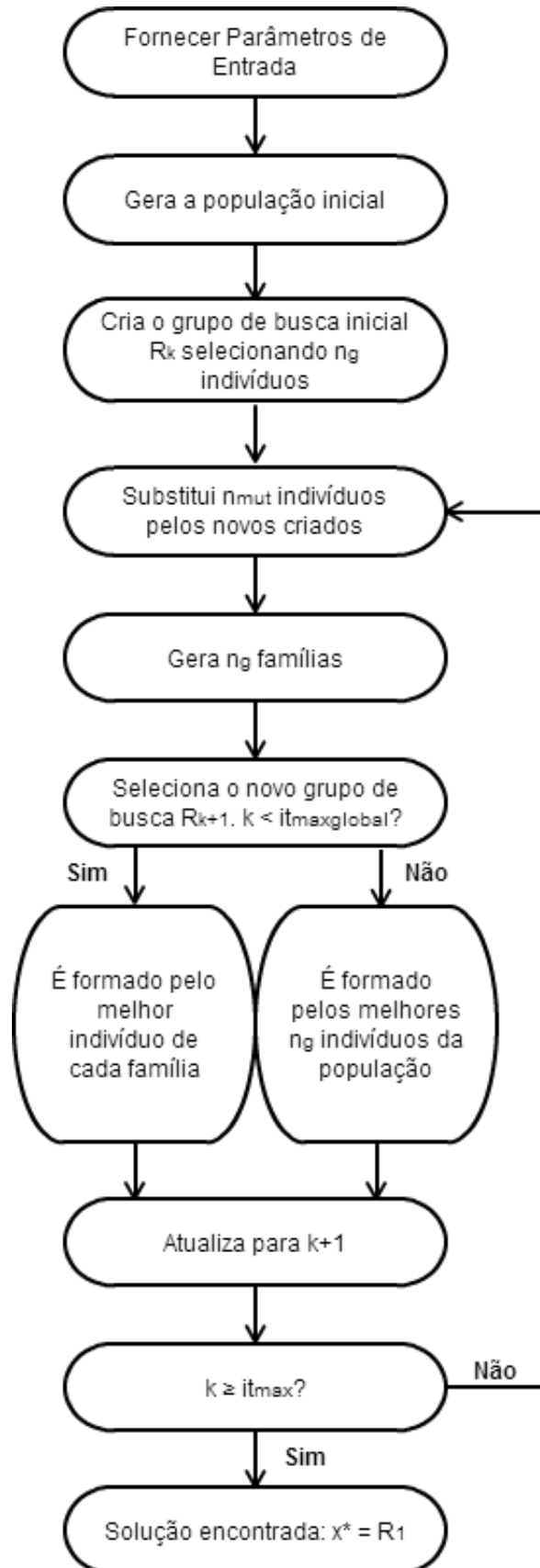


Fonte: (GONÇALVES; LOPEZ; MIGUEL, 2015)

### 3.7 Pseudo-código do SGA

O pseudo-código do SGA pode ser visto na Figura 8, em forma de fluxograma.

Figura 8 – Pseudo-código do SGA



Fonte: Elaborado pela autora, 2015

## 4 Formulação do Problema

Como visto no capítulo 2, existem poucos exemplos na literatura que abordam a otimização de treliças com aplicação em coberturas. Dentre estes, raros são os que dimensionam os outros elementos constituinte de uma cobertura ou, ainda, que consideram o espaçamento entre pórticos como variável.

Pode-se considerar o espaçamento entre pórticos como uma das variáveis de maior impacto na otimização de coberturas. As cargas externas de vento e de sobrecarga que atuam em um telhado são divididas por regiões de influência para cada estrutura que o compõem (telhas, terças, tirantes, contraventamentos e treliças). Assim, quanto mais distantes estão os pórticos, maior é a região de influência de cada estrutura, e por consequência, maior é a carga que recebem. E ainda, maiores são os seus comprimentos, aumentando a possibilidade de instabilidades.

Nos problemas propostos na literatura que envolvem algum tipo de verificação ou restrição normativa, as mesmas são com base no *AISC (American Institute of Steel Construction)* ou no *Eurocode*. Neste presente, por procurar ter uma aplicação no Brasil, utilizou-se as normas ABNT NBR6123 (1988) – Forças devidas ao vento em edificações e ABNT NBR8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Assim, busca-se a otimização do projeto de cobertura para edifícios industriais, visando a redução da massa do mesmo, de modo que os esforços e as restrições normativas sejam realistas e de utilização prática. Para testar o proposto, realizou-se a otimização de áreas e geométrica de duas coberturas utilizando o algoritmo *SGA*.

### 4.1 Problema de Otimização

Um problema genérico de otimização pode ser descrito da seguinte maneira: encontrar um vetor  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , que minimize a função objetivo  $f_{obj} = f(\mathbf{x})$ , estando esta sujeita às restrições  $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$ , com  $i = \{1, \dots, n_{ri}\}$ , e  $h_j(\mathbf{x}) = 0$ , com  $j = \{1, \dots, n_{rd}\}$ , sendo  $n_{ri}$  e  $n_{rd}$  o número de restrições de igualdade e de desigualdade, respectivamente, calculadas de acordo com as normas.

A formulação geral do problema abordado baseia-se em encontrar um conjunto

de perfis a serem utilizados no projeto, assim como as melhores coordenadas dos nós e o espaçamento entre pórticos. Devem atender as restrições normativas, apresentando a configuração viável mais leve.

Desta forma, tem-se um problema com variáveis discretas. Com isto, pretende-se encontrar um vetor, cujos os primeiro valores inteiros representem os perfis, através de índices que os referenciam em uma listagem, e os últimos, arredondados na ordem de centímetros, correspondem aos deslocamentos e ao espaçamento entre pórticos.

Busca-se a cobertura com a menor massa, sendo esta obtida por meio da divisão do menor peso pela gravidade ( $9.806 \text{ m/s}$ ), de modo que atenda todas as restrições normativas impostas. O peso  $w$  é calculado da seguinte forma:

$$w = \gamma \left( \sum_{i=1}^{n_t} a_i \cdot l_i \right) + P \quad (4.1)$$

sendo  $\gamma$  o peso específico do aço,  $a_i$  a área da seção transversal do perfil adotado para o elemento  $i$  e  $l_i$  o seu comprimento,  $n_t$  o número total de elementos e  $P$  um acréscimo de peso (penalidade) devido às restrições do problema.

Aplicou-se os fatores de penalidade em todas as verificações normativas, cujo não cumprimento das mesmas acarreta em acréscimos de peso, sendo proporcionais ao quanto se afastam dos limites admissíveis. No caso de as restrições serem atendidas, as penalidades correspondentes assumem valores nulos. Logo:

$$P = \beta \sum_{i=1}^{n_r} g_i \quad (4.2)$$

sendo  $\beta$  o fator de penalidade,  $g_i$  a  $i$ -ésima restrição e  $n_r$  o número total de restrições. Adotou-se valores na ordem de  $10^9$  para  $\beta$ , de modo a excluir da busca as combinações de perfis que não fossem adequadas.

## 4.2 Análise estrutural

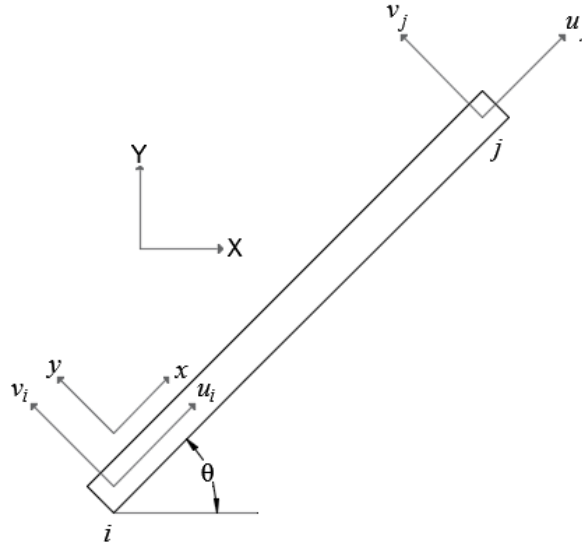
O Método da Rigidez (SORIANO, 2005) foi adotado para a análise estrutural através de uma rotina computacional implementada no *Matlab*<sup>®</sup>. Possui como incógnitas os deslocamentos dos nós e todas as demais variáveis são em função destas. Ainda, considerou-se o material no regime elástico-linear, com pequenas deformações e pequenos deslocamentos.

Tratando-se de um problema de treliças planas e analisando-as em relação ao plano  $xy$ , tem-se que cada nó de cada barra possui dois graus de liberdade, podendo se deslocar



em relação ao eixo  $x$  e ao eixo  $y$ , conforme o apresentado em uma barra genérica na Figura 9.

Figura 9 – Graus de Liberdade de um Elemento de Treliça Plana



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Assim, com base na equação da rigidez:

$$\mathbf{f} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{d} \quad (4.3)$$

Busca-se encontrar o vetor de forças resultantes  $\mathbf{f}$  aplicadas nas barra da treliça, por meio do vetor de deslocamentos  $\mathbf{d}$  dos graus de liberdades e da matriz de rigidez  $\mathbf{K}$  das barras.

### 4.3 Casos de Carregamentos

Considerando a atuação da ação permanente de peso próprio da estrutura em conjunto com as ações variáveis de vento e de sobrecarga, chega-se a dez possíveis combinações de carregamento para o Estado Limite Último Normal, como podem ser vistas nas equações a seguir.

$$\mathbf{F}_{\mathbf{d}} = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{d}} = \gamma_g^V \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{0^\circ} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{d}} = \gamma_g^V \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ \mathbf{d}} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{d}} = \gamma_g^V \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ \mathbf{e}} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{d}} = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} + \psi_0^V \cdot \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{0^\circ} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{F}_d = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} + \psi_0^V \cdot \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ d} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{F}_d = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} + \psi_0^V \cdot \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ e} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{F}_d = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{0^\circ} + \psi_0^{SC} \cdot \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{F}_d = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ d} + \psi_0^{SC} \cdot \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{F}_d = \gamma_g \cdot \mathbf{W} + \gamma_q^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ e} + \psi_0^{SC} \cdot \gamma_q^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.13)$$

sendo  $\mathbf{W}$  o peso próprio da estrutura;  $\mathbf{SC}$  a sobrecarga atuante;  $\mathbf{V}_{0^\circ}$ ,  $\mathbf{V}_{90^\circ d}$  e  $\mathbf{V}_{90^\circ e}$  os esforços de vento atuantes na direção  $0^\circ$  e na direção  $90^\circ$  no sentido direito e esquerdo da cobertura, respectivamente (Figura 14).  $\gamma_g$ ,  $\gamma_q^V$ ,  $\gamma_q^{SC}$  e  $\gamma_q^V$  são coeficientes de ponderação e  $\psi_0^V$  e  $\psi_0^{SC}$  são fatores de combinação, sendo seus valores retirados da ABNT NBR8800 (2008).

Durante o processo de otimização para a resolução dos problemas propostos, considerou-se apenas os casos de carregamentos referentes as equações 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, pois, após uma verificação inicial, constatou-se que eram estes que resultavam nas combinações mais desfavoráveis. Assim, simplificou-se a análise visando a redução do tempo computacional.

Com relação ao Estado Limite de Serviço, considerou-se quatro casos de carregamentos analisados, conformes as equações 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17.

$$\mathbf{F}_{serv} = \mathbf{W} + \psi_1^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{F}_{serv} = \mathbf{W} + \psi_1^V \cdot \mathbf{V}_{0^\circ} + \psi_2^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{F}_{serv} = \mathbf{W} + \psi_1^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ d} + \psi_2^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{F}_{serv} = \mathbf{W} + \psi_1^V \cdot \mathbf{V}_{90^\circ e} + \psi_2^{SC} \cdot \mathbf{SC} \quad (4.17)$$

sendo  $\psi_1^{SC}$ ,  $\psi_1^V$  e  $\psi_2^{SC}$  fatores de redução, encontrados na ABNT NBR8800 (2008).

Em todos os casos citados, no contexto da otimização geométrica, a força de vento considerada nas estruturas da cobertura sofre atualizações, em função das mudanças geradas na inclinação do telhado.

## 4.4 Dimensionamento

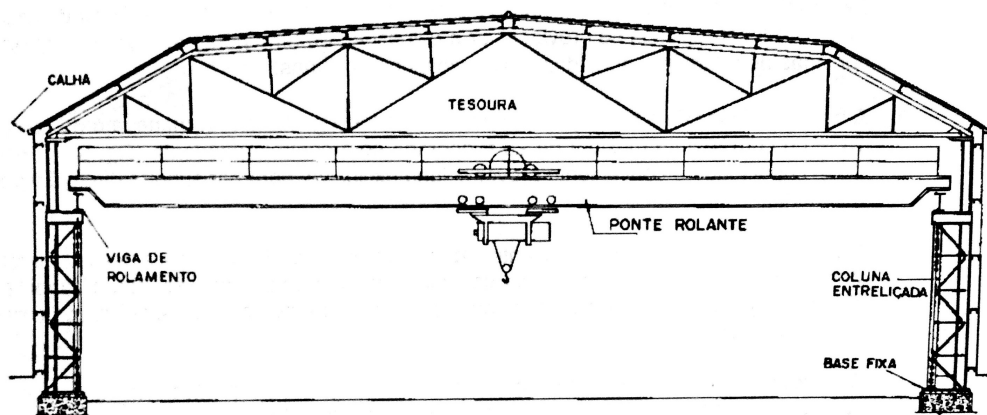
O dimensionamento das estruturas que compõem uma cobertura segue as recomendações da ABNT NBR8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas

de aço e concreto de edifícios, com exceção das terças, pois são formadas por perfis de chapas dobradas a frio. Detalhes e considerações podem ser encontrados na seção 4.5.

## 4.5 Considerações

De um modo geral, existem dois tipos básicos de estruturas para edifícios industriais: reticuladas (formadas por barras) ou em pórtico (com ligações rígidas ou articuladas). As estruturas reticuladas podem possuir: a cobertura e os pilares entrelaçados, conforme Figura 10; a cobertura em treliça e os pilares em perfis *I*, conforme Figura 11; as vigas em perfis *I* e os pilares entrelaçados, conforme Figura 12. Já as estruturas em pórticos podem ser formadas por vigas e pilares em perfis *I*, conforme Figura 13.

Figura 10 – Estruturas para Edifícios Industriais: Cobertura e Pilares Entrelaçados

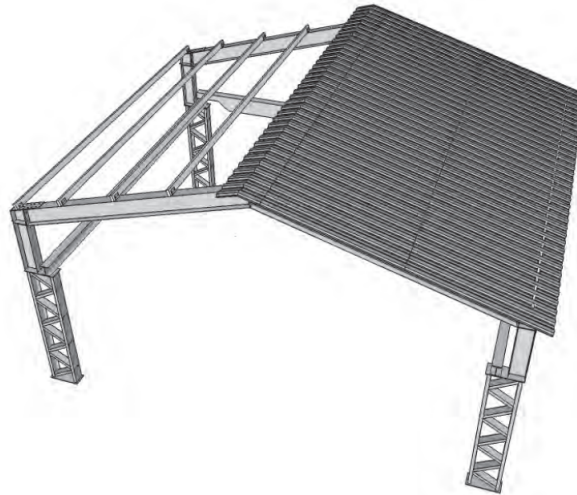


Fonte: (BELLEI, 2004)

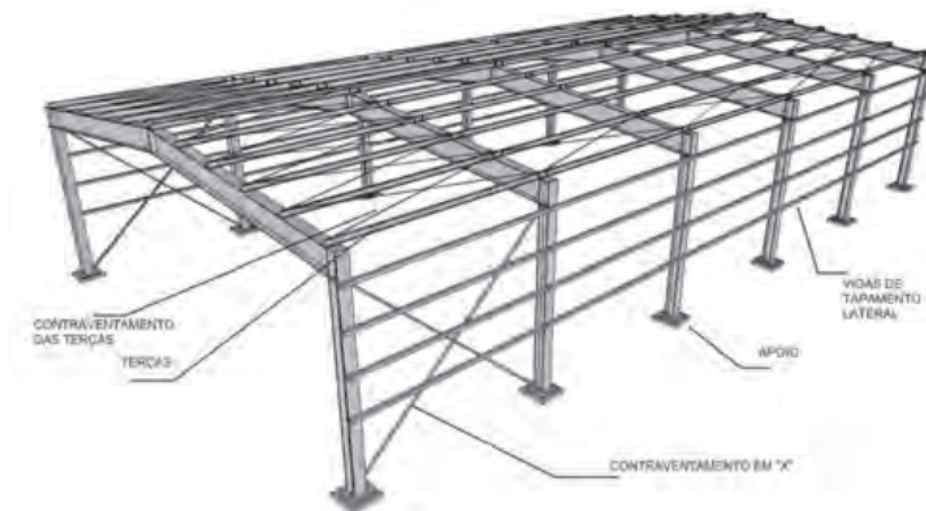
Figura 11 – Estruturas para Edifícios Industriais: Treliças e Pilares em Perfis *I*



Fonte: (CBCA, 2010)

Figura 12 – Estruturas para Edifícios Industriais: Vigas em Perfis *I* e Pilares Entrelaçados

Fonte: (CBCA, 2010)

Figura 13 – Estruturas para Edifícios Industriais: Vigas e Pilares em Perfis *I*

Fonte: (CBCA, 2010)

O edifício industrial considerado possui a cobertura de duas águas e utiliza tesouras ou treliças. Para este, fez-se apenas o dimensionamento da cobertura, não levando em conta o tipo da estrutura de apoio (podendo ser, entre outros, estrutura de concreto armado com fechamento em alvenaria). Somente se considerou os locais onde devem existir apoios, formando assim, uma estrutura reticulada com as treliças de cobertura simplesmente apoiadas. Além disso, não se está considerando a existência de ponte rolante. Para os edifícios industriais com esta necessidade, deve-se fazer verificações de esforços dinâmicos, de fadiga e levar em conta os acréscimos de cargas. Uma alternativa construtiva é apoiar a ponte rolante em vigas de rolamento, e essas em consolos nos pilares (BELLEI, 2004).

Os dados de entrada dos problemas propostos são: as dimensões do edifício industrial, assim como a altura (sem considerar a cobertura); a forma da treliça (*template*) e suas conectividades; as listagens de perfis passíveis de utilização; a velocidade do vento característico da região, assim como as características topológicas do terreno. As variáveis consideradas são as áreas das secções transversais de todos os elementos; as coordenadas nodais das treliças e o espaçamento entre pórticos ao longo de toda a cobertura, quando na otimização geométrica.

A ação permanente que atua na estrutura é formada pelo peso próprio de todos os elementos que a constituem, e pode incluir os pesos de equipamentos e instalações permanentes, caso existam e sejam suportados por ela. No proposto, não foram considerados as ações devidas aos equipamentos nesta situação.

As ações variáveis para sobrecargas em coberturas, segundo o Anexo B da ABNT NBR8800 (2008), podem englobar as cargas resultantes de instalações, de isolamentos e de pequenas peças fixadas na cobertura, com um valor limite de  $50 \text{ N/m}^2$  para este fim. Contudo, o valor da sobrecarga na cobertura deve ter um valor de no mínimo  $250 \text{ N/m}^2$ , o qual foi adotado.

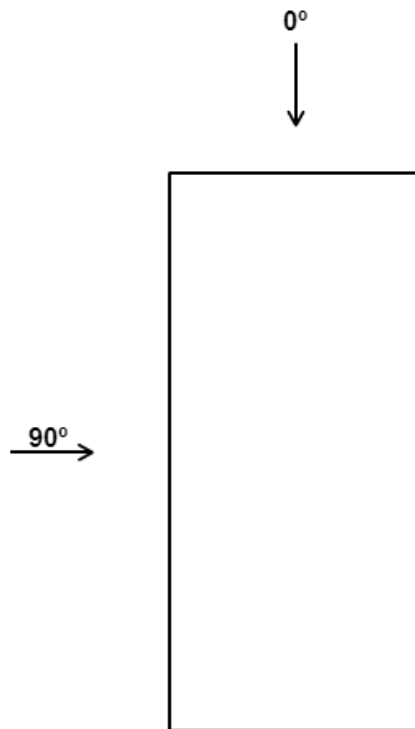
As ações variáveis devidas ao vento foram dimensionadas levando-se em consideração as recomendações da ABNT NBR6123 (1988). Considerou-se casos de carregamentos com esforços de vento à  $0^\circ$  e à  $90^\circ$ , conforme Figura 14.

Supos-se um edifício industrial a ser construído em Florianópolis – Santa Catarina, com velocidade básica do vento de  $43 \text{ m/s}$ , a qual foi retirada das isopletras presentes na ABNT NBR6123 (1988), assim como a ser construído em terreno plano, em uma região com baixo fator de ocupação.

Os esforços devidos ao vento foram corrigidos com base nas alterações da geometria da cobertura. Isto, pois a ausência da atualização pode gerar resultados errôneos. Ao se utilizar um carregamento de vento fixo, ao final do processo, pode-se chegar a uma estrutura superdimensionada, com um acréscimo de massa, indo contra o propósito da otimização. Ou, ainda, a estrutura pode estar subdimensionada, não sendo segura. Assim, com o intuito de minimizar as incertezas e automatizar a determinação da força do vento, desenvolveu-se um procedimento que corrige, a cada iteração, os parâmetros necessários para o cálculo da mesma, em função das novas características da estrutura.

Ainda, para o cálculo das pressões de vento, necessita-se dos coeficientes aerodinâmicos, que são divididos em coeficiente de pressão externa e interna. Os valores desses

Figura 14 – Direções dos Esforços de Vento – Vista superior

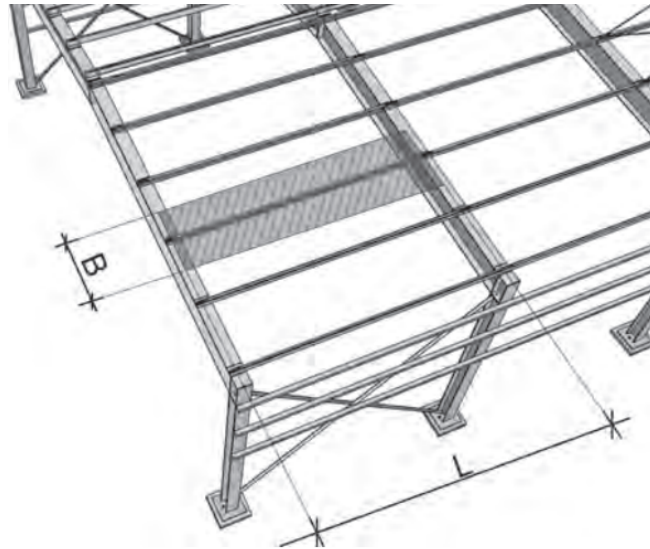


Fonte: Elaborada pela autora, 2015

coeficientes são determinados através de especificações estabelecidas na ABNT NBR6123 (1988). As pressões internas de vento foram definidas com base na inexistência de abertura dominante em qualquer face do galpão e se adotou os coeficientes previstos no item 6.2.5.a da ABNT NBR6123 (1988). Esta é uma simplificação comumente realizada em projetos, mesmo sabendo que normalmente há a previsão de portões nas faces frontais (CBCA, 2003; CBCA, 2010). Contudo, tendo-se as dimensões das aberturas fixas e móveis da edificação, os coeficientes de pressão interna podem ser obtidos de acordo com o Anexo D da ABNT NBR6123 (1988).

Estas ações variáveis são consideradas como cargas uniformemente distribuídas atuando sobre a área de projeção horizontal do telhado. No processo de dimensionamento e otimização, são transformadas em cargas lineares para as terças (Figura 15), tirantes (Figura 16) e contraventamentos, e em concentradas para a treliça (Figura 17), sendo aplicadas nos nós dos banzos superiores que suportam terças. Com relação as ações permanentes, o peso próprio das barras da treliça são divididos igualmente para cada nó de extremidade das mesmas. As terças, os tirantes e os contraventamentos têm seus pesos divididos igualmente entre os nós das treliças nos quais se apoiam ao longo da cobertura.

Figura 15 – Detalhe Genérico – Região de Cargas para uma Terça



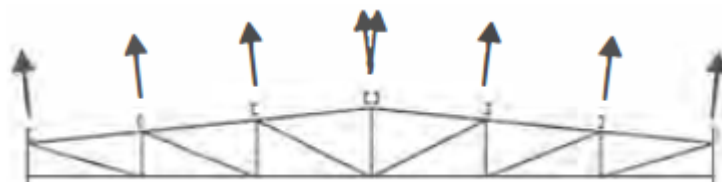
Fonte: (CBCA, 2010)

Figura 16 – Detalhe Genérico – Região de Cargas para um Tirante



Fonte: (CBCA, 2010)

Figura 17 – Detalhe Genérico – Cargas Concentradas em uma Treliça



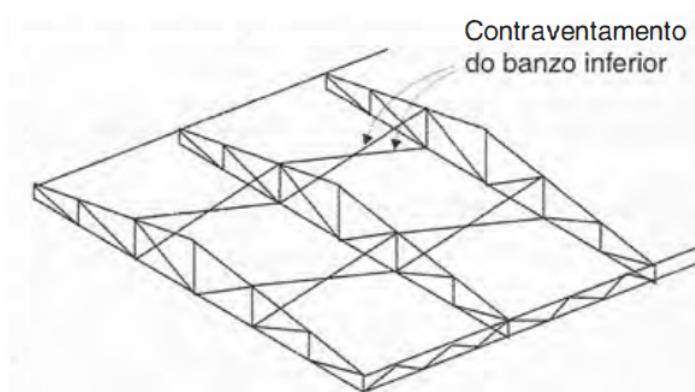
Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2009)

O deslocamento máximo admissível da treliça foi adotado como o de vigas de coberturas, presentes no Anexo C da ABNT NBR8800 (2008), para atender as exigências do Estado Limite de Serviço.

As telhas, as terças, os tirantes e os contraventamentos dos banzos inferiores são dimensionados durante o processo de otimização. Considerou-se perfis laminados, com exceção das terças, para as quais se adotou perfis dobrados a frio, por proporcionar menor peso e maior economia de material (CBCA, 2003). A norma brasileira utilizada, ABNT NBR8800 (2008), não apresenta especificações para estes perfis. Logo, foram verificados pelo método das tensões admissíveis de chapa fina dobrados a frio. Considerou-se que a fixação de telhas sobre as terças gera um travamento nas mesmas, evitando problemas de flambagem lateral e torção. Estas considerações estão conforme o apresentado no CBCA (2003). Adotou-se essa solução, pois proporciona resultados satisfatórios com um código simples, reduzindo o processamento computacional.

Os contraventamentos adotados na estrutura de cobertura são utilizados para a redução do comprimento de flambagem do banzo inferior da treliça (Figura 18), assim como os tirantes, em forma de Y, para redução do comprimento de flambagem das terças no plano da cobertura (Figura 16). Estes são verificados apenas à tração, pois não possuem funcionalidade quando sob compressão. Por serem perfis de barras redondas com extremidades rosqueadas, durante o dimensionamento, verificou-se apenas a menor resistência entre o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção rosqueada. Utilizou-se a recomendação da CBCA (2003) de que o limite do índice de esbeltez não precisa ser avaliado, desde que as barras rosqueadas sejam colocadas com alguma pré-tensão. Os pontos de contraventamento foram estipulados como fixos, para simplificação do modelo, já que a forma (*template*) da treliça também o é.

Figura 18 – Detalhe Genérico – Contraventamento do Banzo Inferior de uma Treliça



Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2009)

Optou-se por simetria em todos os elementos constituintes da cobertura, por questões construtivas e estéticas. Além disso, facilita o dimensionamento ao se utilizar



envoltória dos esforços, principalmente aos devidos ao vento.

As ligações e conexões existentes na estruturas foram estipuladas como soldadas. Esta decisão foi tomada por questões de simplificação do algoritmo propostos, pois, apesar do usual serem conexões parafusadas, o cálculo das mesmas juntamente com o processo de otimização deixaria o problema complexo e com muitas variáveis envolvidas.

## 4.6 Propriedades

Os parâmetros adotados para o dimensionamento das coberturas do edifício industrial são: vão de 15 *m*; comprimento de 48 *m*; pé-direito de 6 *m*; aço *ASTM A36* ou *MR250* com tensão de ruptura  $F_u = 400 \text{ MPa}$  e tensão de escoamento  $F_y = 250 \text{ MPa}$ , módulo de elasticidade  $E = 200 \text{ GPa}$  e peso específico  $\gamma = 77 \text{ kN/m}^3$ .

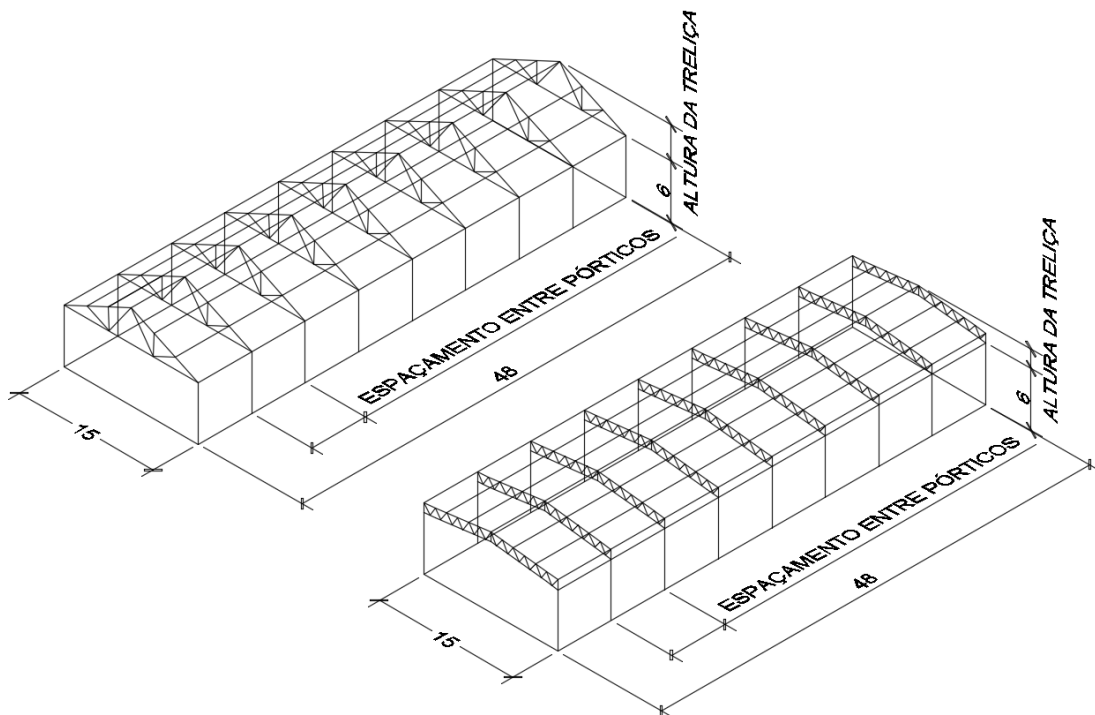
Os perfis das barras das treliças são do tipo cantoneira de abas iguais, sendo perfis duplos para os banzos superiores e inferiores e simples para as diagonais e para os montantes. As terças utilizadas na coberturas são de perfis *U* formados a frio por meio de chapas dobradas. Os contraventamentos adotados para a estrutura são formados por barras redondas trefiladas. As telhas escolhidas para o tamponamento da cobertura são do tipo Trapezoidal 40, revestidas com liga anticorrosiva de zinco e alumínio. Considerou-se telhas com quatro apoios, ou seja, presas em quatro terças ao longo do caimento do telhado. As seções transversais e as características dos perfis citados anteriormente podem ser vistas no Apêndice A.



## 5 Problemas Estudados

Buscando avaliar o comportamento de dois tipos diferentes de coberturas para um edifício industrial, conforme Figura 19, realizou-se: otimização dimensional; a otimização dimensional em conjunto com a geométrica; otimização dimensional em conjunto com a geométrica considerando o número de pórticos como uma variável de projeto.

Figura 19 – Coberturas do Edifício Industrial



Sem escala – Dimensões em metros

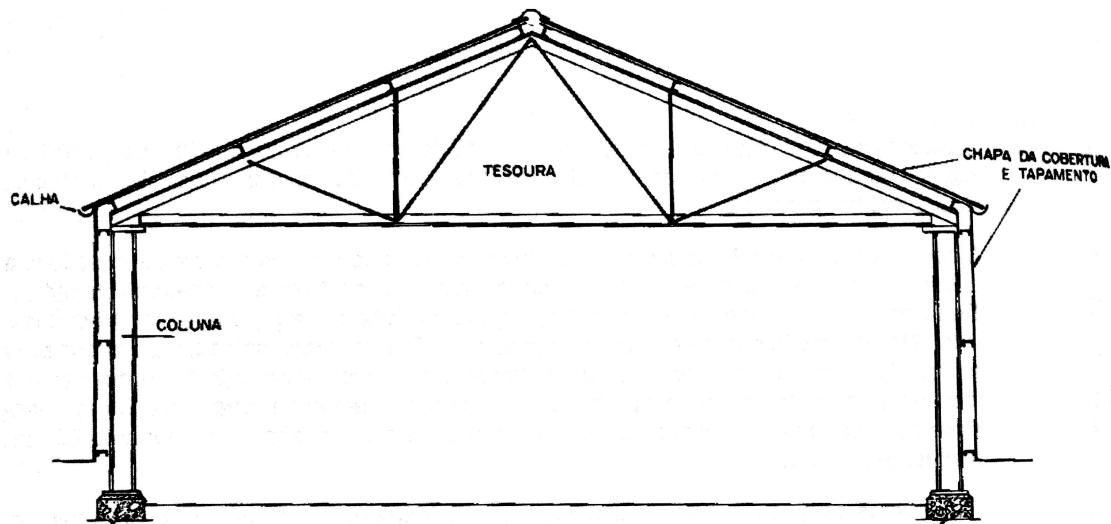
Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Utilizou-se os parâmetros do algoritmo *SGA* conforme o apresentados na seção 3.1, adotando-se 1500 iterações para os dois primeiros casos do Problema 1 e 3000 iterações para o último, assim como 3000 iterações para os dois primeiros casos do Problema 2 e 3500 iterações para o último. Os perfis disponíveis para o processo de otimização podem ser vistos no Apêndice A e as soluções encontradas estão referenciadas pelos índices presentes no mesmo.

## 5.1 Problema 1

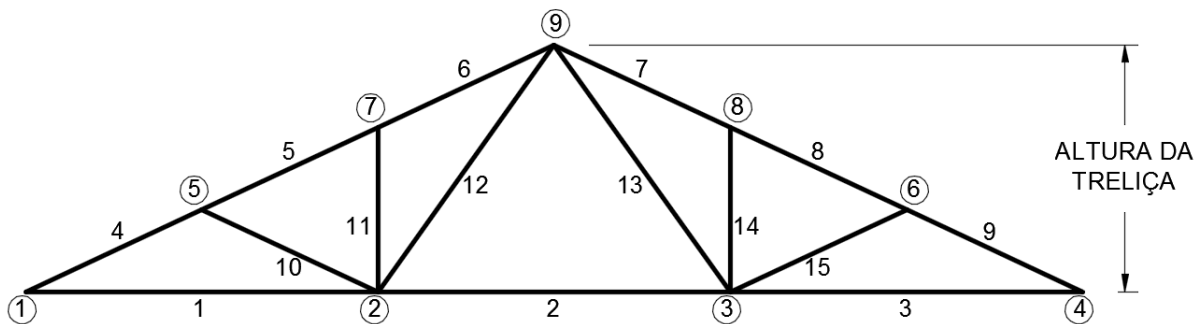
A treliça analisada no problema foi adaptada da presente em Bellei (2004), podendo ser vista na Figura 20. Esta apresenta 15 barras e 9 nós, enumerados conforme Figura 21.

Figura 20 – Treliça – Problema 1



Fonte: (BELLEI, 2004)

Figura 21 – Numeração de Barras e Nós da Treliça – Problema 1



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

As terças estão apoiadas nos nós dos banzos superiores e o banzo inferior é contraventado nos nós 2 e 3. A treliça foi considerada isostática, com apoios nos nós 1 e 4.

A estrutura da cobertura foi concebida como simétrica. Assim, busca-se encontrar o perfil que melhor represente os componentes da cobertura. Porém, no caso das treliças, procura-se um conjunto de perfis ótimos, pois as mesmas podem ser divididas em cinco

grupos de simetria, conforme a Tabela 1. Considerou-se os elementos dos Grupos 1 e 2 formados por perfis de cantoneiras duplas e os demais simples.

Tabela 1 – Grupos de Simetria da Treliça – Problema 1

Grupo	Barras de mesmo perfil
1	1-3
2	4-9
3	10 e 15
4	11 e 14
5	12 e 13

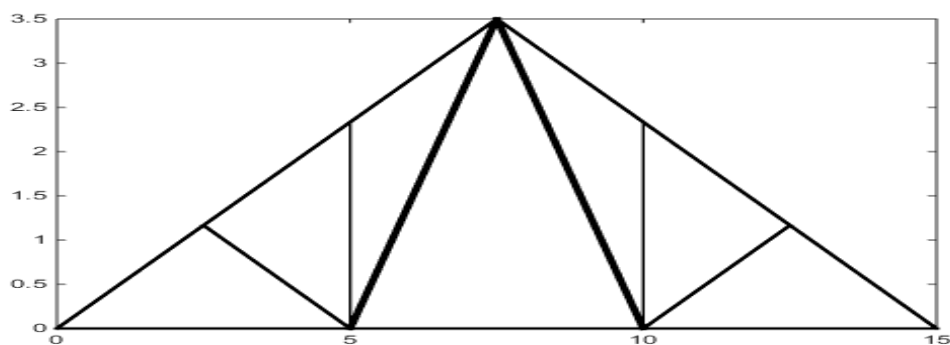
### 5.1.1 Otimização Dimensional

Para a otimização dimensional, considerou-se a altura das treliças e o espaçamento entre pórticos como constantes, sendo seus valores fixos em  $3.5\text{ m}$  e  $6\text{ m}$ , respectivamente.

As variáveis de projeto foram definidas como  $\mathbf{x} = \{a_1, a_2, \dots, a_9\}$ . Tem-se que  $a_j$  corresponde a área da seção transversal, dividida em:  $a_1$  até  $a_5$  para os grupos de perfis para as barras das treliças;  $a_6$  para as telhas;  $a_7$  para as terças;  $a_8$  para os tirantes;  $a_9$  para os contraventamentos dos banzos inferiores. As seções transversais e as características dos perfis disponíveis para cada  $a_j$  podem ser vistas no Apêndice A.

A Tabela 2 apresenta os resultados das massas de todos os componentes da cobertura, encontradas nas 15 vezes de execução do algoritmo *SGA*, tal como a média e o desvio padrão. O melhor resultado obtido para a cobertura foi  $19200.96\text{ kg}$ . Os perfis resultantes para as treliças podem ser vistos na Tabela 3, ilustrados na Figura 22, e os perfis para os demais componentes da cobertura na Tabela 4.

Figura 22 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional – Problema 1



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Tabela 2 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional – Problema 1

Rodada	Uma Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Contraventamentos Banzo Inferior (kg)	Cobertura (kg)
1	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
2	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
3	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
4	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
5	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
6	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
7	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
8	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
9	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
10	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
11	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
12	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
13	431.91	9471.75	4830.41	264.36	817.36	19271.10
14	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
15	431.91	9471.75	4830.41	194.22	817.36	19200.96
Média (kg)	431.91	9471.75	4830.41	226.95	817.36	19233.69
Desvio Padrão (kg)	0.00	0.00	0.00	36.22	0.00	36.22

Tabela 3 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional – Problema 1

Grupo – Treliça	Índice do Perfil Cantoneira
1	6
2	5
3	5
4	4
5	8

Tabela 4 – Perfis Resultantes – Otimização Dimensional – Problema 1

Componente	Índice do Perfil
Telha	3
Terça	7
Tirante	1
Contraventamento Banzo Inferior	4

As diferenças nos valores encontrados para a massa da cobertura se devem exclusivamente a variação da massa dos tirantes, cujos menores valores resultam do perfil mínimo (índice 1) do mesmo, e os demais do perfil de índice 4.

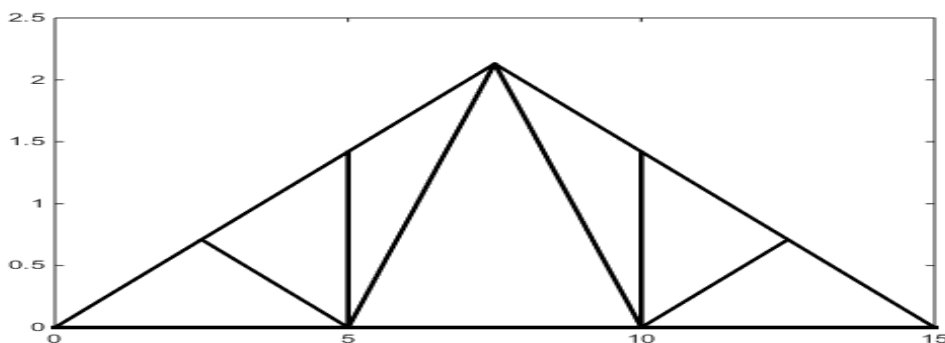
### 5.1.2 Otimização Dimensional e Geométrica

Na otimização dimensional e geométrica, as variáveis de projeto foram definidas como  $\mathbf{x} = \{a_1, a_2, \dots, a_7, h_1\}$ . Tem-se que  $a_j$  corresponde a área da seção transversal, dividida em:  $a_1$  até  $a_5$  para os grupos de perfis para as barras das treliças;  $a_6$  para as telhas;  $a_7$  para as terças. As seções transversais e as características dos perfis disponíveis para cada  $a_j$  podem ser vistas no Apêndice A. Percebeu-se que os elementos dos tirantes e dos contraventamentos dos banzos inferiores recairiam no perfil mínimo (índice 1). Logo, estas variáveis foram retiradas do problema de otimização, a fim de reduzir o tempo computacional.

Permitiu-se o deslocamento vertical dos nós 5 ao 9, presentes nos banzos superiores, sendo esta variável representada por  $h_1$ . Assim, o nó central, número 9, que define a altura da treliça, pode deslocar-se no eixo  $y$  de 1 m a 4 m, com os valores arredondados em centímetros. Os deslocamentos dos outros nós superiores são proporcionais a este, de modo que a inclinação dos banzos superiores se mantenha uniforme. Considerou-se o espaçamento entre pórticos como constante, com o valor de 6 m.

A Tabela 5 apresenta os resultados das massas de todos os componentes da cobertura, encontrados nas 15 vezes de execução do algoritmo *SGA*, tal como a média e o desvio padrão. O melhor resultado obtido para a cobertura foi 16490.05 kg. Os perfis resultantes para as treliças podem ser vistos na Tabela 6, ilustrados na Figura 23, e os perfis para os demais componentes da cobertura, juntamente com o valor da altura da treliça estão presentes na Tabela 7.

Figura 23 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 1



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Tabela 5 – Resultados das Massas da Dimensional e Geométrica – Problema 1

Rodada	Uma Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Contraventamentos Banzo Inferior (kg)	Cobertura (kg)
1	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
2	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
3	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
4	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
5	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
6	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
7	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
8	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
9	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
10	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
11	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
12	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
13	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
14	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
15	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
Média (kg)	475.56	6762.53	4830.41	186.65	430.44	16490.05
Desvio Padrão (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela 6 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 1

Grupo – Treliça	Índice do Perfil Cantoneira
1	8
2	5
3	5
4	1
5	7

Tabela 7 – Perfis Resultantes e Altura da Treliça – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 1

Componente	Perfil
Telha	2
Terça	7
Tirante	1
Contraventamento Banzo Inferior	1
Altura da Treliça	2.13 m



Ao comparar os resultados obtidos com os da seção anterior, percebe-se que houve um acréscimo de 10.11% na massa das treliças e uma redução de 14.12% na massa da cobertura. Assim, nota-se a importância da otimização completa da cobertura, pois otimizar apenas as treliças pode não resultar em uma melhoria efetiva. Além disso, como a força do vento é atualizada a cada iteração, a redução de massa encontrada para a cobertura é resultado das menores cargas atuantes, das menores dimensões e das menores áreas das seções transversais, principalmente com relação às telhas.

### 5.1.3 Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos

As variáveis de projeto foram definidas como  $\mathbf{x} = \{a_1, a_2, \dots, a_7, h_1, eep\}$ . Tem-se que  $a_j$  corresponde a área da seção transversal, dividida em:  $a_1$  até  $a_5$  para os grupos de perfis para as barras das treliças;  $a_6$  para as telhas;  $a_7$  para as terças. As seções transversais e as características dos perfis disponíveis para cada  $a_j$  podem ser vistas no Apêndice A. Adotou-se a mesma lógica e limites de deslocamentos dos nós dos banzos superiores,  $h_1$ , presentes na otimização dimensional e geométrica, assim como manteve-se os perfis mínimos para os elementos de tirantes e de contraventamentos dos banzos inferiores, conforme as justificativas já apresentadas.

O espaçamento entre pórticos,  $eep$ , foi considerado uma variável múltipla ao comprimento do edifício industrial. Desta forma, poderia assumir os seguintes valores: 2, 3, 4, 4.8, 6, 8, 9.6 ou 12  $m$ . Equivalentes, respectivamente, aos seguintes números de pórticos para a cobertura: 25, 17, 13, 11, 9, 7, 6 e 5.

A Tabela 8 apresenta os resultados das massas de todos os componentes da cobertura, encontrados nas 15 vezes de execução do algoritmo *SGA*, tal como a média e o desvio padrão. O melhor resultado obtido para a cobertura foi 14394.62  $kg$ . Os perfis resultantes para as treliças podem ser vistos na Tabela 9, ilustrados na Figura 24. Os perfis para os demais componentes da cobertura, juntamente com o valor da altura da treliça e o número de pórticos estão presentes na Tabela 10.

Tabela 8 – Resultados das Massas da Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1

Rodada	Uma Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Contraventamentos Banzo Inferior (kg)	Cobertura (kg)
1	472.46	6721.55	2638.33	217.01	394.06	15167.99
2	503.01	6629.05	2638.33	214.82	297.06	15312.33
3	375.87	6851.69	2321.73	253.19	501.17	14814.07
4	502.59	8739.91	2638.33	214.71	291.00	17412.46
5	343.23	6854.42	2321.73	253.27	503.19	14394.62
6	503.01	6629.05	2638.33	214.82	297.06	15312.33
7	343.23	6854.42	2321.73	253.27	503.19	14394.62
8	503.01	6629.05	2638.33	214.82	297.06	15312.33
9	502.59	8739.91	2638.33	214.71	291.00	17412.46
10	472.46	6721.55	2638.33	217.01	394.06	15167.99
11	472.46	6721.55	2638.33	217.01	394.06	15167.99
12	343.23	6854.42	2321.73	253.27	503.19	14394.62
13	503.01	6629.05	2638.33	214.82	297.06	15312.33
14	472.46	6721.55	2638.33	217.01	394.06	15167.99
15	373.38	6851.69	2321.73	253.19	501.17	14781.74
Média (kg)	445.73	7009.93	2532.80	228.20	390.56	15301.73
Desvio Padrão (kg)	67.65	708.18	154.48	18.35	91.56	924.24

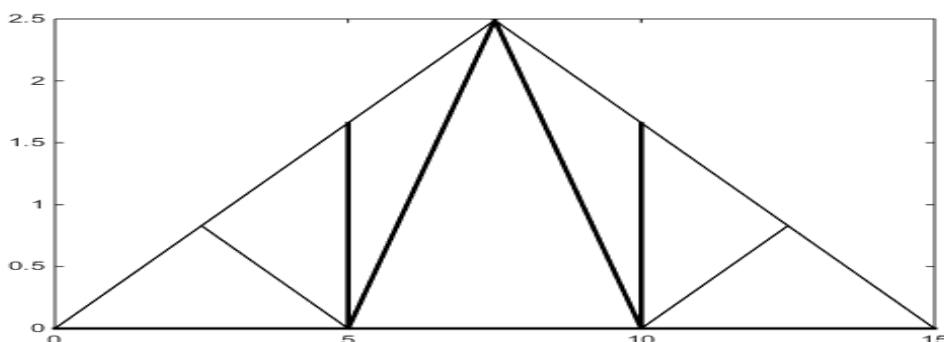
Tabela 9 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1

Grupo – Treliça	Índice do Perfil Cantoneira
1	6
2	4
3	4
4	1
5	6

Tabela 10 – Perfis Resultantes, Altura e Número de Pórticos – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1

Componente	Perfil
Telha	2
Terça	1
Tirante	1
Contraventamento Banzo Inferior	1
Altura da Treliça	2.49 m
Espaçamento entre Pórticos	4 m
Número de Pórticos	13

Figura 24 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

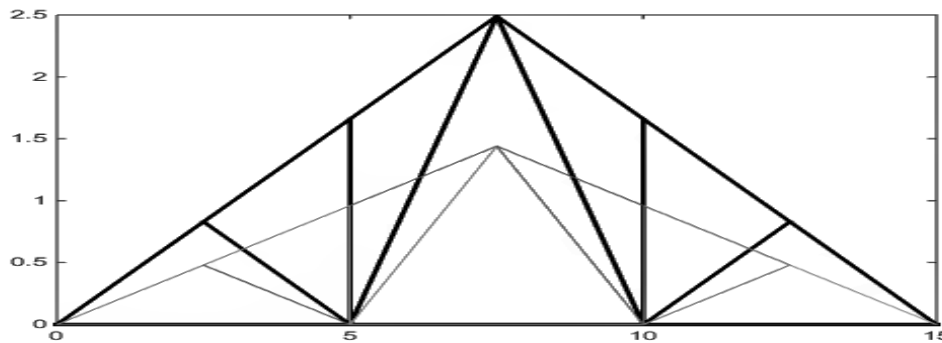
Com relação as diferenças encontradas nas rodadas da otimização dimensional e geométrica com a definição do número de pórticos, ao comparar o pior com o melhor resultado encontrado (Tabela 11), nota-se que no melhor caso há um acréscimo das massas dos tirantes e dos contraventamentos dos banzos inferiores. Isto acontece, pois há um número maior de pórticos, aumentando a quantidade de barras utilizadas para estes fins. Por outro lado, as demais características diminuem consideravelmente. Destaca-se as telhas, que no pior caso possuem um perfil mais espesso (índice 3), sendo o principal responsável pela variação das massas das coberturas finais. A diferença de massa entre os dois casos é de 3017.84 kg para a cobertura e 1885.49kg para as telhas. Ou seja, as telhas são responsáveis por 62.48% da diferença entre as massas das coberturas. A Figura 25 ilustra a mudança da altura, sendo em cinza a treliça do pior caso e em preto a do melhor caso.

Tabela 11 – Comparações das Massas: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1

Caso	Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Cont. Banzo Inf. (kg)	Cobertura (kg)	Altura (m)	N <sup>o</sup> Pórticos
Pior	502.59	8739.91	2638.33	214.71	291.00	17412.46	1.44	11
Melhor	343.23	6854.42	2321.73	253.27	503.19	14394.62	2.49	13
Diferença	-31.71%	-21.57%	-12.00%	17.96%	72.92%	-17.33%	72.92%	

Comparando os melhores resultados obtidos com os da otimização dimensional, nota-se que há uma redução de 20.53% na massa das treliças e 25.03% na massa da cobertura. E ao compará-los com a otimização dimensional em conjunto com a geométrica, há uma redução de 27.83% na massa das treliças e 12.71% na massa da cobertura.

Figura 25 – Comparações das Trelças: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 1

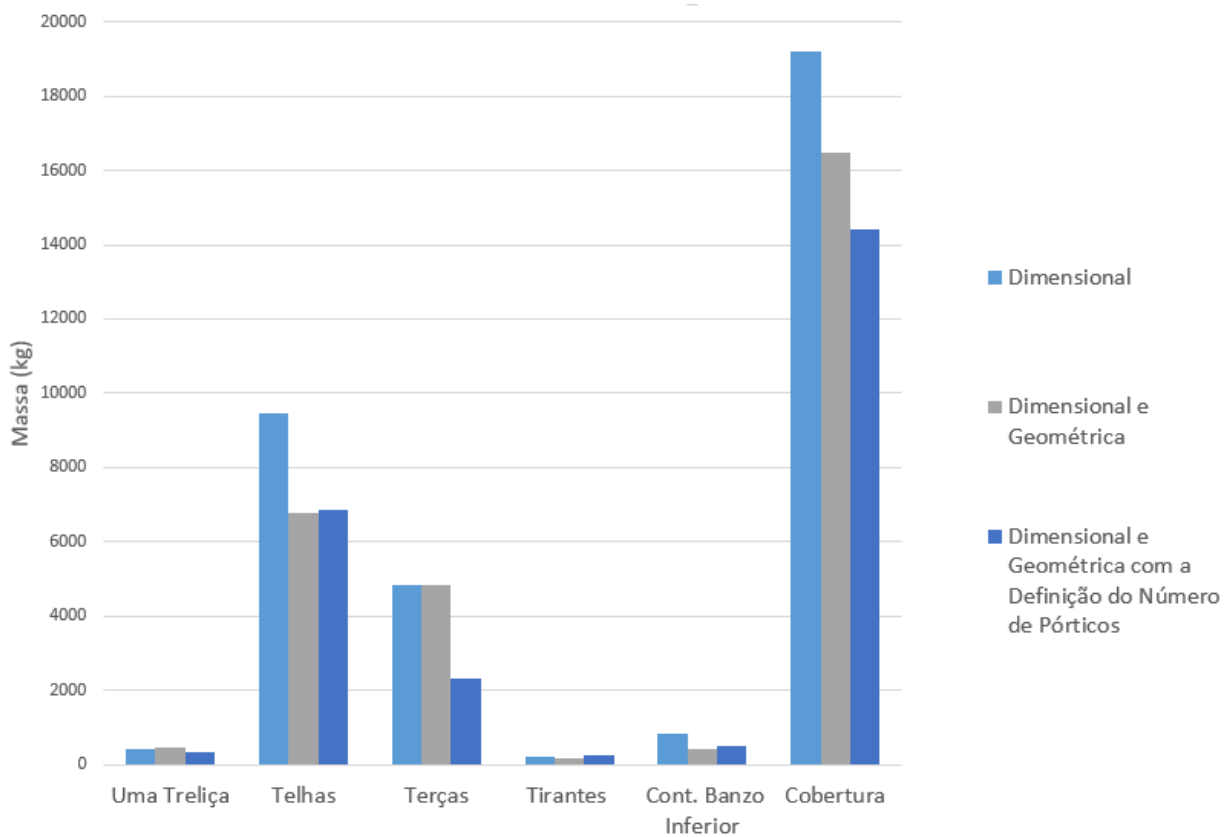


Legenda: Cinza – Pior Caso; Preta – Melhor Caso.

Fonte: Elaborada pela autora, 2015

As menores massa encontradas nas seções apresentadas para o Problema 1 estão presentes na Figura 26. Além das discussões já realizadas, nota-se que na otimização dimensional e geométrica com a definição do número de pórticos a redução das massas das terças também possui importância para o resultado final da cobertura.

Figura 26 – Massas Finais das Otimizações Realizadas - Problema 1

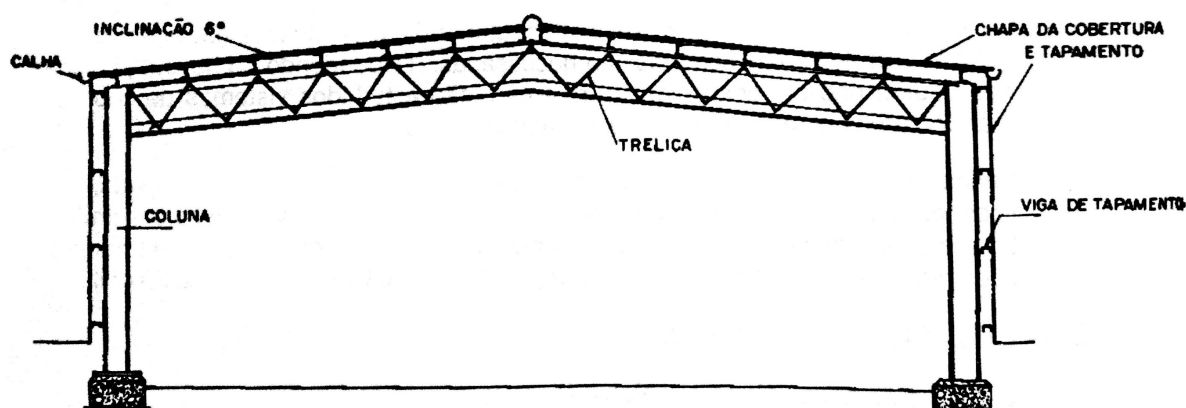


Fonte: Elaborada pela autora, 2015

## 5.2 Problema 2

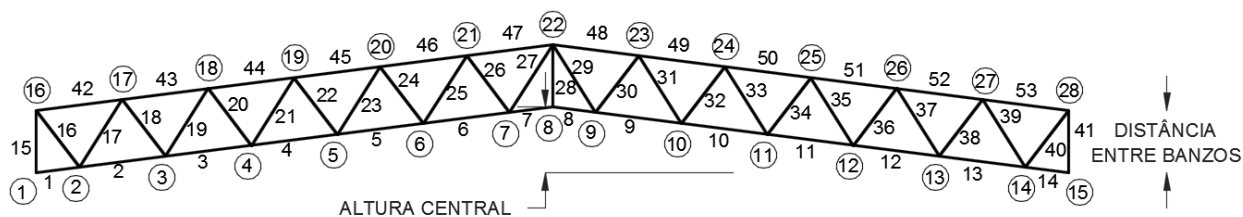
Para o segundo problema também se utilizou uma treliça adaptada de Bellei (2004), estando esta exposta na Figura 27. Apresenta 53 barras e 28 nós, enumerados conforme Figura 28.

Figura 27 – Treliça – Problema 2



Fonte: (BELLEI, 2004)

Figura 28 – Numeração de Barras e Nós da Treliça – Problema 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

As terças estão apoiadas nos nós 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28. Os banzos inferiores são contraventados nos nós 4, 8, e 12. A treliça foi considerada isostática, com apoios nos nós 1 e 15.

Do mesmo modo que no Problema 1, a estrutura da cobertura foi concebida como simétrica, buscando-se encontrar o perfil que melhor represente os componentes da cobertura. No caso das treliças, procura-se um conjunto de perfis ótimos, pois as mesmas podem ser divididas em quatro grupos de simetria, conforme a Tabela 12. Considerou-se os elementos dos Grupos 1 e 2 formados por perfis de cantoneiras duplas e os demais simples.

Tabela 12 – Grupos de Simetria da Treliça – Problema 2

Grupo	Barras de mesmo perfil
1	1-14
2	42-53
3	16-27 e 29-40
4	15, 28 e 41

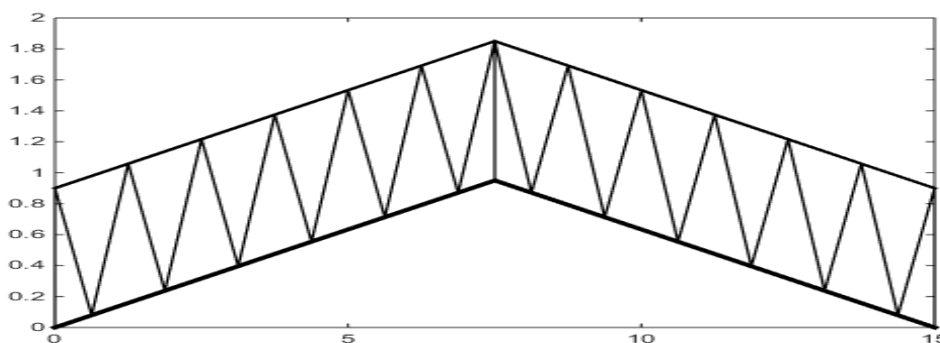
### 5.2.1 Otimização Dimensional

Para a otimização dimensional, considerou-se a altura central, abaixo do banzo inferior das treliças, a distância entre o banzo superior e o banzo inferior e o espaçamento entre pórticos como constantes, sendo seus valores fixos em 0.95 m, 0.90 m e 6 m, respectivamente.

As variáveis de projeto foram definidas como  $\mathbf{x} = \{a_1, a_2, \dots, a_8\}$ . Tem-se que  $a_j$  corresponde a área da seção transversal, dividida em:  $a_1$  até  $a_4$  para os grupos de perfis para as barras das treliças;  $a_5$  para as telhas;  $a_6$  para as terças;  $a_7$  para os tirantes;  $a_8$  para os contraventamentos dos banzos inferiores. As seções transversais e as características dos perfis disponíveis para cada  $a_j$  podem ser vistas no Apêndice A.

A Tabela 13 apresenta os resultados das massas de todos os componentes da cobertura, encontrados nas 15 vezes de execução do algoritmo *SGA*, tal como a média e o desvio padrão. O melhor resultado obtido para a cobertura foi 15666.70 kg. Os perfis resultantes para as treliças podem ser vistos na Tabela 14, ilustrados na Figura 29, e os perfis para os demais componentes da cobertura na Tabela 15.

Figura 29 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional – Problema 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Tabela 13 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional – Problema 2

Rodada	Uma Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Contraventamentos Banzo Inferior (kg)	Cobertura (kg)
1	497.76	6557.25	4037.40	182.95	409.22	15666.70
2	497.76	6557.25	4037.40	182.95	472.90	15730.38
3	497.76	6557.25	4037.40	182.95	472.90	15730.38
4	497.76	6557.25	4037.40	182.95	409.22	15666.70
5	497.76	6557.25	4037.40	249.02	409.22	15732.76
6	497.76	6557,25	4037.40	182.95	472.90	15730.38
7	497.76	6557,25	4037.40	182.95	409.22	15666.70
8	497.76	6557,25	4037.40	249.02	409.22	15732.76
9	497.76	6557,25	4037.40	182.95	409.22	15666.70
10	497.76	6557,25	4037.40	182.95	409.22	1566.70
11	497.76	6557,25	4037.40	182.95	409.22	15666.70
12	497.76	6557,25	4037.40	249.02	409.22	15732.76
13	497.76	6557,25	4037.40	182.95	472.90	15730.38
14	497.76	6557,25	4037.40	249.02	472.90	15796.45
15	497.76	6557,25	4037.40	249.02	409.22	15732.76
Média (kg)	497.76	6557.25	4037.40	204.97	430.45	15709.95
Desvio Padrão (kg)	0.00	0.00	0.00	32.24	31.07	40.05

Tabela 14 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional – Problema 2

Grupo – Treliça	Índice do Perfil Cantoneira
1	8
2	5
3	4
4	3

Tabela 15 – Perfis Resultantes – Otimização Dimensional – Problema 2

Componente	Perfil
Telha	2
Terça	6
Tirante	1
Contraventamento Banzo Inferior	1

As diferenças nos valores encontrados para a massa da cobertura se devem a variação da massa dos tirantes e dos contraventamentos dos banzos inferiores, cujos menores valores resultam dos perfis mínimos (índice 1) dos mesmos.

Ao comparar os resultados obtidos com os da otimização dimensional do Problema

1, percebe-se que houve um acréscimo de 15.24% na massa das treliças e uma redução de 18.41% na massa da cobertura. Já em relação a otimização dimensional e geométrica do Problema 1, há um acréscimo de 4.67% na massa das treliças e uma redução de 4.99% na massa da cobertura.

Novamente é perceptível a importância da otimização completa da cobertura. A redução de massa encontrada para a cobertura é resultado das menores cargas de vento devidas a menor inclinação do telhado, das menores dimensões e das menores áreas das seções transversais, principalmente com relação às telhas.

### 5.2.2 Otimização Dimensional e Geométrica

As variáveis de projeto foram definidas como  $\mathbf{x} = \{a_1, a_2, \dots, a_6, h_1, h_2\}$ . Tem-se que  $a_j$  corresponde a área da seção transversal, dividida em:  $a_1$  até  $a_4$  para os grupos de perfis para as barras das treliças;  $a_5$  para as telhas;  $a_6$  para as terças. As seções transversais e as características dos perfis disponíveis para cada  $a_j$  podem ser vistas no Apêndice A. Do mesmo modo que no Problema 1, percebeu-se que os elementos dos tirantes e dos contraventamentos dos banzos inferiores recairiam no perfil mínimo (índice 1). Logo, estas variáveis foram retiradas do problema a fim de reduzir o tempo computacional.

Permitiu-se o deslocamento vertical dos nós, com exceção aos de apoio, 1 e 15. O nó central do banzo inferior, número 8, que define a inclinação, pode deslocar-se  $h_1$  no eixo  $y$ , com valores de 0.23  $m$  (para inclinação mínima de 3% exigida pela ABNT NBR8800 (2008)) a 1.00  $m$ , arredondados em centímetros. Os deslocamentos dos outros nós são proporcionais a este, de modo que a inclinação dos banzos se mantenha uniforme. No caso dos nós dos banzos superiores, há um acréscimo no deslocamento de  $h_2$ , devido a distância entre os banzos superiores e inferiores, que pode variar de 0.10  $m$  a 1.50  $m$ , também com os valores arredondados em centímetros. Considerou-se o espaçamento entre pórticos como constante, com o valor de 6  $m$ .

A Tabela 16 apresenta os resultados das massas de todos os componentes da cobertura, encontrados nas 15 vezes de execução do algoritmo *SGA*, tal como a média e o desvio padrão. O melhor resultado obtido para a cobertura foi 14854.58  $kg$ . Os perfis resultantes para as treliças podem ser vistos na Tabela 17, ilustrados na Figura 30. Os perfis para os demais componentes da cobertura, juntamente com o valor da altura central e da distância entre banzos estão presentes na Tabela 18.



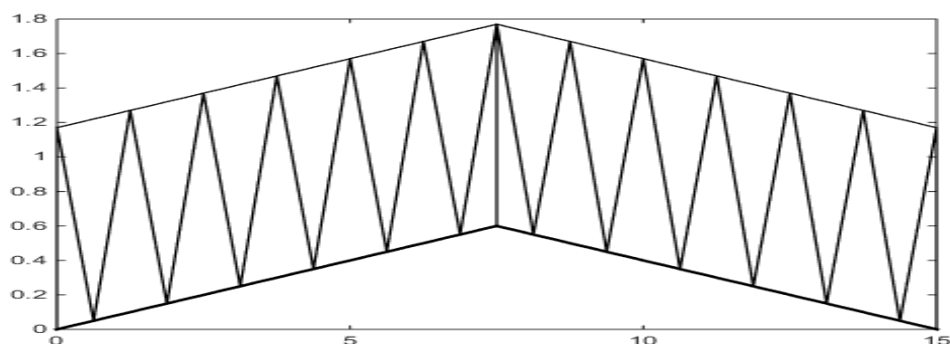
Tabela 16 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2

Rodada	Uma Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Contraventamentos Banzo Inferior (kg)	Cobertura (kg)
1	458.81	6562.84	4037.40	183.05	313.73	15226.29
2	468.24	6527.46	4037.40	182.42	682.03	15643.44
3	458.81	6562.84	4037.40	183.05	313.73	15226.29
4	424.43	6525.37	4037.40	182.38	386.48	14951.53
5	397.42	6526.06	4037.40	182.39	531.98	14854.58
6	397.42	6526.06	4037.40	182.39	531.98	14854.58
7	397.42	6526.06	4037.40	182.39	531.98	14854.58
8	397.42	6526.06	4037.40	182.39	531.98	14854.58
9	458.81	6562.84	4037.40	183.05	313.73	15226.29
10	458.81	6562.84	4037.40	183.05	313.73	15226.29
11	423.65	6525.37	4037.40	182.38	386.48	14944.50
12	458.81	6562.84	4037.40	183.05	313.73	15226.29
13	458.81	6562.84	4037.40	183.05	313.73	15226.29
14	397.42	6526.06	4037.40	182.39	531.98	14854.58
15	424.43	6525.37	4037.40	182.38	386.48	14951.53
Média (kg)	432.04	6540.73	4037.40	182.66	425.59	15074.77
Desvio Padrão (kg)	29.02	18.70	0.00	0.34	120.12	231.59

Tabela 17 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2

Grupo – Treliça	Índice do Perfil Cantoneira
1	6
2	4
3	4
4	3

Figura 30 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Tabela 18 – Perfis Resultantes e Altura da Treliça – Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2

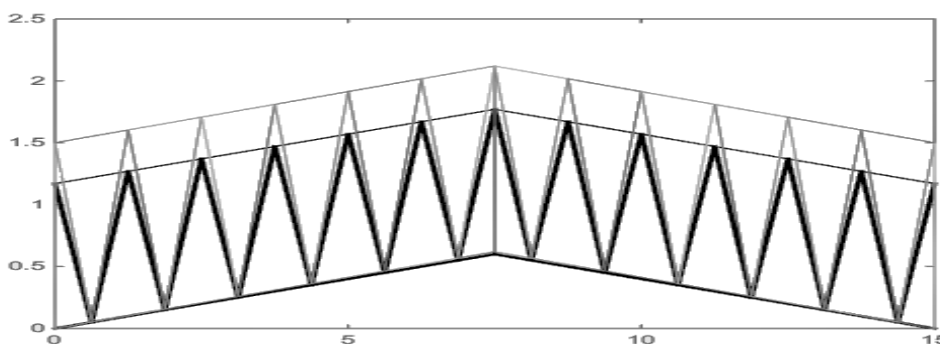
Componente	Perfil
Telha	2
Terça	6
Tirante	1
Contraventamento Banzo Inferior	1
Altura da Treliça	1.77 m
Altura Central – Banzo Inferior	0.60 m
Distância entre o Banzo Superior e o Banzo Inferior	1.17 m

As diferenças encontradas nas rodadas da otimização dimensional e geométrica, ao comparar o pior com o melhor resultado encontrado (Tabela 19), nota-se que se devem basicamente pela redução da altura total das treliças, como pode ser visto na Figura 31, o que resulta na redução dos comprimentos das barras das mesmas, assim como dos tirantes e dos contraventamentos dos banzos inferiores. Ainda, a pouca variação na altura central (abaixo dos banzos inferiores e responsável pela inclinação do telhados) fez com que quase não houvesse diferença na massa das telhas.

Tabela 19 – Comparações das Massas: Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2

Caso	Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Cont. Banzo Inf. (kg)	Cobertura (kg)	Altura Total (m)	Altura Central (m)
Pior	468.24	6527.46	4037.40	182.42	682.03	15643.44	2.12	0.62
Melhor	397.42	6526.06	4037.40	182.39	531.98	14854.58	1.77	0.60
Diferença	-15.12%	-0.02%	0.00%	-0.01%	-22.00%	-5.04%	-16.51%	-3.23%

Figura 31 – Comparações das Treliças: Otimização Dimensional e Geométrica – Problema 2



Legenda: Cinza – Pior Caso; Preta – Melhor Caso.

Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Com relação a otimização dimensional do Problema 2, percebe-se que apenas nos contraventamentos dos banzos inferiores há um aumento na massa, devido à maior distância entre os banzos das treliças, o que aumenta o seu comprimento. Porém, como a força do vento é atualizada a cada iteração, a redução das massas encontradas para a cobertura como um todo são resultado das menores cargas atuantes, devido a menor inclinação do telhado, possibilitando a utilização de perfis mais leves.

Assim, comparando os resultados obtidos com os da otimização dimensional, nota-se que há uma redução de 20.16% na massa das treliças e 5.18% na massa da cobertura. Ao confrontá-los com a otimização dimensional em conjunto com a geométrica do Problema 1, nota-se que há uma redução de 16.43% na massa das treliças e 9.92% na massa da cobertura.

### 5.2.3 Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos

As variáveis de projeto foram definidas como  $\mathbf{x} = \{a_1, a_2, \dots, a_6, h_1, h_2, eep\}$ . Tem-se que  $a_j$  corresponde a área da seção transversal, dividida em:  $a_1$  até  $a_4$  para os grupos de perfis para as barras das treliças;  $a_5$  para as telhas;  $a_6$  para as terças. As seções transversais e as características dos perfis disponíveis para cada  $a_j$  podem ser vistas no Apêndice A. Adotou-se a mesma lógica e limites de deslocamentos dos nós,  $h_1$  e  $h_2$ , presentes na otimização dimensional e geométrica, assim como manteve-se os perfis mínimos para os elementos de tirantes e de contraventamentos dos banzos inferiores, conforme as justificativas já apresentadas.

O espaçamento entre pórticos,  $eep$ , da mesma forma que no Problema 1, foi considerado uma variável múltipla do comprimento do edifício industrial. Desta forma, poderia assumir os seguintes valores: 2, 3, 4, 4.8, 6, 8, 9.6 ou 12  $m$ . Equivalentes, respectivamente, aos seguintes números de pórticos para a cobertura: 25, 17, 13, 11, 9, 7, 6 e 5.

A Tabela 20 apresenta os resultados das massas de todos os componentes da cobertura, encontrados nas 15 vezes de execução do algoritmo *SGA*, tal como a média e o desvio padrão. O melhor resultado obtido para a cobertura foi 13484.87  $kg$ . Os perfis resultantes para as treliças podem ser vistos na Tabela 21, ilustrados na Figura 32. Os perfis para os demais componentes da cobertura, juntamente com o valor da altura central, da distância entre banzos e do número de pórticos estão presentes na Tabela 22.

Tabela 20 – Resultados das Massas da Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2

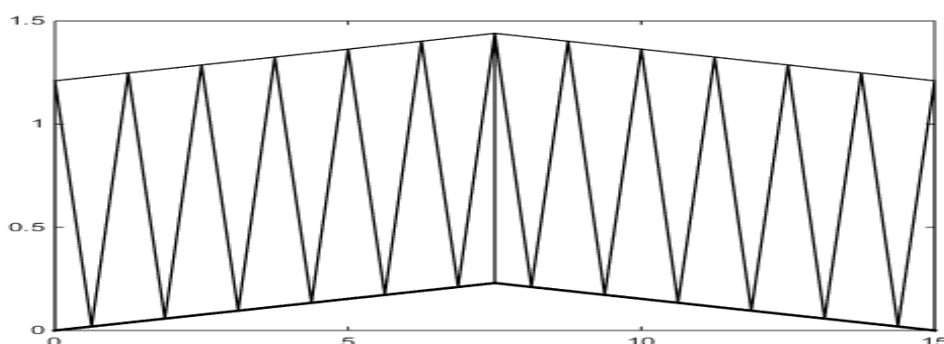
Rodada	Uma Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Contraventamentos Banzo Inferior (kg)	Cobertura (kg)
1	397.21	6562.84	2638.33	213.26	682.03	14465.73
2	297.04	6508.33	2321.73	243.13	550.17	13484.87
3	308.37	6508.33	2321.73	243.13	491.06	13573.07
4	297.04	6508.33	2321.73	243.13	550.17	13484.87
5	297.04	6508.33	2321.73	243.13	550.17	13484.87
6	361.07	6511.57	2954.93	212.06	682.03	14332.34
7	308.37	6508.33	2321.73	243.13	491.06	13573.07
8	308.37	6508.33	2321.73	243.13	491.06	13573.07
9	322.28	6562.84	2321.73	244.72	504.70	13823.68
10	297.04	6508.33	2321.73	243.13	550.17	13484.87
11	297.04	6508.33	2321.73	243.13	550.17	13484.87
12	322.28	6562.84	2321.73	244.72	504.70	13823.68
13	308.37	6508.33	2321.73	243.13	491.06	13573.07
14	308.37	6508.33	2321.73	243.13	491.06	13573.07
15	397.21	6562.84	2638.33	213.26	682.03	14465.73
Média (kg)	321.81	6523.08	2406.16	237.29	550.78	13746.72
Desvio Padrão (kg)	34.73	24.83	187.94	12.66	72.58	366.68

Tabela 21 – Perfis para as Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2

Grupo – Treliça	Índice do Perfil Cantoneira
1	5
2	3
3	3
4	2

Com relação as diferenças encontradas nas rodadas da otimização dimensional e geométrica com a definição do número de pórticos, ao comparar o pior com o melhor resultado encontrado (Tabela 23), nota-se que no melhor caso há um acréscimo das massas dos tirantes. Isto acontece, pois há um número maior de pórticos, aumentando a quantidade de barras utilizadas para este fim. Por outro lado, as demais características diminuem consideravelmente. A Figura 33 ilustra a diferença de altura, sendo em cinza a treliça do pior caso e em preto a do melhor caso.

Figura 32 – Perfis das Treliças – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

Tabela 22 – Perfis Resultantes, Altura e Número de Pórticos – Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2

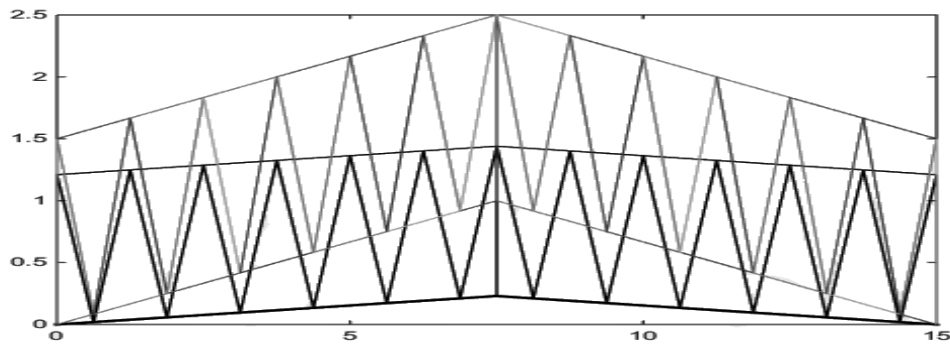
Componente	Perfil
Telha	2
Terça	1
Tirante	1
Contraventamento Banzo Inferior	1
<hr/>	
Altura da Treliça	1.44m
Altura Central – Banzo Inferior	0.23 m
Distância entre o Banzo Superior e o Banzo Inferior	1.21 m
Espaçamento entre Pórticos	4 m
Número de Pórticos	13

Tabela 23 – Comparações das Massas: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2

Caso	Treliça (kg)	Telhas (kg)	Terças (kg)	Tirantes (kg)	Cont. Banzo Inf. (kg)	Cobertura (kg)	Altura Total (m)	Nº Pórticos
Pior	397.21	6562.84	2638.33	213.26	682.03	14465.73	2.5	11.00
Melhor	297.04	6508.33	2321.73	243.13	550.17	13484.87	1.44	13.00
Diferença (%)	-25.22%	-0.83%	-12.00%	14.00%	-19.33%	-6.78%	-42.40%	18.18%

Comparando os melhores resultados obtidos com os da otimização dimensional, nota-se que há uma redução de 40.32% na massa das treliças e 13.93% na massa da cobertura. Já em comparação com os da otimização dimensional em conjunto com a geométrica, percebe-se que há um decaimento de 25.26% na massa das treliças e 9.22% na massa da cobertura. Por fim, ao confrontá-los com a otimização dimensional em conjunto com a geométrica com a definição do número de pórticos do Problema 1, nota-se que há uma redução de 13.46% na massa das treliças e 6.32% na massa da cobertura.

Figura 33 – Comparações das Trelças: Otimização Dimensional e Geométrica com a Definição do Número de Pórticos – Problema 2

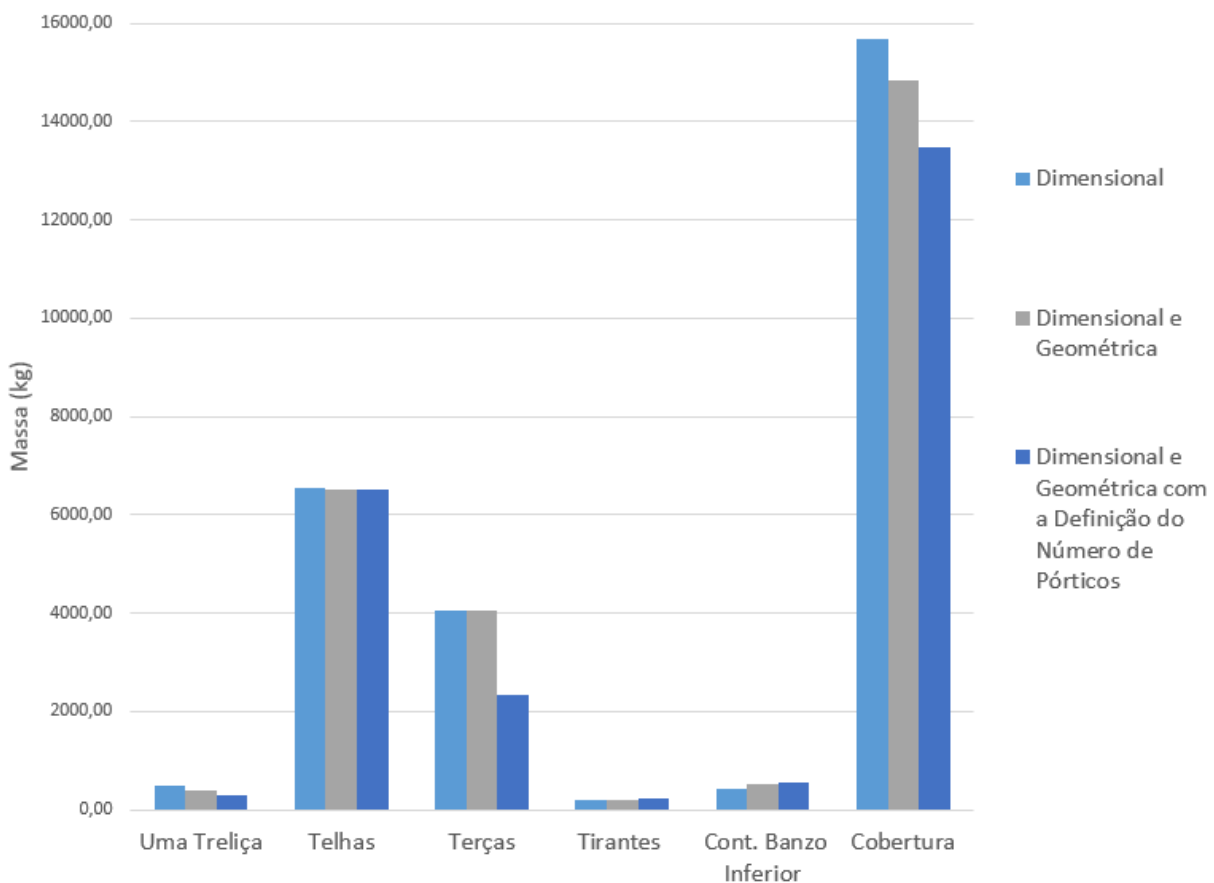


Legenda: Cinza – Pior Caso; Preta – Melhor Caso.

Fonte: Elaborada pela autora, 2015

As menores massa encontradas nas seções apresentadas para o Problema 2 estão presentes na Figura 34. Além das discussões já realizadas, nota-se que na otimização dimensional e geométrica com a definição do número de pórticos a redução das massas das terças também possui importância para o resultado final da cobertura.

Figura 34 – Massas Finais das Otimizações Realizadas - Problema 2



Fonte: Elaborada pela autora, 2015

## 5.3 Discussão

Os resultados encontrados possibilitam a análise de alguns fatores que influenciam diretamente a massa de um edifício industrial. Estes são comumente tratados como constantes ou como cargas estipuladas, que apenas são verificados, sem sofrer correções. Alguns destes fatores serão discutidos a seguir.

Ao comparar os resultados obtidos na otimização dimensional com a otimização dimensional e geométrica do Problema 1, é possível notar que há um aumento na massa das treliças, se essas forem analisadas separadamente, porém a massa da cobertura reduz. Ao diminuir a altura das treliças, e por consequência a inclinação do telhado, houve uma queda nos esforços devidos ao vento em virtude da redução dos coeficientes aerodinâmico utilizados. Isto também resultou no encurtamento do espaçamento entre terças, e ambos possibilitaram a utilização de uma telha mais leve. Pode-se notar que devido ao fato de as telhas ocuparem uma grande área, as mesmas possuem relevância na massa final da cobertura, sendo que sua redução foi mais significativa que o aumento da massa das treliças.

Comparando a otimização dimensional dos dois problemas, nota-se algo equivalente, pois apesar do segundo problema possuir a treliça com maior massa, a cobertura possui massa reduzida, assim como um perfil de telha menos espesso. Já as diferenças nos resultados encontrados na otimização dimensional e geométrica do Problema 2, em comparação com a que considera apenas a dimensional do mesmo, se devem mais a redução nos perfis e tamanhos das barras das treliças, pois não há alteração nos perfis das telhas e das terças.

Nos dois problemas analisados, a otimização dimensional e geométrica com a definição do número de pórticos se mostrou a mais eficiente, com uma redução considerável na massa das treliças e da cobertura, sendo o melhor resultado encontrado no Problema 2. Em ambos os casos se obteve a mesma quantidade de treliças para a cobertura. Faz-se necessário testes com outras topologias para verificar a possibilidade de esse valor ser uma constante para edifícios industriais submetidos as mesmas considerações.

Assim, vê-se a importância do número ideal de treliças e do espaçamento entre terças, além de sua influência nas telhas. Estes assuntos levantam discussões interessantes, tornam-se bons objetos para estudos futuros.

Outro fator que pode ser abordado é a verificação dos preços dos componentes da cobertura, e estes foram feitos por meio dos valores fornecidos pelo SINAPI (09/2015).

Com base nos insumos, nota-se que o acréscimo no preço dos tirante e contraventamentos se dá pelo aumento das suas unidades. O preço das cantoneiras é diretamente ligados a sua massa, o das terças ao seu comprimento e o das telhas a sua área. Por falta de dados mais específicos para a estimativa dos valores dos tirantes e contraventamentos dos banzos inferiores, assim como das terças, na Tabela 24 tem-se os valores para as telhas e as treliças dos melhores resultados encontrados.

Tabela 24 – Comparação dos Preços das Treliças e Telhas

	Problema 1			Problema 2		
	Treliças (R\$)	Telhas (R\$)	Subtotal (R\$)	Treliças (R\$)	Telhas (R\$)	Subtotal (R\$)
Dimensional	11195,11	53949,36	65144,47	12901,94	49278,63	62180,57
Dimensional e Geométrica	12326,52	50821,33	63147,85	10301,13	49044,19	59345,32
Dimensional e Geométrica com $N^o$ de Pórticos	12805,53	51511,90	64317,43	11121,18	48910,98	60032,16

Nota-se que o menor preço para as telhas e treliças está nos resultados encontrados na otimização dimensional em conjunto com a geométrica. Para um conclusão da cobertura como um todo, se faz necessário uma pesquisa mais completa sobre os preços de todos os componentes da mesma.

Por fim, pode-se comentar a influência que os agrupamentos de perfis (devido as simetrias e restrições construtivas) podem causar na massa das diversas topologias possíveis para uma treliça e para uma cobertura, já que os mesmos foram escolhidos de forma subjetiva, não sendo necessariamente a melhor solução. Além disso, outras topologias não abordadas podem resultar em situações mais favoráveis.



## 6 Conclusão

Realizou-se, em dois problemas propostos, três formas de otimização da estrutura de cobertura para edifícios industriais: otimização dimensional; otimização dimensional em conjunto com a geométrica; otimização dimensional em conjunto com a geométrica considerando o número de pórticos como variável. Para tanto, utilizou-se o algoritmo de otimização *SGA* e se respeitou os critérios das normas ABNT NBR6123 (1988) – Forças devidas ao vento em edificações e ABNT NBR8800 (2008) – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Com base nos resultados, nota-se que quanto mais as características da estrutura (áreas das seções transversais dos elementos, coordenadas nodais e espaçamento entre pórticos) estão envolvidas no processo de otimização considerado, melhores são os resultados encontrados, ou seja, menor é a massa da cobertura. Contudo, há uma maior variabilidade nos valores, acarretando em um acréscimo no desvio padrão. Isto se deve ao caráter aleatório dos algoritmos heurísticos, podendo ser uma importante forma de mensurar o desempenho dos mesmos, ao compará-los.

Além disso, as comparações realizadas demonstram que, da mesma forma que o número de pórticos influencia nos resultados, o espaçamento entre terças também possui importância, principalmente devido à sua relação com a escolha do perfil para as telhas. E estas, por possuírem uma grande área de distribuição, são responsáveis por uma boa parcela da massa final da cobertura.

Este trabalho, com base nos resultados obtidos, mostrou-se adequado para projetar de forma otimizada coberturas para edifícios industriais, sem que haja a obrigação de um projeto prévio para isto. Faz-se necessário apenas a definição inicial da topologia da treliça a ser utilizada. Isto torna o processo de otimização mais útil para a prática industrial, além de agilizar a realização dos projetos.

Salienta-se, por fim, que melhores resultados poderão ser encontrados com o aprofundamento do assunto, acrescentando a otimização topológica, a busca pelo espaçamento ideal entre terças, assim como verificar com ligações parafusadas, as quais são mais comuns na indústria.



## 7 Trabalhos Futuros

Sugere-se as seguintes linhas de pesquisas para trabalhos futuros:

- (i) Ampliar o algoritmo para que este seja capaz de otimizar também as estruturas dos pórticos e dos tamponamentos laterais, não apenas a cobertura;
- (ii) Realizar os mesmos testes considerando as ligações como parafusadas;
- (iii) Realizar os mesmos testes abordando outros tipos de perfis (dobrados a frio, telhas de zinco, etc.);
- (iv) Verificar se o número de pórticos continuará sendo o mesmo para outras configurações topológicas, com as mesmas dimensões e características do edifício industrial, além de buscar relações que se apliquem para outras situações;
- (v) Realizar os mesmos testes em edifícios industriais de maiores dimensões, assim como geminados;
- (vi) Ampliar o algoritmo para que este seja capaz de realizar otimização topológica e buscar o número ideal de terças para a cobertura;
- (vii) Utilizar outros algoritmos heurísticos para examinar a possibilidade de um número maior de variáveis envolvidas.



## Referências

- ADELI, H.; KAMAL, O. Efficient optimization of space trusses. *Computers and Structures*, v. 24, n. 3, p. 501–511, 1986. Citado na página 23.
- ADELI, H.; KAMAL, O. Efficient optimization of plane trusses. *Adv. Eng. Software*, v. 13, n. 3, p. 116–122, 1991. Citado na página 23.
- ARORA, J. S. *Introduction to optimum design*. San Diego, USA: Elsevier, 2012. Citado na página 18.
- ASSIS, A. R. M. G. de. *Avaliação do algoritmo Backtracking Search Optimization adaptado para o tratamento de restrições através de penalização adaptativa (BSA-MPA) na resolução de problemas de engenharia*. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2014. Citado na página 29.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. *Manual Técnico – Telhas de Aço*. São Paulo, 2009. 36 p. Citado na página 84.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1988. 66 p. Citado 7 vezes nas páginas 7, 20, 21, 37, 43, 44 e 71.
- 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. 247 p. Citado 10 vezes nas páginas 7, 20, 21, 37, 40, 43, 45, 46, 62 e 71.
- BELLEI, I. H. *Edifícios Industriais em Aço*. São Paulo: Pini, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 17, 41, 42, 50 e 59.
- BENNETT, J. A. Automated design of truss and frame geometry. *Computers and Structures*, v. 8, p. 717–721, 1978. Citado na página 24.
- CARLON, A. G. *Otimização em Treliças de Estruturas Metálicas Aplicando o Algoritmo ICA*. 85 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2013. Citado na página 28.
- CARLON, A. G. *Desenvolvimento de um novo operador para algoritmos metaheurísticos baseado na maximização da rigidez aplicado à otimização de estruturas treliçadas*. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2015. Citado na página 29.
- CARRARO, F. *Otimização estrutural de pórticos planos utilizando o algoritmo SGA*. 95 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2015. Citado na página 29.
- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. *Volume I – Galpões para Usos Gerais: Bibliografia técnica para o desenvolvimento da construção metálica*. Rio de Janeiro, 2003. 75 p. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.

- CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. *Galpões para Usos Gerais: Manual de construção em aço*. Rio de Janeiro, 2010. 75 p. Citado 5 vezes nas páginas 17, 41, 42, 44 e 45.
- DEB, K.; GULATI, S. Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 37, p. 447–465, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 18, 25 e 29.
- DEMARCHE, J. *Dimensionamento de Galpão Metálico*. 146 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2011. Citado na página 29.
- DOMINGUEZ, A.; STIHARU, I.; SEDAGHATI, R. Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms. *Res. Eng. Design*, v. 17, p. 73–84, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 26.
- FRANS, R.; ARFIADI, Y. Sizing, shape, and topology optimizations of roof trusses using hybridgenetic algorithms. *Procedia Engineering*, v. 95, p. 185–195, 2014. Citado na página 28.
- GALANTE, M. Genetic algorithms as an approach to optimize real-world trusses. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 39, p. 361–382, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- GONÇALVES, M. S.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures. *Computers and Structures*, v. 153, p. 165–184, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 20, 28, 31, 32, 33, 34 e 35.
- GRIERSON, D. E.; PAK, W. H. Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithm. *Structural Optimization*, v. 6, p. 151–159, 1993. Citado na página 19.
- HAJELA, P.; LEE, E. Genetic algorithms in truss topological optimization. *Int. J. Solids Structures*, v. 32, n. 22, p. 3341–3357, 1995. Citado na página 25.
- HAMZA, K.; MAHMOUD, H.; SAITOU, K. Design optimization of n-shaped roof trusses using reactive taboo search. *Applied Soft Computing*, v. 3, p. 221–235, 2003. Citado na página 28.
- HÜLSE, A. O. *Metodologia para Cálculo Automatizado da Força do Vento em Torres de Linhas de Transmissão em Procedimentos de Otimização*. 69 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2015. Citado na página 29.
- KELESOGLU, O. Fuzzy multiobjective optimization of truss-structures using genetic algorithm. *Advances in Engineering Software*, v. 38, p. 717–721, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.
- KIRSCH, U. Optimal topologies of truss structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 72, p. 15–28, 1989. Citado na página 25.

- KOUMOUSIS, V. K.; GEORGIIOU, P. G. Genetic algorithms in discrete optimization of steel truss roofs. *Journal of Structural Engineering*, v. 8, n. 3, p. 309–325, 1994. Citado na página 27.
- LOPEZ, R. H. et al. An approach for the global reliability based design optimization of truss structures. *Uncertainties 2014 - Proceedings of the 2nd International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling*, p. 12, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 24.
- MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; FADEL MIGUEL, L. F. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the firefly algorithm. *Advances in Engineering Software*, v. 56, p. 23–37, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.
- OHSAKI, M. Genetic algorithm for topology optimization of trusses. *Computers and Structures*, v. 57, n. 2, p. 219–225, 1995. Citado na página 25.
- PERFIS GERDAU AÇOMINAS. *Coletânea do Uso do Aço: Volume 3 – galpões em pórticos com perfis estruturais laminados*. São Paulo, 2004. 68 p. Citado na página 17.
- PERFIS GERDAU AÇOMINAS. *Catálogo de bolso GI: Barras e perfis – laminas 1 e 2*. São Paulo, 2011. 16 p. Citado 2 vezes nas páginas 82 e 83.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático*. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- RAJAN, S. D. Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 10, p. 1480–1487, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 25.
- RAJEEV, S.; KRISHNAMOORTHY, C. S. Discrete optimization of structures using genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 5, p. 1233–1250, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 23.
- RIBEIRO, L. A. D. *Otimização Estrutural de Treliças Utilizando o Algoritmo Firefly*. 114 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2014. Citado na página 29.
- SAKA, M. P. Optimum geometry design of roof trusses by optimality criteria method. *Computers and Structures*, v. 38, n. 1, p. 83–92, 1991. Citado na página 27.
- SAKLA, S. S. S.; ELBELTAGI, E. Design of steel roofs subjected to drifted snow using genetic optimization. *Computers and Structures*, v. 81, p. 339–348, 2003. Citado na página 27.
- SALAJEGHEH, E.; VANDERPLAATS, G. N. Optimum design of trusses with discrete sizing and shape variables. *Structural Optimization*, v. 6, p. 79–85, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- SHALLAN, O. et al. Optimization of plane and space trusses using genetic algorithms. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, v. 3, n. 7, p. 66–73, 2014. Citado na página 26.

- SHRESTHA, S. M.; GHABOUSSI, J. Evolution of optimum structural shapes using genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, v. 124, n. 11, p. 1331–1338, 1998. Citado na página 25.
- SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL. *Preços de Insumos Desonerados*. Santa Catarina, 09/2015. 133 p. Citado na página 69.
- SKYLIGHT ESTRUTURAS METÁLICAS. *Perfis U de Chapa Dobrada: Dimensões e propriedades geométricas*. São Paulo, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 82 e 83.
- SOH, C. K.; YANG, J. Fuzzy controlled genetic algorithm search for shape optimization. *Journal of Structural Engineering*, v. 10, n. 2, p. 143–150, 1996. Citado na página 24.
- SONMEZ, M. Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm. *Struct Multidisc Optim*, v. 43, p. 85–97, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 23.
- SORIANO, H. L. *Análise de estruturas – Formulação matricial e implementação computacional*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2005. Citado na página 38.
- SOUZA, R. R. de. *Metodologia para Otimização Topológica, Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres de Linhas de Transmissão*. 62 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2014. Citado na página 29.
- TANG, W.; TONG, L.; GU, Y. Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 62, p. 1737–1762, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.
- THOMAS JR., H. R.; BROW, D. M. Optimum least-cost design of a truss roof system. *Computers and Structures*, v. 7, p. 12–22, 1977. Citado na página 27.
- TORII, A. J.; LOPEZ, R. H.; BIONDINI, F. An approach to reliability-based shape and topology optimization of truss structures. *Engineering Optimization*, v. 44, p. 37–53, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 26.
- WU, S.-J.; CHOW, P.-T. Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses. *Computers and Structures*, v. 56, n. 6, p. 979–991, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 23.



# Apêndices



# APÊNDICE A – Propriedades dos Perfis Adotados

## A.1 Cantoneiras de Abas Iguais

Os perfis das barras das treliças são do tipo cantoneira de abas iguais e sua seção típica pode ser vista na Figura 35. Na Tabela 25 tem-se a lista de opções de perfis que podem ser selecionados no processo de otimização.

## A.2 Perfis $U$ de Chapas Dobradas

As terças utilizadas na coberturas são de perfis  $U$  formados a frio por meio de chapas dobradas, conforme o padrão da Figura 36. Os perfis disponíveis para a otimização estão na Tabela 26.

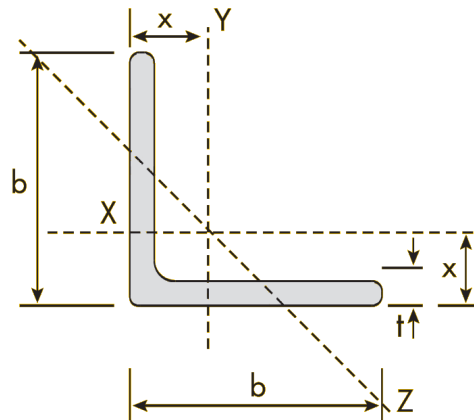
## A.3 Barras Redondas Trefiladas

Os contraventamentos adotados para a estrutura são formados por barras redondas trefiladas. A Figura 37 apresenta a seção típica. A Tabela 27 apresenta os diâmetros disponíveis para os tirantes e a Tabela 28 os para os contraventamentos dos banzos inferiores das treliças.

## A.4 Telhas Trapezoidal 40

As telhas escolhidas para o tamponamento da cobertura são do tipo Trapezoidal 40, conforma Figura 38. Suas características podem ser vistas na Tabela 29.

Figura 35 – Seção Típica – Cantoneira de Abas Iguais



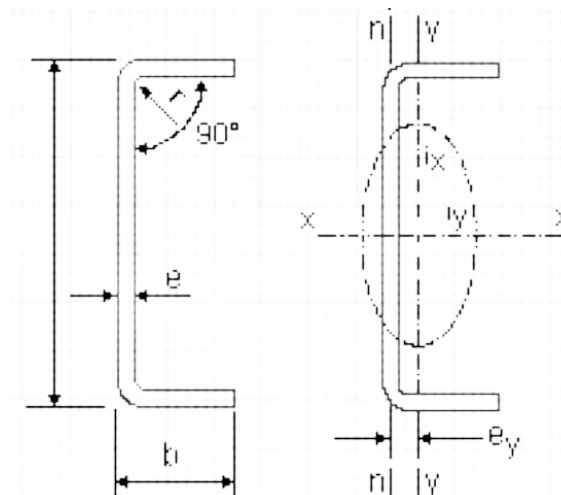
Fonte: (GERDAU, 2011)

Tabela 25 – Perfis Cantoneira de Abas Iguais

Índice	área $cm^2$	$b_w$ $mm$	$t_w$ $mm$	$I_x = I_y$ $cm^4$	$r_x = r_y$ $cm$	$r_{min}$ $cm$	$\bar{x}$ $cm$
1	2.32	38.10	3.18	3.33	1.17	0.76	1.07
2	2.71	44.45	3.18	5.41	1.40	0.89	1.22
3	3.10	50.80	3.18	7.91	1.60	1.02	1.40
4	4.58	50.80	4.76	11.70	1.58	1.02	1.45
5	5.80	63.50	4.76	23.00	1.98	1.24	1.75
6	7.03	76.20	4.76	40.00	2.39	1.50	2.08
7	9.29	76.20	6.35	50.00	2.36	1.50	2.13
8	10.90	88.90	6.35	83.70	2.77	1.76	2.46
9	12.51	101.60	6.35	125.00	3.17	2.00	2.77

Fonte: Adaptado (GERDAU, 2011)

Figura 36 – Seção Típica – Perfil U Formado a Frio



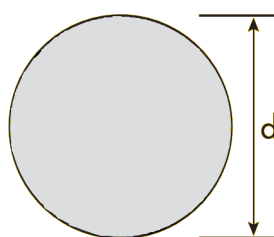
Fonte: (SKYLIGHT, 2008)

Tabela 26 – Perfis  $U$  Formados a Frio

<i>Índice</i>	<i>área</i> $cm^2$	$W_x$ $cm^3$	$W_y$ $cm^3$	$I_x$ $cm^4$
1	7.70	40.9	3.78	409.3
2	8.75	46.2	4.29	462.4
3	9.80	51.4	4.79	514.1
4	10.83	56.4	5.29	564.5
5	11.85	61.3	5.77	613.6
6	13.39	68.6	6.51	686.2
7	16.02	90.5	13.20	905.6
8	17.02	100.0	17.11	1000.7

Fonte: Adaptado (SKYLIGHT, 2008)

Figura 37 – Seção Típica – Barra Redonda Trefilada



Fonte: (GERDAU, 2011)

Tabela 27 – Perfis de Barras Redondas Trefiladas – Tirante

<i>Índice</i>	$d$ $mm$
1	12.00
2	12.70
3	13.30
4	14.00

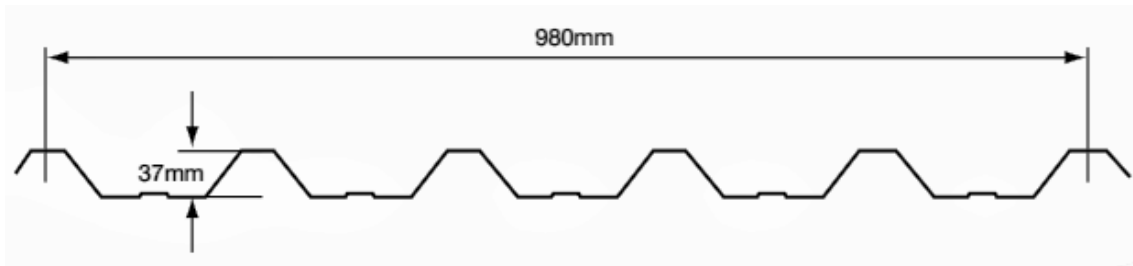
Fonte: Adaptado (GERDAU, 2011)

Tabela 28 – Perfis de Barras Redondas Trefiladas – Contraventamento dos Banzos Inferiores

<i>Índice</i>	$d$ $mm$
1	16.00
2	16.90
3	17.00
4	17.20

Fonte: Adaptado (GERDAU, 2011)

Figura 38 – Seção Típica – Telha Trapezoidal 40



Fonte: (ABCEM, 2009)

Tabela 29 – Perfis de Telhas Trapezoidais 40

Índice	Esp. (mm)	Massa (kg/m <sup>2</sup> )	N <sup>o</sup> de apoios	Distância entre apoios (m)					
				1.75	2	2.25	2.5	2.75	3
1	0.80	7.43	4	404	309	244	187	141	108
2	0.95	8.86	4	476	365	288	221	166	128
3	1.25	11.69	4	619	474	375	288	216	166

Fonte: Adaptado (ABCEM, 2009)