



AUTOMAÇÃO DO CÁLCULO DE TRELIÇAS PLANAS DE PERFIS TUBULARES PARA VIGAS DE COBERTURA DE GALPÕES

Débora Maia Guimarães

Mateus Zimmer Dietrich

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani

deboramaiag@hotmail.com

mateuszimmerdietrich@gmail.com

afcalenzani@gamil.com

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo

Avenida Fernando Ferrari, 29075-910, Vitória. Espírito Santo, Brasil

Resumo. Atualmente, o uso de estruturas de aço tubulares vem sendo disseminado devido às inúmeras vantagens desta estrutura no desenvolvimento de projetos, dentre elas, pode-se citar a alta eficiência estrutural devido à sua forma geométrica, que proporciona soluções mais econômicas. No segmento de edificações industriais, os galpões constituem-se uma solução econômica e de grande utilização, e é, especialmente nestas estruturas, que os sistemas de cobertura de aço pré-fabricados têm se destacado. Este trabalho tem como objetivo automatizar o cálculo de treliças planas com perfis tubulares de seção circular, disponibilizando à academia e ao mercado de trabalho uma ferramenta computacional que facilite os cálculos envolvidos na análise e dimensionamento dessas treliças. Um programa computacional para análise linear de treliças planas no MATLAB (2010) foi desenvolvido utilizando o método dos deslocamentos. O programa também dimensiona perfis tubulares circulares por meio de duas rotinas. A primeira encontra a área mínima necessária às barras tracionadas e o perfil mais econômico entre os catalogados. A segunda rotina verifica os perfis catalogados e retorna o de menor área que resiste ao esforço de compressão. Os resultados foram discutidos para avaliação da influência da escolha do perfil em um melhor desempenho da estrutura e menor consumo de aço.

Palavras chaves: Treliças Planas, Perfis Tubulares Circulares, Análise e Dimensionamento, Programa Computacional.

1 INTRODUÇÃO

No âmbito de engenharia civil, segundo Glijnis (2001), em 1850, foi construída a primeira estrutura no mundo em aço tubular de seção retangular, a ponte Conwy Railway com 140 metros de comprimento. Mas, o grande marco do uso da estrutura tubular é a ponte ferroviária em aço Forth, construída entre anos de 1883 e 1890, sobre o rio Firth of Forth, em Queensferry, Grã-Bretanha. Ela é a primeira grande ponte de aço tubular construída no mundo, com um vão livre de 521 metros e 2500 metros de comprimento.

O uso de seções tubulares tem se expandido significativamente. No princípio, eram vistas com elegância pelos arquitetos e engenheiros projetistas, usadas para dar estética a estruturas aparentes devido ao aspecto de arrojado e modernidade. Entretanto, com o advento das seções tubulares estruturais, passou-se a ter maior uso em obras de maior vulto, pois possibilitam soluções leves e econômicas, face à sua elevada resistência e baixo peso próprio. Daí para frente, cada vez mais as seções tubulares estruturais são requisitadas para aplicação em estruturas.

No Brasil, a estrutura metálica tubular ganhou seu espaço em obras desafiadoras da engenharia. Pode-se citar o Estádio Itaquerão em São Paulo, que possui treliças de cobertura das arquibancadas principais com 77,35 metros de comprimento e 57 metros em balanço, e coberturas laterais com um vão livre de 170m de comprimento, compostas por treliças atirantadas de perfis tubulares quadrados, conforme ilustrado na Fig. 1. (Sepúlveda, 2013).



Figura 1. Primeiro conjunto de treliças da montagem da cobertura do Estádio Itaquerão

Fonte: Sepúlveda (2013).

Algumas pesquisas que abordam estruturas treliçadas planas de aço constituídas de perfis tubulares podem ser citadas como a de Gerken e Ribeiro (2002) que expuseram a questão do uso dos perfis tubulares estruturais na construção civil e seu estado de evolução no âmbito mundial e no Brasil. Além do histórico da utilização desses tipos de perfis, foi analisado o uso em estruturas de grande porte ou de interesse arquitetônico, onde constataram que o uso até o momento era pouco difundido. O objetivo da pesquisa foi contribuir para a disseminação do uso de perfis tubulares estruturais apresentando casos reais e bem-sucedidos.

Pillar (2013) propôs e comparou três soluções estruturais para vigas treliçadas de cobertura de aço de grandes vãos, sendo as soluções em perfis laminados a quente, em perfis formados a frio e em perfis tubulares. Cada solução foi dimensionada segundo a norma adequada: a ABNT NBR 8800:2008 para estruturas em perfis laminados a quente, a ABNT NBR 14762:2010 para estruturas em perfis formados a frio e até então o projeto da norma

ABNT NBR 16239:2013 para estruturas em perfis tubulares. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que a solução em perfis tubulares foi a mais vantajosa, pois apresentou um peso consideravelmente menor em relação às outras soluções, menor custo total apesar de os perfis tubulares serem mais caros que os demais perfis, e proporcionou uma melhor aparência à estrutura.

Barbosa e Cunha (2013) definiram configurações de treliças metálicas já pré-dimensionadas para estruturas de cobertura de galpões industriais, visando agilizar as etapas iniciais do processo orçamentário, utilizando comprimentos de vãos usuais. Dessarte, concluiu-se que nos modelos Howe o consumo de aço chega a ser cerca de 30% maior que os modelos atirantados de duas águas, para vãos de 10, 15 e 20 metros. Mostrando a importância no cálculo e comparação entre os modelos de treliças disponíveis.

A automação de projetos de treliças metálicas planas contribui para a disseminação da tecnologia do uso dessas estruturas de aço. Desta forma, Callejas *et al* (2000) desenvolveram o software *NLMETALdim* que tem como função calcular e dimensionar treliças metálicas planas. O programa computacional faz análise e dimensionamento para regimes lineares ou com efeitos de não linearidade física do material e análise e dimensionamento da estrutura levando em conta os efeitos de não linearidade geométrica e física do material em conjunto. O trabalho teve como base a norma NBR 8800:1986.

Branco *et al* (2004) apresentaram um pacote de programas computacionais denominado *AutoMETÁLICA* que tem como principal intenção familiarizar os calculistas de estruturas metálicas e estudantes de engenharia com os conceitos básicos de projetos de estruturas metálicas planas, apresentando as seguintes etapas: geração automática das geometrias, lançamento automático dos carregamentos, cálculo dos esforços e reações, dimensionamento dos perfis tubulares das barras e cálculo e detalhamento básico das ligações. A ferramenta computacional é de fácil utilização e de interface gráfica agradável.

2 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS TUBULARES CIRCULARES À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO

A norma ABNT NBR 16239:2013 estabelece requisitos básicos que devem ser obedecidos em projetos de estruturas de aço e mistas com perfis tubulares e, em conjunto com a ABNT NBR 8800:2008, prescreve as diretrizes para o dimensionamento de elementos estruturais de seção tubular sujeitos aos esforços de tração e compressão.

2.1 Dimensionamento de perfis tubulares circulares à tração

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, no dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de tração deve ser atendida a seguinte condição:

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

onde:

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

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

Sabe-se que barras submetidas ao esforço de tração não sofrem instabilidades, sendo a propriedade geométrica mais importante no dimensionamento a área de sua seção transversal.

A área líquida efetiva é determinada por:

$$A_e = C_t A_n \quad (2)$$

onde:

C_t = coeficiente de redução da área líquida;

A_n = área líquida da barra.

O coeficiente de redução da área líquida é igual a 1,0 para perfis tubulares circulares quando a força de tração for transmitida por soldas.

Assim, tem-se que a força resistente de tração ($N_{t,Rd}$) é o menor dos valores obtidos para as regiões de ligações, onde pode ocorrer ruptura da seção líquida efetiva (A_e), e para as barras, onde pode ocorrer o escoamento da seção bruta (A_g).

Para escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (3)$$

Para ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (4)$$

Onde:

f_y = resistência ao escoamento do aço;

f_u = resistência à ruptura do aço;

γ_{a1} e γ_{a2} = coeficientes de ponderação das resistências, 1,10 e 1,35 respectivamente.

2.2 Dimensionamento de perfis tubulares circulares à compressão

Assim como para barras prismáticas submetidas à força axial de tração, tem-se para as barras submetidas à força axial de compressão, a condição de segurança a ser atendida, conforme Eq. 5.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (5)$$

onde:

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

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

Para cálculo do esforço de compressão resistente, deve-se levar em consideração a instabilidade da barra como um todo e a flambagem local dos elementos da seção transversal. A força axial de compressão resistente de cálculo é dada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6)$$

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.

De acordo com a norma NBR 8800:2008, o fator de redução total associado à flambagem local da parede de seções tubulares circulares é definido conforme a razão entre o diâmetro da seção e a espessura da parede (D/t), na qual:

Se $D/t \leq 0,11E/f_y$:

$$Q = 1 \quad (7)$$

Se $0,11E/f_y < D/t \leq 0,45E/f_y$:

$$Q = \frac{0,038}{D/t} \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3} \quad (8)$$

onde:

E = módulo de elasticidade do aço.

A norma NBR 16239:2013 prescreve que o fator de redução associado à resistência à compressão das barras comprimidas de perfis tubulares laminados a quente, sem costura, ou tratados termicamente para alívio de tensões, com ou sem costura, é dado por:

$$\chi = \frac{1}{(1 + \lambda_0^{4,48})^{1/2,24}} \quad (9)$$

onde o índice de esbeltez reduzido, λ_0 , depende do fator de redução total para flambagem local, Q , da área bruta da seção, A_g , da resistência ao escoamento do aço, f_y e da força axial de flambagem elástica, N_e . Assim, λ_0 é determinado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (10)$$

A flambagem elástica de uma barra com seção transversal axialmente simétrica, caso dos perfis tubulares circulares, se daria por flexão pura, segundo a carga crítica de Euler:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (11)$$

onde:

I = momento de inércia da seção;

KL = comprimento de flambagem por flexão.

Uma barra de treliça tem vinculação rotulada nas extremidades, logo o comprimento de flambagem por flexão é igual ao comprimento real da barra. A Tabela 1 apresenta os valores do fator de redução associado à resistência à compressão para perfis tubulares de acordo com a Eq. 9.

Tabela 1. Valor de χ em função do índice de esbelteza λ_0 .

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,0
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,1
0,2	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,2
0,3	0,998	0,998	0,997	0,997	0,996	0,996	0,995	0,995	0,994	0,993	0,3
0,4	0,993	0,992	0,991	0,990	0,989	0,988	0,987	0,985	0,984	0,982	0,4
0,5	0,981	0,979	0,977	0,975	0,973	0,971	0,968	0,966	0,963	0,961	0,5
0,6	0,958	0,955	0,952	0,948	0,945	0,941	0,938	0,934	0,930	0,925	0,6
0,7	0,921	0,917	0,912	0,907	0,902	0,897	0,892	0,886	0,881	0,875	0,7
0,8	0,869	0,864	0,858	0,851	0,845	0,839	0,832	0,826	0,819	0,812	0,8
0,9	0,805	0,799	0,792	0,784	0,777	0,770	0,763	0,756	0,748	0,741	0,9
1,0	0,734	0,727	0,719	0,712	0,704	0,697	0,690	0,682	0,675	0,668	1,0
1,1	0,660	0,653	0,646	0,639	0,632	0,625	0,617	0,610	0,604	0,597	1,1
1,2	0,590	0,583	0,576	0,570	0,563	0,556	0,550	0,544	0,537	0,531	1,2
1,3	0,525	0,519	0,513	0,507	0,501	0,495	0,489	0,483	0,478	0,472	1,3
1,4	0,467	0,461	0,456	0,451	0,445	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	1,4
1,5	0,416	0,411	0,406	0,402	0,397	0,393	0,388	0,384	0,379	0,375	1,5
1,6	0,371	0,367	0,363	0,359	0,355	0,351	0,347	0,344	0,340	0,336	1,6
1,7	0,333	0,329	0,326	0,322	0,319	0,315	0,312	0,309	0,306	0,302	1,7
1,8	0,299	0,296	0,293	0,290	0,287	0,284	0,281	0,279	0,276	0,273	1,8
1,9	0,270	0,268	0,265	0,262	0,260	0,257	0,255	0,252	0,250	0,248	1,9
2,0	0,245	0,243	0,241	0,238	0,236	0,234	0,232	0,229	0,227	0,225	2,0
2,1	0,223	0,221	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,208	0,206	2,1
2,2	0,204	0,202	0,200	0,199	0,197	0,195	0,194	0,192	0,190	0,189	2,2
2,3	0,187	0,185	0,184	0,182	0,181	0,179	0,178	0,176	0,175	0,174	2,3
2,4	0,172	0,171	0,169	0,168	0,167	0,165	0,164	0,163	0,161	0,160	2,4
2,5	0,159	0,158	0,156	0,155	0,154	0,153	0,152	0,150	0,149	0,148	2,5
2,6	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,142	0,141	0,140	0,138	0,137	2,6
2,7	0,136	0,135	0,134	0,134	0,133	0,132	0,131	0,130	0,129	0,128	2,7
2,8	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,123	0,122	0,121	0,120	0,119	2,8
2,9	0,118	0,118	0,117	0,116	0,115	0,115	0,114	0,113	0,112	0,111	2,9
3,0	0,111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

3 SOBRE O PROGRAMA COMPUTACIONAL

O programa computacional desenvolvido, denominado TREILLIS 2D, calcula os esforços e deslocamentos de treliças planas por meio de análise elástica de primeira ordem e, adicionalmente, dimensiona as barras com perfis tubulares circulares com vistas à sua aplicação em vigas de cobertura treliçadas de galpões. A ferramenta dimensiona as barras da treliça agrupando-as em três grupos: banzo superior, banzo inferior, diagonal e/ou montante. Para cada um desses grupos, manteve-se a mesma seção transversal visando um melhor aproveitamento e facilidade na construção.

A implementação computacional foi realizada no MATLAB (2010) utilizando como dados de entrada o arquivo de dados gerado pelo programa FTOOL (2012), onde a geometria e o carregamento devem ser inseridos.

3.1 Rotina de análise estrutural de treliças planas

A rotina de análise de treliças planas segue o método dos deslocamentos assumindo para o carregamento apenas forças aplicadas nos nós. O fluxograma da análise estrutural de treliças planas, Fig. 2, mostra de forma resumida essa rotina com a simbologia utilizada para os vetores e matrizes.

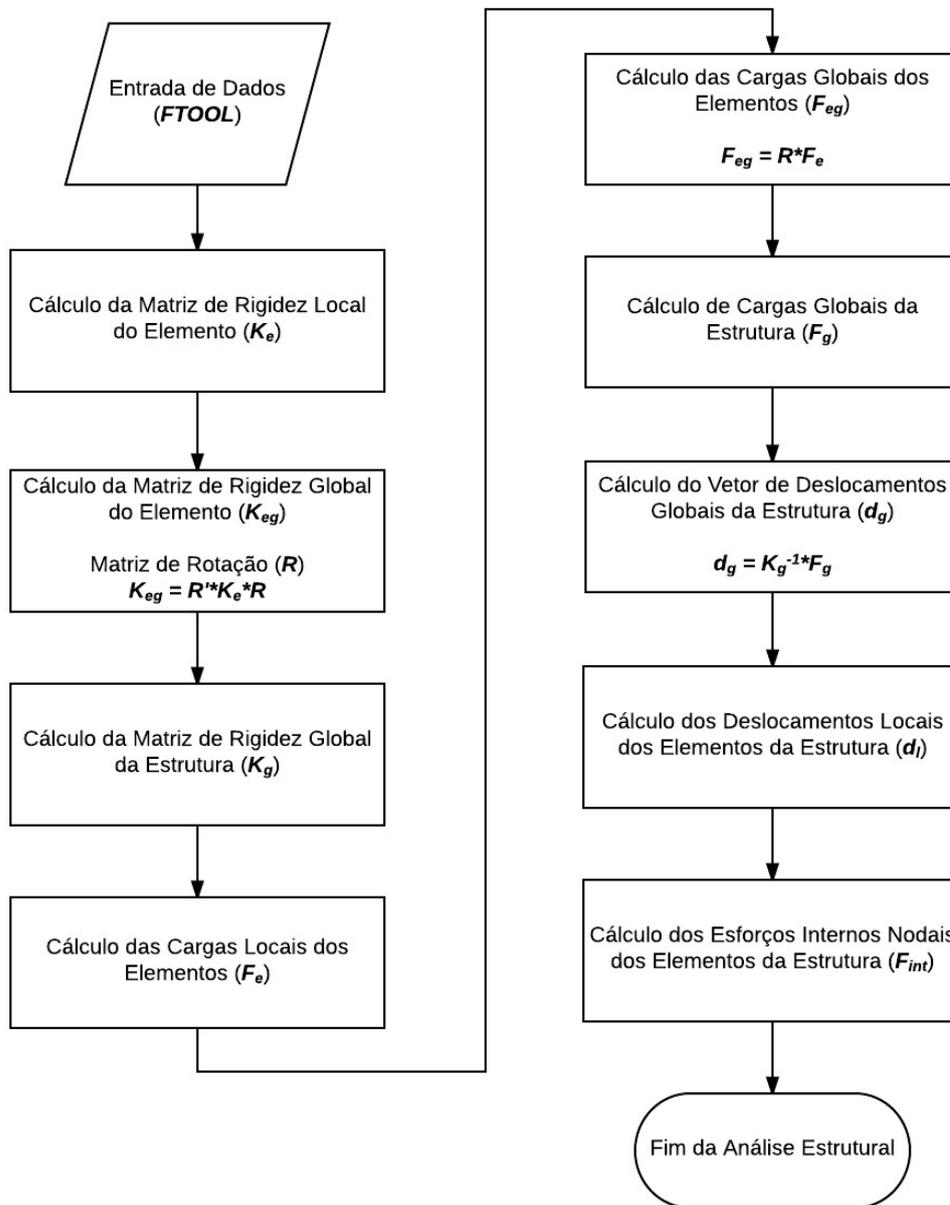


Figura 2. Fluxograma de Análise Estrutural de Treliças Planas.

3.2 Rotina de Dimensionamento

A rotina de dimensionamento elaborada teve como princípio o cálculo da área mínima para que a Eq. (1) e a Eq. (5) sejam cumpridas. Para isso, foram implementadas uma rotina para tração, exemplificada no fluxograma de dimensionamento de barras submetidas à tração, Fig. 3, e outra para compressão, demonstrado no fluxograma de dimensionamento de barras submetidas à compressão, Fig. 4.

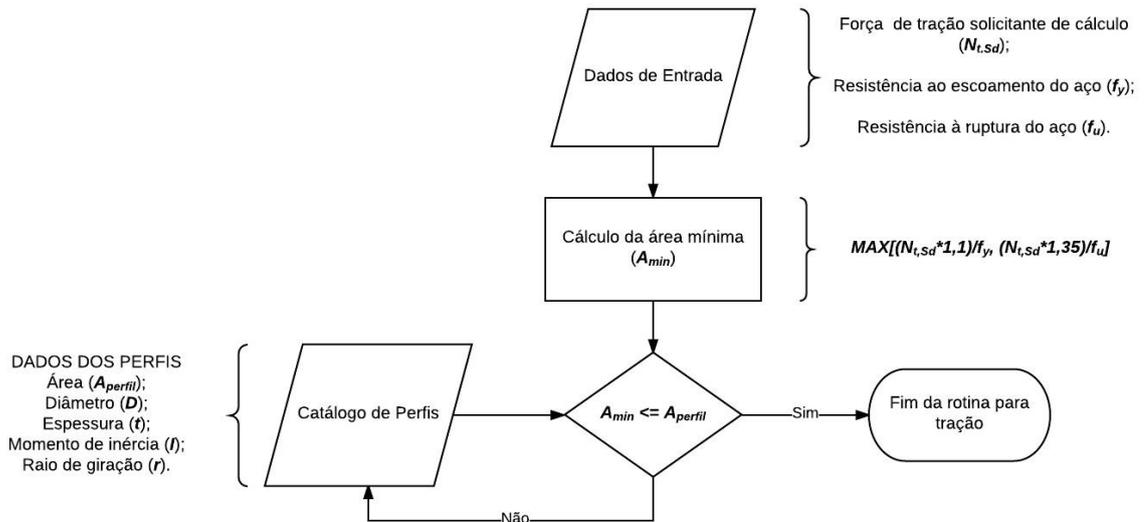


Figura 3. Fluxograma de dimensionamento de barras submetidas à tração.

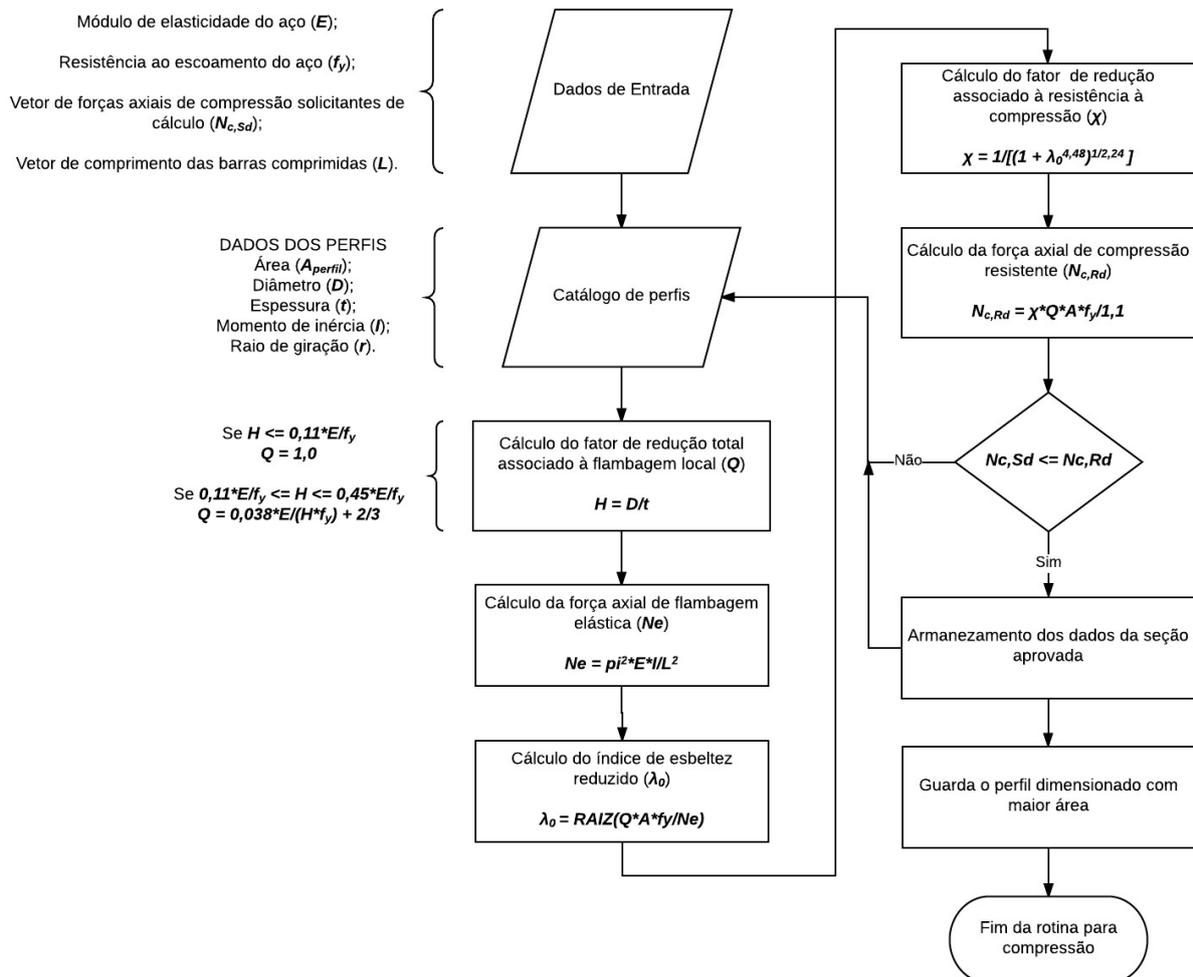


Figura 4. Fluxograma de dimensionamento de barras submetidas à compressão.

3.3 Interface gráfica do programa computacional

Ao inicializar o programa, abre-se a janela principal, na qual é possível visualizar o menu de opções com as guias: Arquivo, Cálculo, Dimensionamento, Programas, Ajuda. Além da barra de ferramentas e os botões de plotagem (Grid, N° nós, N° barras, Cargas, Deformada, Esforços, Reações de Apoio), conforme ilustrado na Fig. 5.

Para dar início a utilização da ferramenta, deve-se selecionar a aba ‘Arquivo’ e clicar em ‘Entrada de Dados’. Após a seleção do arquivo em formato ‘.pos’ gerado pelo FTOOL (2012), será plotado a estrutura no sistema de eixos. Assim, torna-se possível a utilização dos botões Grid, que gera uma malha retangular na direção dos eixos; Cargas, que mostra as cargas aplicadas aos nós; N° nós e N° barras, que indicam respectivamente o número dos nós da estrutura e o número de barras. Na Fig. 6, pode-se verificar um exemplo importado com o botão ‘N° barras’ selecionado.

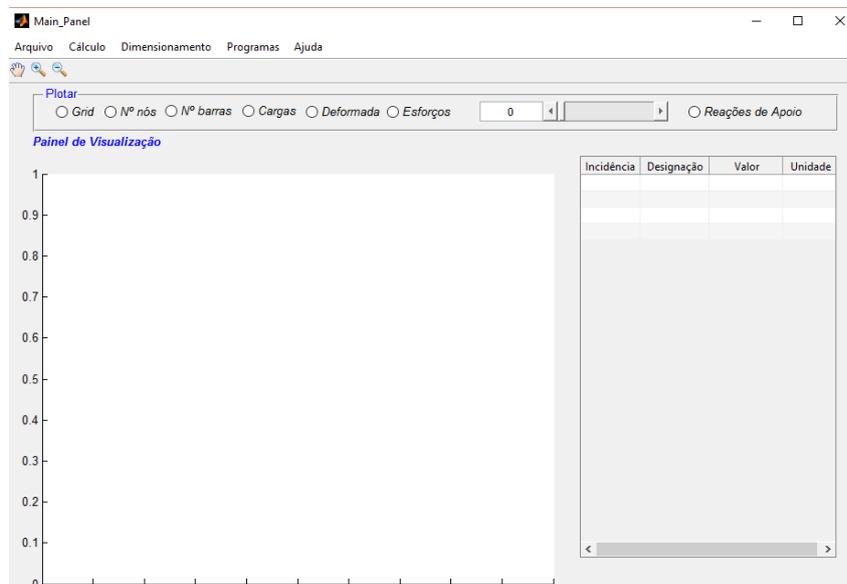


Figura 5. Página inicial do programa desenvolvido.

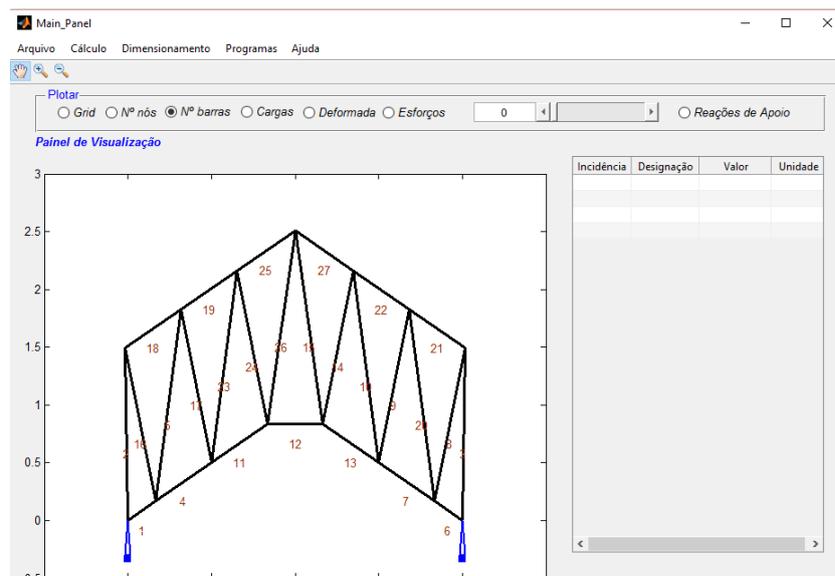


Figura 6. Estrutura importada com número das barras.

A análise estrutural é realizada ao clicar na guia “Cálculo”, onde serão calculadas as reações de apoios, deformada e esforços solicitantes. Todos esses resultados podem ser conferidos selecionando os botões da barra de plotagem. Para uma melhor visualização da deformada, existe a barra de rolamento, na qual, ao clicar na seta à esquerda, tem-se uma amplificação da visualização da deformação, Fig. 7.

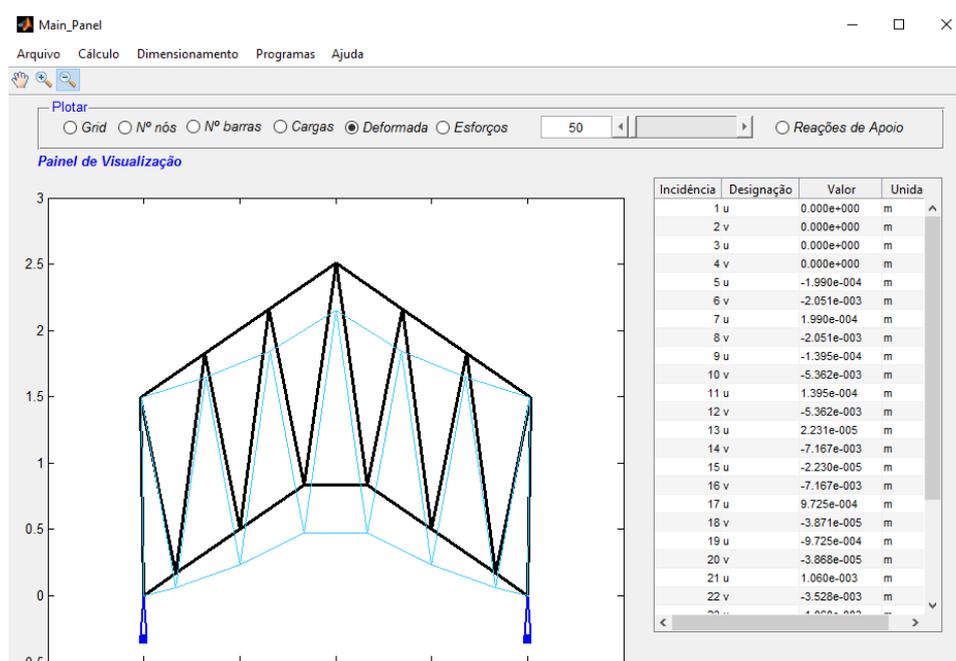


Figura 7. Estrutura e sua deformada.

Já os esforços internos são apresentados na parte inferior da tela, como visualizado na Fig. 8, onde o esforço apresentado refere-se à barra grifada.

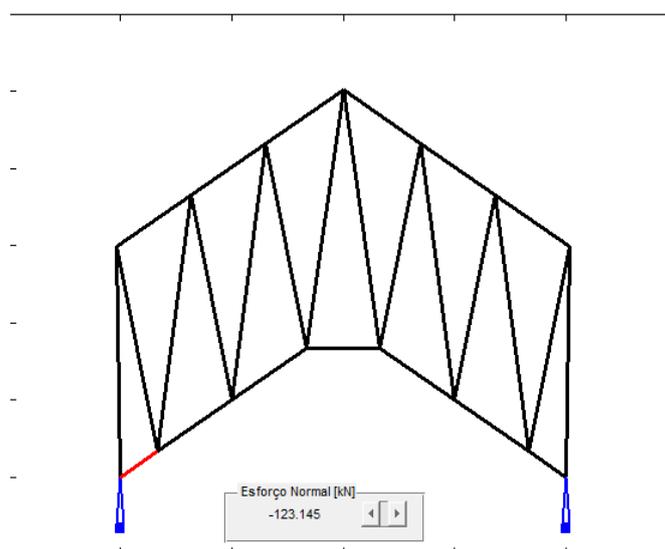


Figura 8. Esforços Normais em cada barra.

O dimensionamento é possível após a rotina de análise estrutural ser executada. É necessário informar como dados de entrada as resistências ao escoamento e à ruptura do aço e os agrupamentos das barras em banzo superior, inferior e diagonais e/ou montantes, como pode ser visto nas caixas de diálogo mostradas nas Fig. 9 e Fig. 10.

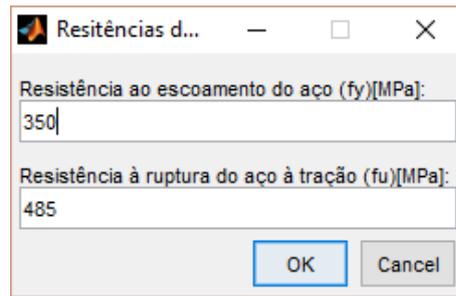


Figura 9. Caixa de diálogo para inserção das resistências do aço.

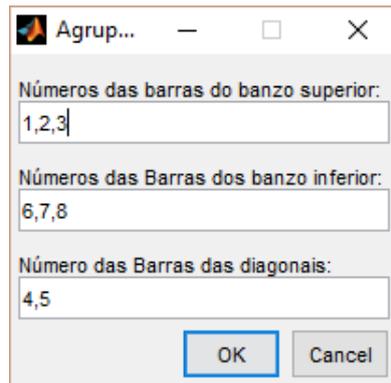


Figura 10. Caixa de diálogo para indicação dos agrupamentos.

O programa computacional exibe o resultado em uma segunda janela, na qual se escolhe o agrupamento para a verificação do perfil com maior índice de aproveitamento. Nesta janela também podem ser vistos os esforços solicitante e resistente, o índice de aproveitamento do perfil, a esbeltez do elemento, a esbeltez limite, o índice de aproveitamento para esbeltez e a massa total da estrutura, em kg, conforme Fig. 11.

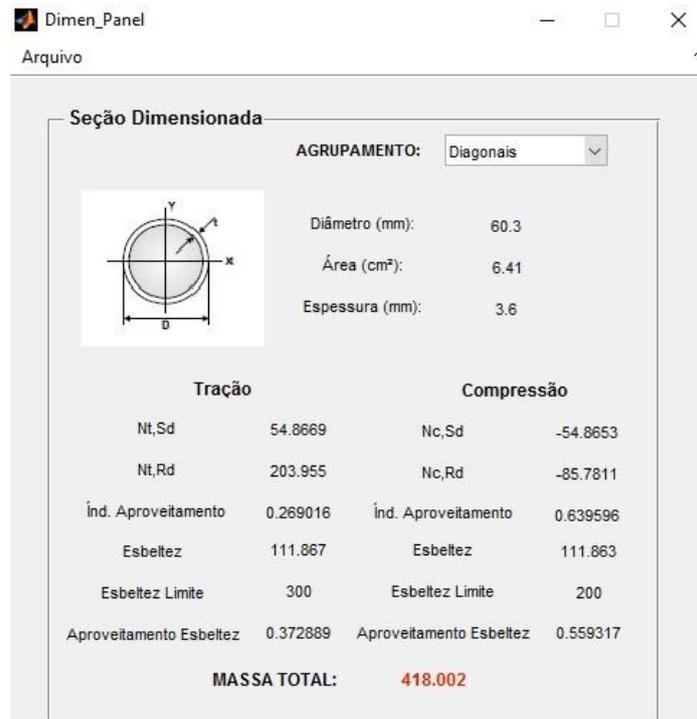


Figura 11. Interface com resultados.

4 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

A validação da rotina de análise foi realizada confrontando os resultados do programa TREILLIS 2D com os obtidos pelo programa FTOOL (2012) em duas baterias de testes. A primeira bateria com 3 treliças do tipo Warren, Fig. 12(a), de ângulos entre o banzo e as diagonais iguais a 42° e vãos iguais a 20 m, 30 m e 40 m, denominadas de Treliças 1, 2 e 3, respectivamente. Na segunda bateria de testes, foram rodadas mais três treliças, porém do tipo Pratt, Fig. 12(b), com ângulos entre o banzo e as diagonais iguais a 45° e vãos iguais a 20 m, 30 m e 40 m, denominadas respectivamente de Treliças 4, 5 e 6.

Para definição do carregamento permanente e variável de cada treliça, tomou-se como base o manual de galpões da Gerdau (2005). O manual considera as ações permanentes constituídas dos pesos próprios das terças e tirantes ($0,05 \text{ kN/m}^2$), dos contraventamentos ($0,05 \text{ kN/m}^2$) e das telhas ($0,1 \text{ kN/m}^2$), resultando em um carregamento permanente total de $0,2 \text{ kN/m}^2$. Como ações variáveis, considerou-se a sobrecarga na cobertura e a pressão do vento. Um valor igual a $0,25 \text{ kN/m}^2$, valor mínimo recomendado pela ABNT NBR 8800:2008, foi adotado para a sobrecarga na cobertura.

A pressão do vento foi determinada considerando a velocidade básica igual a 35 m/s . Foi suposto que as treliças seriam utilizadas em vigas de cobertura internas de um galpão com comprimento total de 45 metros e a distância entre pórticos e pé direito iguais a 9 metros. Considerou-se também uma construção totalmente fechada, sem aberturas dominantes e com as quatro faces igualmente permeáveis. A pressão do vento foi de sucção na cobertura e o seu valor estimado é de $0,715 \text{ kN/m}^2$ à barlavento e de $0,258 \text{ kN/m}^2$ a sotavento.

Para cada treliça foram testadas duas combinações distintas de carregamentos, a combinação de cargas nº 1: $1,3 \times \text{Ações Permanentes} + 1,5 \times \text{Sobrecargas}$ e a combinação nº 2: $1,0 \times \text{Ações Permanentes} + 1,4 \times \text{Vento}$.

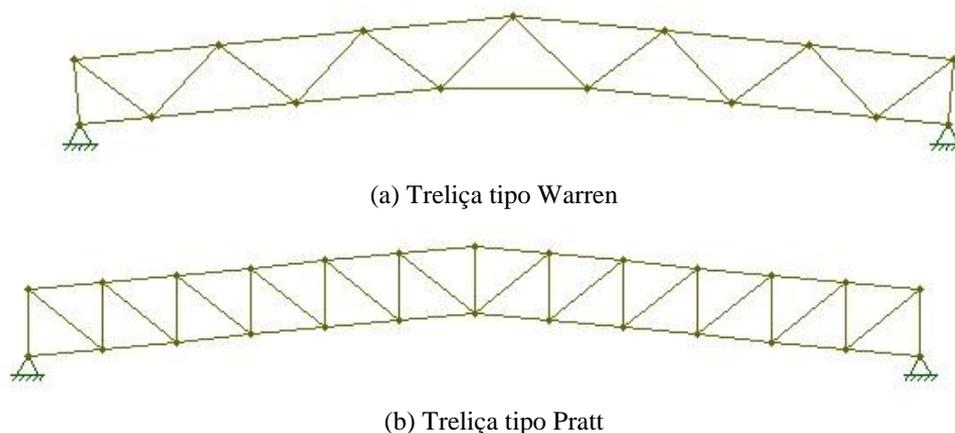


Figura 12. Tipos de treliça

Com o objetivo de validar a rotina de dimensionamento de treliças planas com perfis tubulares circulares, realizou-se cálculos manuais de acordo com a norma ABNT NBR 16239:2013 a partir das seções previstas pelo programa TREILLIS 2D, comparando seus esforços resistentes com os calculados pela norma. As mesmas baterias de testes foram utilizadas para validação da rotina de dimensionamento, com as duas combinações citadas anteriormente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada grupo de barras, banzo superior, banzo inferior e diagonais e/ou montantes, os esforços normais solicitantes de maior módulo das seis treliças indicadas no item 4 foram selecionados tanto pelo programa TREILLIS 2D, quanto pelo programa FTOOL (2012), para confrontar os resultados de ambos e analisar a precisão da rotina de análise de treliças planas. As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados para as combinações de carga 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2. Resultados dos esforços axiais solicitantes máximos da primeira combinação.

ESFORÇOS MÁXIMOS NORMAIS [KN]						
COMBINAÇÃO 1 (1,3 x Ações Permanentes + 1,5 x Sobrecargas)						
AGRUPAMENTO	TRELIÇA 1 (20X42°)		TRELIÇA 2 (30X42°)		TRELIÇA 3 (40X42°)	
	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D
Banzo Superior	-113,165	-113,165	-169,633	-169,633	-226,525	-226,525
Banzo Inferior	-123,145	-123,147	-184,594	-184,595	-245,939	-245,939
Diagonais e/ou Montantes	54,865	54,867	82,352	82,352	109,783	109,783
AGRUPAMENTO	TRELIÇA 4 (20X45°)		TRELIÇA 5 (30X45°)		TRELIÇA 6 (40X45°)	
	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D
Banzo Superior	-118,887	-118,887	-178,691	-178,691	-238,483	-238,483
Banzo Inferior	-120,643	-120,643	-181,331	-181,331	-242,007	-242,007
Diagonais e Montantes	57,451	57,451	86,350	86,350	115,243	115,243

Tabela 3. Resultados dos esforços axiais solicitantes máximos da segunda combinação.

ESFORÇOS MÁXIMOS NORMAIS [KN]						
COMBINAÇÃO 2 (1,0 x Ações Permanentes + 1,4 x Vento)						
AGRUPAMENTO	TRELIÇA 1 (20X42°)		TRELIÇA 2 (30X42°)		TRELIÇA 3 (40X42°)	
	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D
Banzo Superior	99,514	99,514	149,179	149,179	199,128	199,128
Banzo Inferior	94,225	94,225	141,244	141,244	188,297	188,297
Diagonais e/ou Montantes	55,661	55,661	-83,512	-83,512	111,350	111,350
AGRUPAMENTO	TRELIÇA 3 (20X45°)		TRELIÇA 4 (30X45°)		TRELIÇA 6 (40X45°)	
	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D	FTOOL	TREILLIS 2D
Banzo Superior	111,502	111,502	167,592	167,592	223,678	223,678
Banzo Inferior	93,892	93,892	141,123	141,123	188,351	188,351
Diagonais e Montantes	-59,640	-59,640	-89,640	-89,640	-119,639	-119,639

Pela análise das tabelas 2 e 3, pode-se verificar que o programa computacional desenvolvido, TREILLIS 2D, trata-se de uma ferramenta precisa em relação ao programa FTOOL (2012), no que tange a análise estrutural de treliças planas, visto que a maior diferença percentual entre os valores encontrados é de 0,001%.

A respeito do dimensionamento das treliças planas tubulares circulares, pôde-se confirmar a qualidade da rotina implementada por meio dos esforços axiais resistentes encontrados no dimensionamento de cada agrupamento. As seis treliças citadas na validação

do programa foram dimensionadas no TREILLIS 2D e calculadas de acordo com a norma ABNT NBR 16239:2013. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 4 e 5, para as combinações de cargas 1 e 2, respectivamente.

Ao se analisar os dados das Tabelas 4 e 5, é possível constatar que os valores calculados pelo programa TREILLIS 2D são praticamente idênticos aos determinados pela norma, com um desvio relativo máximo de $3,2 \times 10^{-4}\%$, corroborando com a eficácia do programa desenvolvido.

Tabela 4. Resultados das esforços axiais resistentes da primeira combinação.

DIMENSIONAMENTO									
COMBINAÇÃO 1 (1,3 x Ações Permanentes + 1,5 x Sobrecargas)									
TRELIÇA 1 (20X42°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	88,9	9,65	3,6	-	-	-98,1248	-130,8560	-	-130,8557
Banzo Inferior	60,3	7,07	4,0	-	-	-41,4018	-44,5535	-	-44,5535
Diagonais	60,3	6,41	3,6	54,8669	203,9550	-54,8653	-85,7811	203,9545	-85,7811
TRELIÇA 2 (30X42°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	114,3	19,10	5,6	-	-	-169,6330	-178,8440	-	-178,8439
Banzo Inferior	88,9	10,70	4,0	-	-	-62,0442	-67,6118	-	-67,6118
Diagonais	88,9	9,65	3,6	82,3515	307,0450	-82,1972	-129,2930	307,0455	-129,2932
TRELIÇA 3 (40X42°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	168,3	25,70	5,0	-	-	-226,5250	-298,4090	-	-298,4088
Banzo Inferior	114,3	15,50	4,5	-	-	-85,0372	-92,5519	-	-92,5519
Diagonais	101,6	12,30	4,0	109,7830	391,3640	-109,7830	-124,9720	391,3636	-124,9721
TRELIÇA 4 (20X45°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	60,3	6,41	3,6	-	-	-103,1450	-133,2830	-	-133,2828
Banzo Inferior	60,3	6,41	3,6	-	-	-120,6430	-133,2830	-	-133,2828
Diagonais	38,1	4,29	4,0	57,4511	136,5000	-45,2596	-47,6619	136,5000	-47,6619
TRELIÇA 5 (30X45°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	88,9	9,65	3,6	-	-	-155,0310	-200,8900	-	-200,8901
Banzo Inferior	88,9	9,65	3,6	-	-	-181,3310	-200,8900	-	-200,8901
Diagonais	60,3	6,41	3,6	86,3500	203,9550	-68,0264	-84,9520	203,9545	-84,9520
TRELIÇA 6 (40X45°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	114,3	13,90	4,0	-	-	-233,3300	-277,8160	-	-277,8158
Banzo Inferior	114,3	13,90	4,0	-	-	-242,0060	-277,8130	-	-277,8127
Diagonais	73	8,67	4,0	115,2430	275,8640	-90,7900	-97,6719	275,8636	-97,6719

Tabela 5. Resultados das forças axiais resistentes da segunda combinação.

DIMENSIONAMENTO									
COMBINAÇÃO 2 (1,0 x Ações Permanentes + 1,4 x Vento)									
TRELIÇA 1 (20X42°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	33,4	3,37	3,6	99,5136	107,2270	-	-	107,2273	-
Banzo Inferior	48,3	5,06	3,6	94,2248	161,0000	-20,0329	-20,2206	161,0000	-20,2206
Diagonais	60,3	6,41	3,6	55,6609	203,9550	-55,6609	-85,7807	203,9545	-85,7807
TRELIÇA 2 (30X42°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	42,2	4,80	4,0	149,1790	152,7270	-	-	152,7273	-
Banzo Inferior	73	7,85	3,6	141,2440	249,7730	-30,0366	-33,5186	249,7727	-33,5186
Diagonais	88,9	9,65	3,6	83,41180	307,0450	-83,5120	-129,3050	307,0455	-129,3054
TRELIÇA 3 (40X42°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	60,3	6,41	3,6	199,1280	203,9550	-	-	203,9545	-
Banzo Inferior	88,9	11,90	4,5	188,2970	378,6360	-40,2841	-42,6302	378,6364	-42,6302
Diagonais	101,6	12,30	4,0	111,3500	391,3640	-111,3500	-124,9730	391,3636	-124,9726
TRELIÇA 4 (20X45°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	38,1	3,51	3,2	111,5020	111,6820	-	-	111,6818	-
Banzo Inferior	33,4	3,04	3,2	93,8917	96,7273	-	-	96,7273	-
Diagonais	60,3	6,41	3,6	48,0932	203,9550	-59,6395	-93,2958	203,9545	-93,2958
TRELIÇA 5 (30X45°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	42,2	5,33	4,5	167,5920	169,5910	-	-	169,5909	-
Banzo Inferior	48,3	5,06	3,6	141,1230	161,0000	-27,2737	-35,5506	161,0000	-35,5506
Diagonais	88,9	9,65	3,6	72,2853	307,0450	-89,6401	-140,6770	307,0455	-140,6773
TRELIÇA 6 (40X45°)									
TREILLIS 2D								ABNT NBR 16239:2013	
AGRUPAMENTO	Diâmetro	Área	Espessura	Nt,Sd	Nt,Rd	Nc,Sd	Nc,Rd	Nt,Rd	Nc,Rd
Banzo Superior	60,3	7,07	4,0	223,6780	224,9550	-	-	224,9545	-
Banzo Inferior	60,3	6,41	3,6	188,3510	203,9550	-36,4021	-40,9038	203,9545	-40,9038
Diagonais	101,6	12,3	4,0	96,4765	391,3640	-119,6390	-136,9030	391,3636	-136,9026

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido um programa computacional para análise e dimensionamento de treliças planas com perfis tubulares no MATLAB (2010), com vistas a sua utilização no cálculo de vigas de cobertura treliçadas de galpões. O método dos deslocamentos foi utilizado na elaboração da rotina de análise estrutural elástica linear e as rotinas de dimensionamento foram desenvolvidas de acordo com a ABNT NBR 16239:2013 para o dimensionamento do perfil de aço tubular circular que atenda as solicitações de forma econômica.

O programa computacional desenvolvido, denominado TREILLIS 2D, foi devidamente validado e se mostrou uma ferramenta confiável para análise e dimensionamento das estruturas a que se propõe. Deve-se salientar a crescente utilização de perfis tubulares na

execução de estruturas de galpões em aço e a necessidade de ferramentas que utilizem as normas brasileiras vigentes de cálculo e projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2013. NBR 16239: *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2008. NBR 8800: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, C. O. B.; Cunha, R. E. V. da, 2013. *Dimensionamento de treliças metálicas usuais padronizadas, com auxílio de uma ferramenta computacional e cálculos manuais*. Projeto de Graduação, Universidade da Amazônia, Belém/PA.
- Branco, R. et al, 2004. Automação do projeto de estruturas metálicas planas utilizando perfis tubulares. In: *XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural*, Mendoza.
- Callejas, I. J. A., Requena, J. A. V., 2000. Análise e Dimensionamento de Treliças Metálicas Planas Considerando os Efeitos de Não Linearidade Geométrica e Física. In: *XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Punta Del Este, Uruguai.
- Furtini, F. M., 2005. *Estudo de cobertura para grandes vãos utilizando perfis tubulares*. 204 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG.
- Gerdau Açominas, 2005. Coletânea do uso do aço: *Galpões em pórticos com perfis estruturais laminados*. 3º Ed. Vol. 3.
- Gerken, F. S. ; Ribeiro, L. F. L., 2002. Estruturas de perfis tubulares: Visão sistêmica do processo de projeto. In: *II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM*. São Paulo/SP.
- Glijnis, P. C., 2001. Developments in Pipe Profiling Technology. In : *Tubular Structures IX*. Düsseldorf, Germany.
- Martha, L. F., 2012. FTOOL: *Two-Dimensional Frame Analysis Tool*. Versão Educacional 3.00 – Versão Lisboa. PUC-Rio.
- MathWorks, EUA, 2010. *MATLAB: The Language of Technical Computing*. MATLAB R2010b.
- Pillar, R. V., 2013. *Estudo de viabilidade de cobertura metálica com alternativas em perfis formados a fio, laminados abertos ou tubulares*. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola Politécnica, Rio de Janeiro/RJ.

Sepúlveda, B. D. G., 2013. *Influência das ligações no dimensionamento das estruturas tubulares circulares de aço treliçadas*. 209 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

Soriano, H. L., 2005. *Análise de Estruturas: Formulação Matricial e Implementação Computacional*. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna. p. 306.

Souza, M. G. Q., 2006. *Automação e Integração CAD/CAE no Projeto de Estruturas Metálicas, Utilizando Perfis Tubulares*. 120 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

Vallourec, 2012. *Tubos Estruturais: Seção Circular, Quadrada e Retangular*.