

Otimização do Dimensionamento de Estruturas Tubulares Espaciais de Aço

Larissa Novelli¹
Élcio Cassimiro Alves²
Macksuel Soares de Azevedo³

Resumo

A utilização de estruturas tubulares, em sistemas treliçados, é muito eficiente para vencer grandes vãos em projetos de coberturas. Buscou-se a partir dos critérios preconizados pelas NBR 8800:2008 e NBR 16239:2013, tais como critérios de resistência a tração e compressão, bem como critério de deformabilidade, desenvolver um programa em Matlab com interface gráfica para o dimensionamento otimizado de estruturas de aço treliçadas tubulares. Na fase de pré-processamento, o modelo inicial pode ser importado de um arquivo do Autocad e a solução do problema de otimização foi obtida utilizando-se o método de programação quadrática sequencial.

Palavras-chave: Estruturas treliçadas, Estruturas tubulares, Otimização, NBR 8800.

1 Introdução

O Brasil nos últimos anos vem passando pelo processo de industrialização da construção civil e as estruturas de aço surgiram como uma ótima alternativa. Como todas as peças são fabricadas nas indústrias, os canteiros de obras ficam mais limpos e organizados, além das peças possuírem suas propriedades mecânicas e geométricas bem definidas, o que garante mais segurança à obra.

Dentro do contexto das estruturas de aço, as treliçadas tubulares aparecem como uma excelente alternativa para problemas como elevadas cargas nas fundações e obtenção de maiores vãos livres. Assim passam a ser muito utilizadas em coberturas, pontes, torres de transmissão, arenas e estádios. Um exemplo do grande uso de perfis tubulares foi para a construção de vários estádios para a Copa do Mundo, realizada em junho de 2014 no Brasil, entre eles encontra-se a Arena Corinthians (Figura 1).

Esse tipo de estrutura ainda é visto como um projeto caro devido ao custo do aço. Assim, ocorre a necessidade de se buscar projetos eficientes com custo reduzido. Procura-se então o dimensionamento das barras das treliças para que elas suportem altas cargas, com área de seção transversal reduzida, mas sem comprometer o seu correto funcionamento.



Fonte: Disponível em: <www.ironbridge.org.uk>. Acesso em: 26 maio 2015.

Figura 1 – Arena Corinthians.

Esse tipo de estrutura ainda é visto como um projeto caro devido ao custo do aço. Assim, ocorre a necessidade de se buscar projetos eficientes com custo reduzido. Procura-se então o dimensionamento das barras das treliças para que elas suportem altas cargas, com área de seção transversal reduzida, mas sem comprometer o seu correto funcionamento.

A busca de uma boa solução para um problema estrutural requer muito tempo e mesmo assim não se tem a garantia de que a solução encontrada é a melhor (Fonseca, 2007).

1 Aluna de Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo, Larissa.novelli@hotmail.com

2 Professor da Universidade Federal do Espírito Santo. elcio.calves1@gmail.com

3 Professor da Universidade Federal do Espírito Santo. macksuel.azevedo@gmail.com

Uma alternativa para essa questão é a implementação de algoritmos que resolvam as equações de forma iterativa utilizando-se de recursos computacionais. Para isso surge o estudo e utilização dos métodos de otimização.

Muitos problemas de otimização podem ser resolvidos através de métodos de programação não-linear baseados em gradientes. Um dos métodos mais importantes é o de Programação Quadrática Sequencial (SQP), que consiste basicamente na aproximação do problema de programação não-linear como um problema de programação quadrática. Problemas envolvendo otimização de treliças vêm sendo amplamente estudados nos últimos anos enfocando principalmente o estudo de treliças planas e outros métodos de otimização. Dentre os trabalhos mais recentes, Silva *et al.* (2014) apresenta um estudo sobre otimização dimensional de treliças com a utilização do Método Simulated Annealing. Silva *et al.* (2014), apresenta ainda um estudo de otimização de forma e dimensional de treliças baseado em um algoritmo híbrido de otimização. Fonseca (2007) apresenta um estudo sobre otimização de treliças submetidas a carregamento estático e dinâmicos usando algoritmos genéticos e redes neurais.

2 Dimensionamento de estruturas metálicas

2.1 Barras submetidas à força axial de tração

Segundo a NBR 8800:2008 o dimensionamento a tração tem que atender

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (1)$$

onde

$N_{t,Sd}$ = força axial de tração solicitante de cálculo;

$N_{t,Rd}$ = força axial de tração resistente de cálculo.

A força axial resistente de cálculo usada no dimensionamento deve ser a menor encontrada segundo os dois casos abaixo:

a) para escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2)$$

b) para ruptura da seção líquida

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (3)$$

onde

A_g = área bruta da seção transversal da barra;

A_e = área líquida efetiva da seção transversal da barra;

f_y = resistência ao escoamento do aço;

f_u = resistência à ruptura do aço;

γ_{a1} = coeficiente de ponderação de resistência para escoamento de aço estrutural igual a 1,1 para combinações normais;

γ_{a2} = coeficiente de ponderação de resistência para ruptura de aço estrutural igual a 1,35 para combinações normais.

2.1.1 Cálculo da área líquida efetiva

$$A_e = C_t A_n \quad (4)$$

onde

A_n = área líquida da barra;

C_t = coeficiente de redução da área líquida.

Admitindo-se que não existam furos, a área líquida, A_n , deve ser tomada igual à área transversal, A_g .

E adotando-se que a força de tração é transmitida para toda a seção transversal por solda, C_t deve ser tomado igual a 1.

2.1.2 Limitação do índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300 \quad (5)$$

onde

L = comprimento destravado, tomado igual ao comprimento da própria barra;

r = raio de giração.

2.2 Barras submetidas à força axial de compressão

Segundo a ABNT NBR 8800:2008 o dimensionamento a compressão tem que atender:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (6)$$

onde

$N_{c,Sd}$ = força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ = força axial de compressão resistente de cálculo.

2.2.1 Força axial resistente de cálculo

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (7)$$

onde

χ = fator de redução associado à resistência à compressão;
 Q = fator de redução total associado à flambagem local;
 A_g = área bruta da seção transversal da barra.

2.2.2 Fator de redução χ

O fator de redução associado à força axial de compressão resistente, para perfis tubulares é dado pela NBR 16239: 2013

$$\chi = \frac{I}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{1/2,24}} \tag{8}$$

sendo o índice de esbeltez reduzido dado por

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \tag{9}$$

onde

A_g = área bruta da seção transversal;
 N_e = força axial de flambagem elástica;
 Q = fator de redução total associado à flambagem local.

2.2.3 Flambagem local das barras axialmente comprimidas

Os elementos pertencentes aos perfis tubulares retangulares e quadrados são classificados como elementos AA, pois têm duas bordas vinculadas, assim

$$Q = Q_a \tag{10}$$

Para valores da relação b/t menor que o limite estabelecido na Tabela 1, $Q_a = 1$.

Quando a relação é maior que a limite, tem-se

$$Q_a = \frac{Q_{ef}}{A_g} \tag{11}$$

onde:

$$A_{ef} = A_g - \Sigma (b - b_{ef}) t \tag{12}$$

$$b_{ef} = 1,92 t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b \tag{13}$$

onde

A_{ef} = área efetiva da seção transversal;
 b = largura do elemento;
 t = espessura do elemento;
 b_{ef} = largura efetiva do elemento AA;
 $c_a = 0,38$;
 σ = tensão que pode ser tomada igual a f_y .

Os perfis de seções tubulares circulares têm uma classificação à parte:

$$a) Q = 1,00 \quad \text{para} \quad \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y} \tag{14}$$

$$b) Q = \frac{0,038}{D/t} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \quad \text{para} \tag{15}$$

$$0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y}$$

Tabela 1 – Fator de redução total associado à flambagem local

Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
1	<ul style="list-style-type: none"> — Mesas ou almas de seções tubulares retangulares — Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas 		$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

2.2.4 Força axial de flambagem elástica

Para as seções tubulares que são duplamente simétricas a força axial de flambagem elástica, N_e , é dada por:

– para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia x da seção transversal

$$N_{ex} = \frac{(\pi^2 EI_x)}{(K_x L_x)^2} \quad (16)$$

– para flambagem por flexão em relação ao eixo central de inércia y da seção transversal

$$N_{ey} = \frac{(\pi^2 EI_y)}{(K_y L_y)^2} \quad (17)$$

– para flambagem por flexão em relação ao eixo longitudinal z

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (18)$$

e o raio de giração polar

$$r_0 = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2)} \quad (19)$$

onde

$K_x = K_y = K_z$ = depende das condições de extremidade para o cálculo do comprimento de flambagem que no caso da treliça é igual a 1 pois as barras são birotuladas;

I_x e I_y = momentos de inércia;

C_w = constante de empenamento que para seções tubulares retangulares, quadradas e circulares é zero;

J = constante de torção da seção transversal.

Sendo N_e o menor dos valores entre N_{ex} , N_{ey} e N_{ez} .

2.2.5 Limitação do índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{KL}{T} \leq 200 \quad (20)$$

onde

K = coeficiente de flambagem igual a 1;

L = comprimento destravado, tomado igual ao comprimento da própria barra;

r = raio de giração.

3 Otimização

Técnicas de otimização estrutural são importantes ferramentas que podem ser utilizadas no processo para se determinar a melhor solução estrutural para um determinado problema. Esse problema é chamado de objetivo e pode representar alguma quantidade, qualidade ou qualquer outro fator que pode ser apresentado como um número. Nos problemas de otimização são utilizados alguns conceitos importantes de serem destacados, tais como:

$$\text{Minimizar} \quad f(x) \quad (21)$$

$$\text{Sujeito a} \quad c(x) \leq 0 \quad (22)$$

$$Ceq(x) = 0 \quad (23)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (24)$$

$$x_0 \quad (25)$$

onde

$f(x)$ – função objetivo. Função principal que deverá ser minimizada ou maximizada;

$c(x) \leq 0$ – restrições. São inequações que devem ser atendidas;

$ceq(x) = 0$ – restrições. São equações que devem ser atendidas;

lb – vetor de limites inferiores;

ub – vetor de limites superiores;

x_0 – ponto inicial das iterações.

4 Formulação do Problema de Otimização

Diante dos vários métodos de otimização utilizou-se o método de programação sequencial quadrática. Esse método tem algoritmos já implementados e testados, onde apenas a entrada da função objetivo e as restrições são necessárias. O ambiente utilizado para o desenvolvimento do problema foi o Matlab.

Para formulação do modelo de otimização utilizou-se a dimensional que irá modificar apenas o perfil e não influenciará na forma da estrutura.

4.1 Função Objetivo

A função objetivo que se deseja minimizar é a função custo da estrutura que está diretamente ligada

ao peso da estrutura, porém, como a massa específica do aço é constante, busca-se então minimizar a área da seção transversal em função dos seus parâmetros geométricos.

Os perfis tubulares podem ser tanto circulares, retangulares ou quadrados. Buscou-se então analisar a otimização de cada tipo de perfil separadamente, variando suas dimensões, assim a variável área a ser minimizada é calculada por meio das dimensões do perfil.

A função objetivo é apresentada na Equação 26, e o custo total da estrutura é obtido pelo somatório de $f(x)$ para todas as barras

$$f(x) = A(x) * \rho * L * custo \quad (26)$$

onde

$A(x)$ – área da seção transversal em função das dimensões e do perfil escolhido para a análise do problema;

ρ – peso específico do aço em kg/m^3 ;

L – comprimento da barra em m;

Custo – preço do aço por kg.

4.2 Restrições

As restrições às quais o problema está submetido devem ser analisadas para cada barra da treliça, e são divididas em

• Análise das solicitações máximas

Na análise das solicitações deve ser atendida a principal relação: “As solicitações devem ser menores que os esforços resistentes de cálculo”. A solicitação que cada barra está sendo submetida é verificada e direcionada para cada caso específico.

As barras submetidas a força axial nula: adotam-se as dimensões mínimas para o perfil.

Para as barras submetidas à força axial de tração: as dimensões são verificadas conforme apresentado no item 2.1.

$$N_{t,Sd} - N_{t,Rd} \leq 0 \quad (27)$$

As barras submetidas à força axial de compressão: as dimensões são determinadas de acordo com o item 2.2.

$$N_{c,Sd} - N_{c,Rd} \leq 0 \quad (28)$$

• Análise dos limites de esbeltez

As barras submetidas à força axial de tração: dimensionadas conforme o item 2.1.

$$-300 + \lambda \leq 0 \quad (29)$$

As barras submetidas à força axial de compressão: apresentado no item 2.2.

$$-200 + \lambda \leq 0 \quad (30)$$

• Relação entre as dimensões

Para obterem-se os limites das dimensões máximas e mínimas e as relações entre essas dimensões, tomou-se como referência o catálogo da empresa Vallourec, que é fabricante de tubos estruturais.

As restrições apresentadas nas equações 27, 28, 29 e 30 foram apresentadas no item 2 de acordo com as normas vigentes para verificação de estruturas metálicas.

Para o problema em questão foram utilizadas as seguintes propriedades do aço:

- módulo de elasticidade, $E = 200000 \text{ MPa}$;
- coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$;
- módulo de elasticidade transversal, $G = 77000 \text{ MPa}$;
- massa específica, $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

5 Implementação Computacional

Para a implementação computacional dos algoritmos da otimização utilizou-se o programa de computador Matlab. Esse *software* tem o método de programação quadrática sequencial (SQP) como função da sua biblioteca e também a opção de gerar “guias”, o que torna o programa mais interativo para o usuário.

Os algoritmos elaborados foram transferidos para um programa de computador intitulado “Structure3D”. Este programa foi formulado como projeto de graduação e tem como objetivo o cálculo dos esforços internos da estrutura, seus deslocamentos e reações de apoio.

O desenho da estrutura a ser analisada pode ser importado do AutoCad ou ter sua entrada manual no próprio programa. As solicitações e as condições de apoio podem ser inseridas diretamente na estrutura. Em relação às propriedades mecânicas essas podem ser escolhidas a partir de uma tabela com os valores comerciais fornecidos pela empresa Vallourec, ou podem ser digitados manualmente. A Figura 2 apresenta a tela inicial do programa.

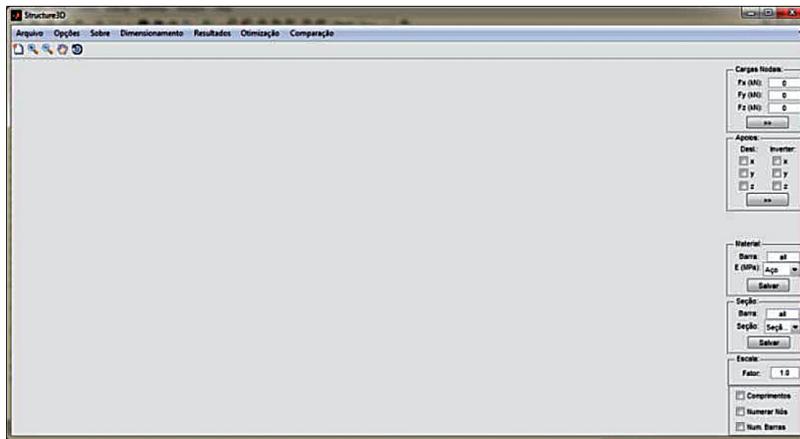


Figura 2 – Tela inicial.

Inicialmente para a otimização é necessário escolher o perfil que se deseja utilizar na estrutura. Para isso criou-se uma “guia” na qual o usuário seleciona o perfil e digita-se o custo do aço, por kg, para o cálculo do custo total.

Dependendo do perfil que foi selecionado, o programa passa para o algoritmo daquele tipo de perfil específico. Cada um tem suas variáveis principais e suas particularidades em relação às restrições.

Em cada iteração de otimização é recalculado as solicitações da estrutura utilizando-se como parâmetros as dimensões encontradas. No cálculo dessas solicitações utiliza-se o método dos elementos finitos, mais especificamente o método dos deslocamentos. Encontrada a solução ótima o programa retorna o resultado em forma de tabelas.

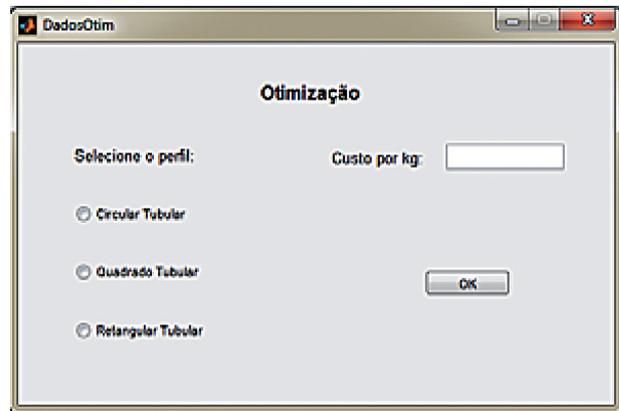


Figura 3 – Tela de seleção do perfil.



Figura 4 – Tela de resultado da otimização.

6 Exemplos Numéricos

Serão apresentados três exemplos numéricos, um de uma treliça plana e outros dois de treliças espaciais. Para todos serão apresentados a estrutura e o resultado da otimização.

6.1 Treliça Plana

Para a treliça plana escolheu-se como exemplo uma treliça de 21 barras. Selecionou-se o aço VMB250 com módulo de elasticidade $E = 200000$ MPa, resistência ao escoamento do aço $f_y = 250$ MPa e resistência à ruptura do aço $f_u = 400$ MPa. A Figura 5 mostra a estrutura com os apoios, o carregamento e as

numerações das barras. A treliça tem 1,5 m de altura e 1,5 m entre nós inferiores e superiores.

Para a otimização dessa treliça escolheu-se o perfil tubular, comparando os diferentes tipos de perfil para o mesmo problema, e um custo de R\$ 4,00/kg de aço. A Figura 6 apresenta o resultado da otimização, com os valores das dimensões, o peso total e o custo total da estrutura.

As Tabelas 2 e 3 apresentam a comparação entre o dimensionamento convencional e o dimensionamento ótimo para os três tipos de perfis. Para o cálculo das solicitações, no dimensionamento convencional, utilizou-se: circular (33,4 mm x 3,6 mm), quadrado (50 mm x 50 mm x 4 mm) e retangular (60 mm x 40 mm x 4 mm).

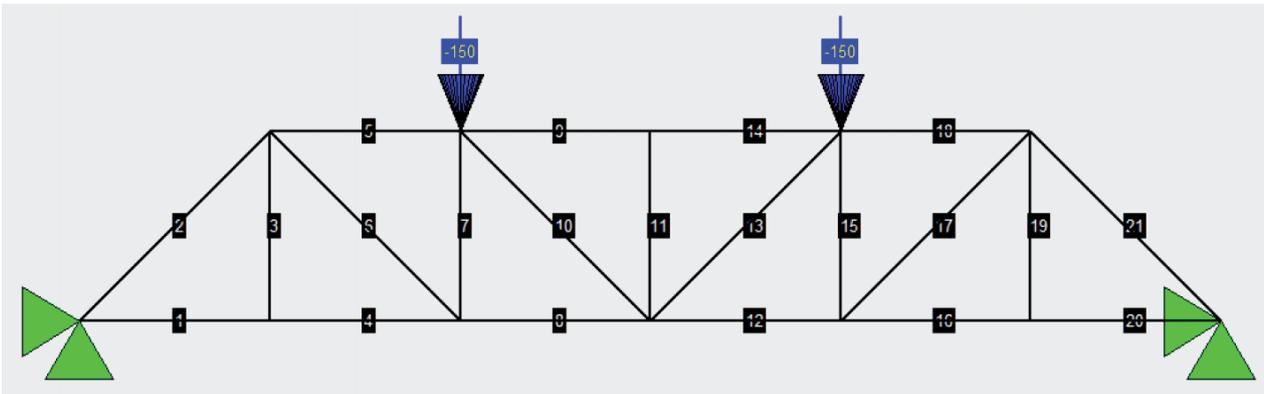


Figura 5 – Treliça plana.

Resultado da Otimização

Barra	D (mm)	h (mm)	b (mm)	t (mm)
1	39.0156			4.2336
2	122.0197			3.6463
3	33.4000			3.2001
4	52.3982			3.2004
5	111.6065			5.6260
6	79.4000			5.6469
7	90.3103			3.4979
8	42.7483			6.1051
9	130.3369			4.7270
10	33.4010			3.5481
11	34.0518			3.2388
12	44.9368			5.7437
13	33.6124			3.2103
14	124.4881			4.9753
15	96.8368			3.2400
16	41.5361			3.2669
17	61.8258			7.6611
18	120.3092			5.1774
19	33.7315			3.2176
20	44.3387			3.2002
21	112.0253			4.1055

Peso Total da Estrutura: 258.6454
 Custo Total da Estrutura: 1034.5816

Figura 6 – Resultado da otimização.

Tabela 2 – Tabela comparativa para perfis circulares e quadrados.

	Dimensionamento Perfil Circular				Dimensionamento Perfil Quadrado				
	Convencional		Ótimo		Convencional		Ótimo		
Barras	d (mm)	t (mm)	d (mm)	t (mm)	Barras	b (mm)	t (mm)	b (mm)	t (mm)
1	48,3	3,6	39,02	4,23	1	50,0	3,6	50,00	3,60
2	114,3	4,0	122,02	3,65	2	90,0	4,5	96,42	3,73
3	33,4	3,2	33,40	3,20	3	50,0	3,6	50,00	3,60
4	48,3	3,6	52,40	3,20	4	50,0	3,6	50,00	3,60
5	114,3	5,6	111,69	5,63	5	80,0	7,1	82,60	6,23
6	88,9	5,0	79,48	5,65	6	70,0	5,0	60,98	5,95
7	88,9	3,6	90,31	3,50	7	80,0	3,6	70,74	3,62
8	48,3	4,5	42,75	6,11	8	50,0	3,6	50,01	3,60
9	114,3	5,6	130,34	4,73	9	80,0	7,1	80,70	6,44
10	33,4	3,2	33,40	3,55	10	50,0	3,6	50,00	3,60
11	33,4	3,2	34,05	3,24	11	50,0	3,6	50,01	3,60
12	48,3	4,5	44,94	5,74	12	50,0	3,6	50,00	3,60
13	33,4	3,2	33,61	3,21	13	50,0	3,6	50,00	3,60
14	114,3	5,6	124,49	4,98	14	80,0	7,1	85,02	6,01
15	88,9	3,6	95,84	3,25	15	80,0	3,6	70,78	3,60
16	48,3	3,6	41,54	3,27	16	50,0	3,6	50,00	3,60
17	88,9	5,0	61,83	7,66	17	70,0	5,0	51,81	7,33
18	114,3	5,6	120,31	5,18	18	80,0	7,1	88,20	5,74
19	33,4	3,2	33,73	3,22	19	50,0	3,6	50,21	3,60
20	48,3	3,6	44,34	3,20	20	50,0	3,6	50,00	3,60
21	114,3	4,0	112,03	4,11	21	90,0	4,5	99,35	3,62
Peso (kg)	262,0756		258,6454		Peso (kg)	311,0360		295,1348	

Tabela 3 – Tabela comparativa para perfis retangulares

Barras	Dimensionamento					
	Convencional			Ótimo		
	h (mm)	b (mm)	t (mm)	h (mm)	b (mm)	t (mm)
1	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
2	110	80	4,5	60,00	98,68	3,61
3	60	40	3,6	60,00	40,09	3,60
4	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
5	110	80	5,6	60,00	87,11	5,78
6	90	50	5,0	60,00	48,54	6,39
7	80	50	5,0	60,00	70,67	3,60
8	60	40	3,6	60,00	40,07	3,60
9	110	80	5,6	60,00	83,97	6,10
10	60	40	3,6	60,00	40,22	3,60
11	60	40	3,6	60,00	40,22	3,60
12	60	40	3,6	60,00	40,17	3,60
13	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
14	110	80	5,6	60,00	85,04	6,01
15	80	50	5,0	60,00	71,30	3,60
16	60	40	3,6	60,00	40,21	3,60
17	90	50	5,0	60,00	49,18	6,42
18	110	80	5,6	60,00	83,58	6,15
19	60	40	3,6	60,00	40,12	3,60
20	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
21	110	80	4,5	60,00	100,83	3,60
Peso (kg)	313,1917			295,3390		

6.2 Treliça Espacial 1

Para a treliça espacial escolheu-se como exemplo uma treliça de 27 barras. Selecionou-se o aço VMB 300 com módulo de elasticidade $E = 200000$ MPa,

resistência ao escoamento do aço $f_y = 300$ MPa e resistência à ruptura do aço $f_u = 415$ MPa. A Figura 7 mostra a estrutura com os apoios, o carregamento e numeração das barras e a Figura 8 as cotas da estrutura.

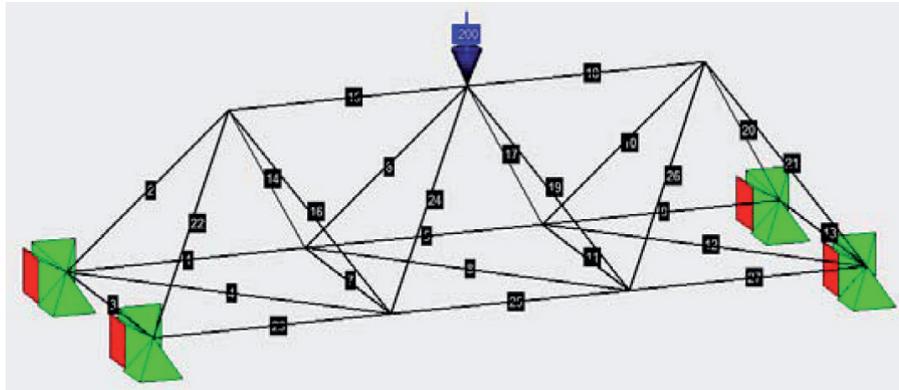


Figura 7 – Treliça espacial.

Tabela 4 – Tabela comparativa para perfis circulares e quadrados.

Barras	Dimensionamento Perfil Circular				Dimensionamento Perfil Quadrado				
	Convencional		Ótimo		Convencional		Ótimo		
	d (mm)	t (mm)	d (mm)	t (mm)	Barras	b (mm)	t (mm)	b (mm)	t (mm)
1	42,2	3,6	44,34	3,20	1	50	3,6	50,00	3,60
2	60,3	4,0	62,89	3,20	2	60	3,6	50,92	3,60
3	33,4	3,2	33,40	3,20	3	50	3,6	50,00	3,60
4	48,3	3,6	43,07	3,20	4	50	3,6	50,00	3,60
5	33,4	3,2	33,40	3,20	5	50	3,6	50,00	3,60
6	60,3	4,0	62,89	3,20	6	60	3,6	50,92	3,60
7	33,4	3,2	33,40	3,20	7	50	3,6	50,00	3,60
8	48,3	3,6	43,07	3,20	8	50	3,6	50,00	3,60
9	42,2	3,6	44,38	3,20	9	50	3,6	50,00	3,60
10	38,1	3,6	33,48	3,78	10	50	3,6	50,00	3,60
11	33,4	3,2	33,40	3,20	11	50	3,6	50,00	3,60
12	33,4	3,2	33,40	3,20	12	50	3,6	50,00	3,60
13	33,4	3,2	33,40	3,20	13	50	3,6	50,00	3,60
14	38,1	3,6	33,48	3,78	14	50	3,6	50,00	3,60
15	88,9	3,6	84,82	3,20	15	70	3,6	66,27	3,60
16	38,1	3,6	33,49	3,80	16	50	3,6	50,00	3,60
17	60,3	4,0	62,88	3,20	17	60	3,6	50,93	3,60
18	88,9	3,6	84,95	3,20	18	70	3,6	66,41	3,60
19	60,3	4,0	62,76	3,20	19	60	3,6	50,76	3,60
20	60,3	4,0	62,88	3,20	20	60	3,6	50,93	3,60
21	60,3	4,0	63,14	3,20	21	60	3,6	51,23	3,60
22	60,3	4,0	63,01	3,20	22	60	3,6	51,09	3,60
23	42,2	3,6	44,29	3,20	23	50	3,6	50,00	3,60
24	60,3	4,0	63,01	3,20	24	60	3,6	51,09	3,60
25	33,4	3,2	33,40	3,20	25	50	3,6	50,00	3,60
26	38,1	3,6	33,49	3,82	26	50	3,6	50,00	3,60
27	42,2	3,6	44,43	3,20	27	50	3,6	50,00	3,60
Peso (kg)	232,3506		205,5741		Peso (kg)	327,8289		309,3653	

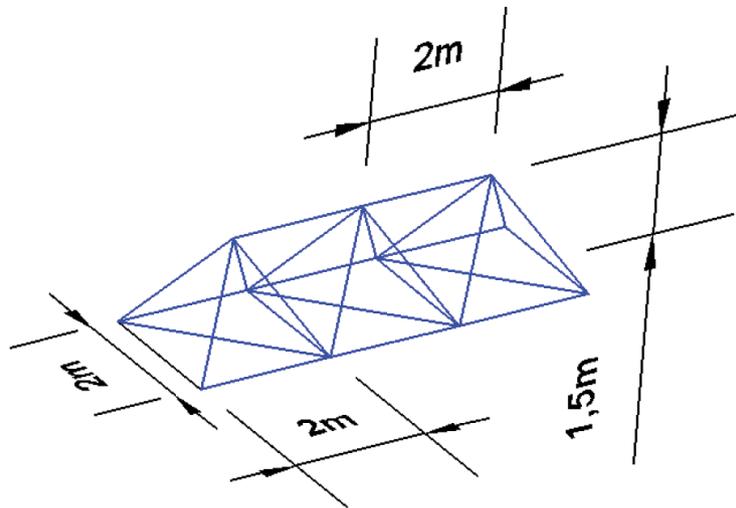


Figura 8 – Dimensões da treliça espacial.

Tabela 5 – Tabela comparativa para perfis retangulares

Dimensionamento						
Barras	Convencional			Ótimo		
	h (mm)	b (mm)	t (mm)	h (mm)	b (mm)	t (mm)
1	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
2	70	50	3,6	60,00	47,80	3,60
3	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
4	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
5	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
6	70	50	3,6	60,00	47,80	3,60
7	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
8	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
9	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
10	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
11	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
12	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
13	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
14	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
15	102	52	4,0	60,00	66,27	3,60
16	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
17	70	50	3,6	60,00	47,81	3,60
18	102	52	4,0	60,00	66,41	3,60
19	70	50	3,6	60,00	47,60	3,60
20	70	50	3,6	60,00	47,81	3,60
21	70	50	3,6	60,00	48,19	3,60
22	70	50	3,6	60,00	48,01	3,60
23	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
24	70	50	3,6	60,00	48,01	3,60
25	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
26	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
27	60	40	3,6	60,00	40,00	3,60
Peso (kg)	334,4806			314,8745		

As Tabelas 4 e 5 apresentam a comparação entre o dimensionamento convencional e o dimensionamento ótimo para os três tipos de perfis. Para o cálculo dos esforços internos, no dimensionamento convencional, utilizou-se: circular (60,3 mm x 4,5 mm), quadrado (50 mm x 50 mm x 4,5 mm) e retangular (60mm x 40 mm x 4,5 mm).

6.3 Treliça Espacial 2

O segundo exemplo de treliça espacial refere-se a um domo treliçado de 52 barras. Selecionou-se o aço VMB 250 com módulo de elasticidade $E = 200000$ MPa,

resistência ao escoamento do aço $f_y = 250$ MPa e resistência à ruptura do aço $f_u = 400$ MPa. A otimização será feita para perfis circulares e quadrados e na comparação com o dimensionamento convencional utilizará o perfil circular (48,3 mm x 4,5 mm) e o quadrado (60 mm x 60 mm x 4 mm). As Figuras 9 e 10 apresentam as características geométricas da treliça e a Tabela 6 apresentam os resultados da otimização.

Observa-se que houve uma redução de peso considerável quando utilizou-se o perfil circular de aproximadamente 32,3% em relação ao dimensionamento convencional. Por sua vez para o perfil quadrado a redução foi apenas de 2,53%.

Tabela 6 – Tabela comparativa para perfis circulares e quadrados

Barras	Perfil Circular				Perfil Quadrado			
	Convencional		Ótimo		Convencional		Ótimo	
	d (mm)	t (mm)	d (mm)	t (mm)	b (mm)	t (mm)	b (mm)	t (mm)
1, 4, 13, 20, 33, 44, 49, 52	88,9	3,6	72,77	3,20	70	3,6	63,80	3,60
2, 9, 15, 19, 21, 41, 43, 51	101,6	4,0	90,67	3,20	80	3,6	79,32	3,60
3, 5, 6, 32, 34, 47, 48, 50,	101,6	4,0	61,47	3,20	80	3,6	79,32	3,60
7, 10, 14, 22, 24, 40, 42, 46	33,4	3,2	33,40	3,20	50	3,6	50,00	3,60
8, 23, 30, 45	48,3	4,0	50,15	3,20	50	3,6	50,00	3,60
11, 12, 16, 29, 31, 37, 38, 39	60,3	3,6	48,09	3,20	50	3,6	50,00	3,60
17, 26, 28, 35	88,9	4,5	110,93	3,20	80	4,0	82,20	3,60
18, 25, 27, 36	48,3	4,5	40,04	5,39	50	3,6	50,00	3,60
Peso (kg)	1.609,9000		1089,8058		1.598,4		1557,8753	

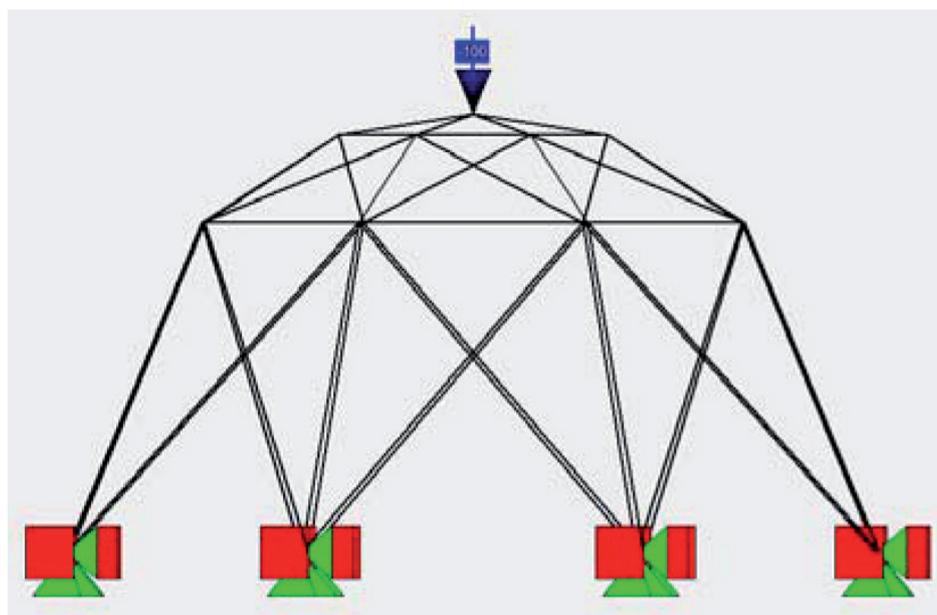


Figura 9 – Domo treliçado.

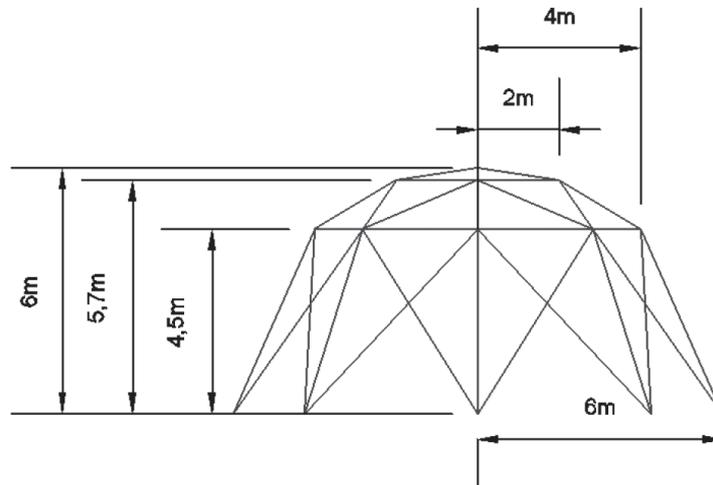


Figura 10 – Dimensões da treliça em m

7 Conclusões

Com a elaboração do programa de dimensionamento otimizado foi possível determinar uma solução “ótima” com um dispêndio de tempo muito menor, que não seria alcançado sem recursos computacionais, além de todas as restrições de norma serem devidamente verificadas.

A partir da análise dos resultados gerados percebeu-se que houve uma redução do peso total tanto para estruturas planas quanto para as estruturas espaciais, consequentemente gerando um menor custo final. Isso cria a possibilidade de aumento da produção e maior facilidade no transporte das peças.

É importante ressaltar que o dimensionamento “ótimo” é realizado para todas as barras, não levando assim em consideração aspectos construtivos, algo que pode ser imposto em melhorias futuras.

8 Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. NBR 8800. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares, NBR 16239, Rio de Janeiro, 2013.
- DA FONSECA, Marcelo, 2007. Otimização de estruturas treliçadas planas e espaciais sob carregamento estáticos e dinâmicos, usando algoritmos genéticos e

redes neurais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FILHO, H. G.; GAROZI, M. J. P, 2014. Desenvolvimento de rotina em MatLab para análise de treliças espaciais. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

Imagem. Areana Corinthians. Disponível em: <<http://www.estruturastubulares.com/Obras/SitePages/Arena%20Corinthians%20-%20S%C3%A3o%20Paulo,%20SP.aspx>>. Acesso em: 26 maio 2015.

JUNIOR, C. A. V, 2014. Interface Gráfica Guide. Disponível em: <<http://www.eq.ufrj.br/links/h2cin/carlosandre>>. Acesso em: 04 dezembro 2014.

MARTNS, T. F. A, 2011. Otimização de estruturas de treliças utilizando técnicas de programação linear. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.

NETO, J. A. F.; VIEIRA, I. A, 1974. Análise matricial de estruturas. 2ª ed. Curitiba.

PRUDENTE, Mauro, 1998. Otimização de estruturas de aço treliçadas planas com variáveis discretas. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, F. E. C.; SANTOS, F. P.; PEREIRA, J. T., Otimização de Forma e Dimensional de Estruturas Treliçadas Utilizando Algoritmo Híbrido, Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais Aplicados a Engenharia, Fortaleza-CE-2014.

SILVA, F. E. C.; SANTOS, F. P.; PEREIRA, J. T., Otimização Dimensional de Treliças Por Simulated Annealing Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais Aplicados a Engenharia, Fortaleza-CE-2014.