

Tema: Coberturas e fechamentos: materiais, tecnologia e projeto

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES EM COBERTURA METÁLICA

Felipe Fontenelle Marques¹

Arlindo Pires Lopes²

Francisco dos Santos Rocha²

Aarão Ferreira Lima Neto³

Resumo

As coberturas metálicas vêm sendo largamente utilizadas no Brasil, diversos são os segmentos onde se faz necessário o uso delas, porém já existem investigações que comprovam que a maioria das patologias que ocorrem nas coberturas é devido ao mau dimensionamento ou a má execução das ligações presentes nelas: pois são as responsáveis por transmitir as cargas que atuam nas peças. Ou seja, com essas questões em vista, é primordial fazer uma análise para que se obtenha o correto desempenho da estrutura, tanto sob o aspecto de estabilidade, quanto pelo aspecto da fidelidade ao comportamento previsto pelo projeto. Embora já existam informações importantes sobre as ligações no contexto mundial, no Brasil, ainda existem poucos modelos de cálculo relacionados às ligações nas coberturas, e que, ainda por cima, geralmente são superficiais ou são omitidos dos livros. Neste sentido, o presente artigo tem como objetivo analisar e dimensionar as ligações soldadas com o intuito de avaliar a sua resistência seguindo os critérios das normas brasileiras. Para o referido estudo utilizou-se como modelo uma cobertura de um galpão, fazendo-se a avaliação de seu comportamento estrutural por meio de modelagem numérica utilizando um programa de elementos finitos.

Palavras-chave: Ligações; Soldas; Análise estrutural.

ANALYSIS AND DESIGN OF WELDED CONNECTIONS ON METAL ROOFING

Abstract

The metal roofing has been widely used in Brazil, many are the segments where their use is necessary, but there are already research showing that most of the diseases that occur in coverage is due to poor design or poor implementation of these links them: they are responsible for transmitting the loads acting on the parts. That is, with these questions in mind, it is essential to analyze in order to obtain the correct performance of the structure, both from the aspect of stability, as the appearance of fidelity to the behavior expected by the project. Although this is important information about the links in the global context, in Brazil, there are still few calculation models related to the links on the roofs, and, moreover, are usually superficial or are omitted from the books. In this sense, this article aims to analyze and measure the welded connections in order to evaluate their resistance according to the criteria of Brazilian standards. For this study was used as a cover model of a shed, is making the evaluation of the structural behavior through numerical modeling using a finite element program.

Keywords: Connections; Welding; Structural analysis.

¹ Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus-AM, Brasil.

² Engenheiro Civil, Professor, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus-AM, Brasil.

³ Engenheiro Civil, Professor, Universidade Federal do Pará, Tucuruí-PA, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A competitividade na construção civil tem feito com que os profissionais busquem soluções econômicas eficientes, duráveis e de rápida execução. Atendendo a esses requisitos, a construção em aço é uma das soluções, principalmente para construções de médios e grandes vãos.

Existem no mercado, diversos perfis que podem ser adotados na construção em aço, porém, além do dimensionamento para a escolha do tipo de perfil, é essencial fazer a verificação da resistência das ligações. São elas que reduzem as deformações presentes nas estruturas a limites admissíveis e fazem a transmissão das cargas que atuam nas peças.

Hayward e Weare (2011) [1] afirmam que devido ao desconhecimento de conceitos básicos sobre detalhamento, ocorre representação inadequada ou ausente nas ligações prejudicando o processo de produção.

As ligações são classificadas de acordo com a NBR 8800:2008 [2], quanto aos elementos de ligação, como: cantoneiras, chapas de ligação, consolos e enrijecedores; e quanto aos meios de ligação, como: parafusos, pinos, barras rosqueadas e soldas.

Os rebites estão sendo empregados praticamente em recuperação e reforço de antigas estruturas rebitadas e os pinos são usados em casos especiais. De acordo com Pfeil, W. e Pfeil, M. (2008) [3], os pinos eram mais utilizados nos nós das treliças de antigamente com o intuito de colocar rótulas em seus nós. O objetivo era facilitar o cálculo e evitar a ocorrência de momentos nos nós. No entanto, isso representava um elevado custo para determinadas situações e não era vantajoso, pois desenvolvia atrito que acabava prejudicando o funcionamento da rótula.

As ligações mais utilizadas são as soldadas e as parafusadas. Existem grandes vantagens das ligações soldadas se comparadas às ligações parafusadas, como por exemplo, a ocorrência do aproveitamento total do material, fazendo com que esta, na maioria das vezes, seja mais econômica, além de possuir um bom acabamento e permitir fácil limpeza.

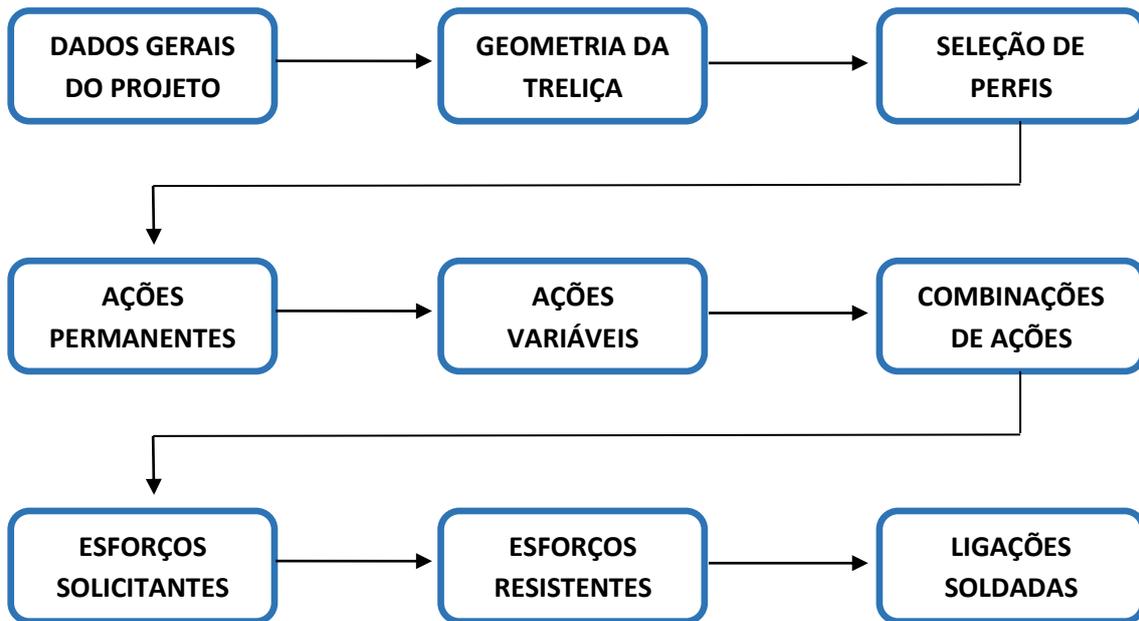
No Brasil as construções em aço que estão sendo largamente utilizadas, são as coberturas metálicas, especialmente em galpões, estádios, armazéns e shopping centers. Uma das causas de patologias em coberturas metálicas é a verificação incorreta na estabilidade, ocasionando flambagem local ou global.

O propósito deste artigo é fazer o dimensionamento de um modelo de cobertura em duas águas com tesoura de estrutura de aço na cidade de Manaus, de acordo com as normas vigentes. O modelo será ligado através de soldas, fazendo o equilíbrio das forças geradas em seus comprimentos, para que não ocorra excentricidade, gerando efeitos de flexão.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o referido artigo, foram utilizadas tanto normas técnicas como referências, com o intuito de analisar posteriormente os resultados encontrados. O fluxograma a seguir descreve resumidamente as etapas:



2.1 Dados e Dimensões Gerais do Galpão

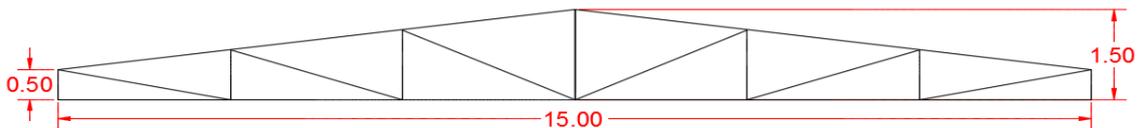
- Local da construção: cidade de Manaus, áreas industriais plenas;
- Ocupação: Indústria com alto fator de ocupação;
- Largura da construção: 15 m;
- Comprimento da construção: 30 m;
- Pé-direito: 6 m;
- Telhas de aço trapezoidais, revestidas com zinco e com espessura de 0,65 mm;
- A construção será considerada igualmente permeável;
- Velocidade Básica do Vento em Manaus: 32 m/s (aproximadamente);
- Edificação em terreno fracamente acidentado;
- Os fechamentos das faces transversais são de telhas de aço;
- Será utilizado para soldagem: Eletrodo E60XX AWS;
- Espaçamento entre as tesouras é de 5m;

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

2.2 Geometria da Treliça

A modelo de cobertura usado foi uma cobertura em duas águas com tesoura em estrutura de aço conforme a Figura 1.

Figura 1: Geometria da treliça



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

2.3 Cálculos do Vento

Os esforços impostos pelo vento na estrutura de aço da cobertura, muitas vezes são mais desfavoráveis do que o próprio peso da estrutura, por isso não devem ser desconsiderados.

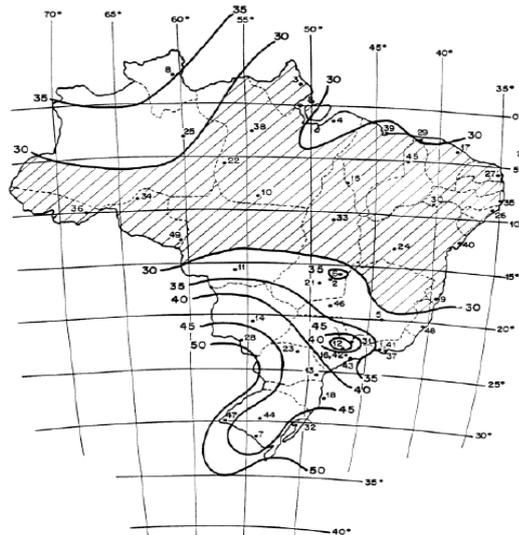
A ação do vento foi calculada seguindo os critérios da NBR 6123:1988 “Forças devidas ao vento em edificações” [4], foi realizado tanto de maneira manual, como pelo software VISUALVENTOS, com o vento a 0° e 90°, considerando a situação mais desfavorável.

A estimativa da velocidade característica do vento (V_k) apresenta o seguinte procedimento de cálculo:

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (m/s) \quad (1)$$

Conforme observado na equação acima, a velocidade característica depende de fatores como a velocidade básica do vento V_0 , que se encontra no mapa das isopletas (Figura 2).

Figura 2: Mapa das isopletas da velocidade básica do vento no Brasil



Fonte: ABNT NBR 6123:1988

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

O fator topográfico S_1 depende do relevo do terreno em que será construída a edificação; nesse caso o valor adotado foi 1,0, uma vez que o terreno em questão é fracamente acidentado.

A rugosidade S_2 , o coeficiente que foi encontrado através de parâmetros meteorológicos que dependem da categoria, da classe e da dimensão da edificação, foi calculada pela seguinte expressão:

$$S_2 = b F_r (z/10)^p \quad (2)$$

Nessa equação z é a altura do nível do terreno até o ponto mais alto da edificação, e os demais parâmetros se encontram na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros meteorológicos

Categoria	Z_g (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

Como o galpão está localizado em áreas industriais plenas, ele se encontra na categoria IV, e, em relação à classe, a NBR 6123:1988 [4] estabelece que se a maior dimensão da edificação estiver entre 20 e 50 metros, ela é classificada como classe B, logo a valor de $S_2 = 0,804$.

E por último o fator estatístico S_3 que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

Tabela 2: Valores mínimos do fator estatístico

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estrutura dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

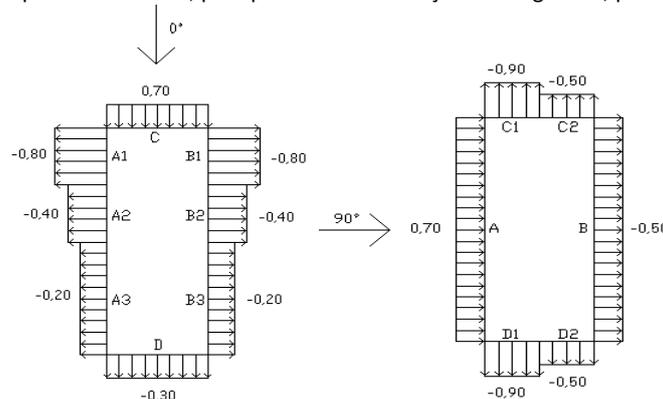
Como o galpão analisado se trata de um galpão com alto fator de ocupação, o valor de S_3 é 1,0. Após encontrar o valor da velocidade característica cujo valor V_k é 25,728 m/s, utilizou-se a equação 3 para encontrar a pressão dinâmica $q = 0,41\text{KN/m}^2$, cabe salientar a importância dessa pressão, pois ela que será utilizada como padrão para a determinação da pressão estática total.

$$q = 0,613V_k^2 (N/m^2) \quad (3)$$

2.3.1 Coeficientes de Pressão

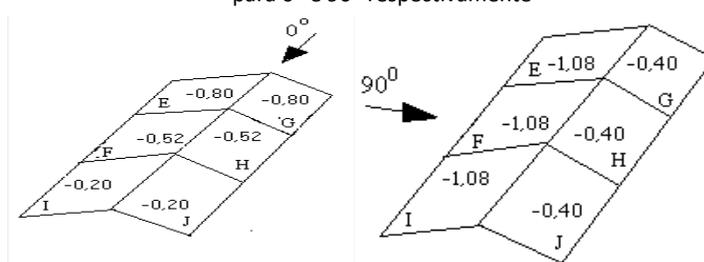
Existem dois tipos de coeficientes de pressão que foram analisados: os coeficientes de pressão externa no qual é levado em consideração a pressão que ocorre na parte de fora da edificação, dependendo da altura da parede da edificação, largura e de seu comprimento conforme a Figura 3 e os coeficientes de pressão interna que ocorrem na parte de dentro da edificação (Figura 4).

Figura 3: Coeficientes de pressão externos, para paredes de edificações retangulares, para 0° e 90° respectivamente



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 4: Coeficientes de pressão externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações retangulares para 0° e 90° respectivamente



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Como a construção foi considerada com as quatro faces igualmente permeáveis, na NBR 6123:1988 [4] o coeficiente interno pode ser 0 ou -0,3 considerando o mais desfavorável para a situação, para o modelo de cobertura o coeficiente interno é 0.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Logo as cargas do vento foram obtidas pela seguinte expressão:

$$F = (C_e - C_i) q A \text{ (Newton)} \quad (4)$$

2.4 Cargas Permanentes

As cargas permanentes são as cargas associadas ao peso da estrutura. O pré-dimensionamento é feito com uma estimativa desse peso, existem algumas maneiras de se fazer isso: uma delas é adotar uma seção de perfil, outra é a aplicação da fórmula de Pratt para encontrar o peso da estrutura principal; no início é necessário fazer isso, pois o tipo de perfil que realmente será adotado depende da força solicitante de cálculo; a estimativa foi realizada pela escolha desses perfis. Para os banzos foram adotados 2L 76 X 76 X 7,9, para banzos e montantes 2L 64 x 64x 7,9, para terças U 152x50, as telhas são pesos encontrados em manuais do fabricante e variam com seu tipo, e os demais foram inicialmente estimados. As cargas atuantes que foram adotadas sobre o modelo de treliça são:

- Telhas + Acessórios : 65 N/m²
- Contraventamentos: 20 N/m²;
- Terças: 60,1 N/m²;
- Estrutura + Ligações: 70 N/m²;

2.5 Combinações

As ações que ocorrem em uma estrutura podem atuar de maneira simultânea, em certo período de tempo ou por toda a vida útil da edificação. É necessário em seu dimensionamento fazer a combinação dessas ações, que são definidas pela NBR8800:2008 [2]; elas devem ser realizadas de modo que seja previsto a pior situação para a estrutura, verificando os estados limites últimos e de serviço, em função das combinações últimas e de serviço respectivamente.

2.5.1 Combinações últimas

As combinações últimas de ações de um serviço podem ser classificadas como normais, especiais, de construção e excepcionais.

- Combinações últimas normais

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{oj} F_{Qj,k}) \quad (5)$$

- Combinações últimas especiais ou de construção

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{oj,ef} F_{Qj,k}) \quad (6)$$

- Combinações últimas excepcionais

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{qj} \psi_{oj,ef} F_{Qj}) \quad (7)$$

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

2.5.2 Combinações de serviço

As combinações também são classificadas de acordo com a NBR8800:2008[2] em combinações quase permanentes de serviço, frequentes e raras.

- Combinações quase permanentes de serviço

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (8)$$

- Combinações frequentes de serviço

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (9)$$

- Combinações raras de serviço

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} F_{Qj,k}) \quad (10)$$

Os esforços no estado limite de projeto são obtidos através das piores situações das combinações dos carregamentos, no qual foram utilizadas para esse dimensionamento as seguintes combinações:

- Combinação 1

$$F_d = (1,25F_{Gi,k}) + (1,5F_{Q1,k}) \quad (11)$$

- Combinação 2

$$F_d = (1,0F_{Gi,k}) + (1,4F_{Q1,k}) \quad (12)$$

2.6 Dimensionamento

2.6.1 Dimensionamento a Tração

De acordo com a NBR 8800:2008 [2], são usadas duas hipóteses para o dimensionamento da força axial de tração resistente de cálculo, sendo utilizado o menor valor obtido delas, as expressões são:

- Para estados-limites de escoamento de seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (13)$$

- Para estados-limites de ruptura

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (14)$$

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 à tração;
- γ_{a1} - coeficiente de ponderação no escoamento;
- γ_{a2} - coeficiente de ponderação na ruptura.

A NBR 8800:2008 [2] estabelece que o índice de esbeltez das barras tracionadas, tomando como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração, excetuando os tirantes de barras redondas pré-tensionadas ou outras barras que tenham sido montadas com pré-tensão, não supere 300.

$$\lambda = (L / i_{\min}) \quad (15)$$

2.6.2 Dimensionamento à Compressão

A resistência de cálculo de elementos axialmente comprimidos, sujeitos à flambagem por flexão e flambagem local devem atender a seguinte condição:

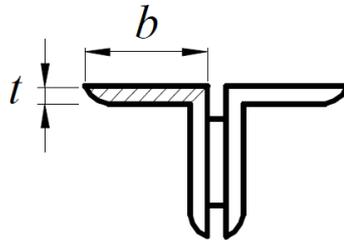
$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (16)$$

Onde $N_{c,Sd}$ é a força axial de compressão solicitante de cálculo.

Existem dois tipos de flambagem que devem ser verificadas, a local e a global. De acordo com Pfeil, W. e Pfeil, M. (2008) [3], estudos realizados demonstram que em algumas colunas curtas não ocorre flambagem global por flexão, porém, elas apresentam deslocamentos laterais em forma de ondulações (flambagem local), ou seja, um elemento não enrijecido à compressão pode escoar; ela precisa ser calculada também para encontrar o fator de redução Q que pode reduzir a resistência da barra que está sendo analisada, para que isso seja evitado, os elementos verificados devem apresentar valores abaixo do limite de esbeltez, estes valores dependem também da peça. Para o perfil de dupla cantoneira provido de chapa de travamento, conforme é mostrado na Figura 5, usou-se a seguinte expressão:

$$(b/t)_{\lim} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (17)$$

Figura 5: Perfil de dupla cantoneira provido de chapa de travamento



Fonte: ABNT NBR 8800:2008

Conforme a NBR 8800:2008[2] a força axial de flambagem elástica, N_e , de uma barra com seção transversal duplamente simétrica ou simétrica em relação a um ponto é calculada de acordo com a expressão abaixo:

$$N_e = \frac{\pi^2 E I}{(KL)^2} \quad (18)$$

Em seguida deve-se calcular o índice de esbelteza reduzido, λ , para encontrar um parâmetro adimensional, χ , que serve para relacionar a tensão última, f_c , e a tensão de escoamento do material, f_y .

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (19)$$

O parâmetro adimensional que é o fator de redução, χ , pode ser retirado da seguinte tabela:

Tabela 3: Valor do χ em função do índice de esbelteza

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	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

Fonte: ABNT NBR 8800:2008

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

São usadas duas hipóteses para o dimensionamento da força de compressão resistente de cálculo, sendo utilizado o menor valor obtido delas, as expressões são:

- Para estado-limite último de escoamento, utilizado quando $KL/r \leq 25$:

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (20)$$

- Para estado-limite último de flambagem, usado quando $KL/r > 25$:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (21)$$

Onde, $N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo.

2.7 Ligações

Um dos critérios que a NBR8800:2008 [2] define é que as ligações sujeitas a uma força solicitante de cálculo, em qualquer direção inferior a 45 KN, devem ser dimensionadas para uma força solicitante de cálculo igual a 45 KN, com direção e sentido da força, exceto: diagonais e montantes de travejamento de barras compostas, barras redondas para tirantes, terça e longarinas.

Uma recomendação que fica a critério do responsável técnico pelo projeto é que as ligações de barras tracionadas ou comprimidas sejam dimensionadas no mínimo para 50% da força axial resistente de cálculo da barra, referente ao tipo de solicitação que comanda o dimensionamento da respectiva barra.

No modelo de cobertura, foi escolhida dupla cantoneira, a NBR8800:2008 [2] especifica que para esses tipos de cantoneira não é exigido que o centro geométrico das soldas de filete fique sobre o eixo baricêntrico da barra nas suas extremidades, para os casos não sujeitos a fadiga, a excentricidade entre os eixos de barra e das ligações pode ser desprezada em barras solicitadas estaticamente, mas deve ser levada em conta em barras sujeita a fadiga.

2.7.1 Especificações de Dimensionamento para Solda

Para o aço A36 são utilizados eletrodos E60XX e E70XX do tipo comum ou baixo hidrogênio. Existem muitos fatores AISC 360-10 [5] que serviram e servem como referência para NBR 8800:2008 [2], e uma delas é a tabela 4 relacionada à força resistente de cálculo de soldas F_w , R_d ; essa resistência é baseada em dois estados limites últimos, na ruptura da solda na seção efetiva e no escoamento do metal base na face de fusão.

Na tabela encontra-se o A_w que é a área efetiva da solda, A_{MB} é a área do metal-base, F_y é a menor resistência ao escoamento entre os metais base da junta e F_w que é a resistência mínima à tração do metal da solda.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

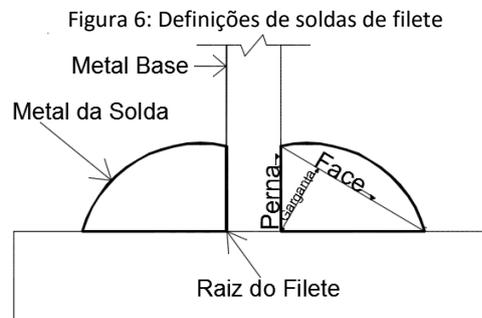
Tabela 4: Força resistente de cálculo de soldas

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}$ ^{a b d}
Penetração total ^{g)}	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB} f_y / \gamma_{s1}$ ^{e f1}
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,60 A_{MB} f_y / \gamma_{s1}$ ⁱ
Penetração parcial ^{g)}	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base: $A_{MB} f_y / \gamma_{s1}$ ⁱ b) Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w1}$ ^{j)}
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}$ ^k
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}$ ^{h k}
Tampão em furos ou rasgos	Cisalhamento paralelo às superfícies em contato, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w / \gamma_{w2}$ ^k

Fonte: ABNT NBR 8800:2008

Segundo Chamberlain (2013) [5], os tipos de soldas existentes são de filete, ranhura, tampão, entalhe de penetração parcial ou total, porém as mais utilizadas são as soldas de filete e entalhe de penetração parcial ou total.

No modelo da cobertura metálica, foi utilizado solda de filete de lados iguais, nesse tipo de solda o material é depositado nas faces laterais dos elementos ligados, nelas são levados em consideração a raiz da solda, a perna do filete, garganta e face conforme figura abaixo.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Denomina-se perna o menor lado do filete, b ; a garganta do filete é a espessura desfavorável, t ; e a raiz da solda que é a região de contato entre o material de adição (metal da solda), material base e a linha comum as duas faces de fusão.

Em função da parte menos espessa soldada é dado o tamanho mínimo da perna de uma solda de filete.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 5: Tamanho mínimo da perna de uma solda de filete

Menor espessura do metal-base na junta mm	Tamanho mínimo da perna da solda de filete, d_w^a mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19	8
^a Executadas somente com um passe.	

Fonte: ABNT NBR 8800:2008

De acordo com a NBR 8800:2008 o tamanho máximo de perna de uma solda de filete que pode ser usado ao longo de bordas soldadas é o seguinte:

- Ao longo de bordas de material com espessura inferior a 6,35mm, não mais do que a espessura do material.
- Ao longo de bordas de material com espessura igual ou superior a 6,35mm, não mais do que a espessura do material subtraída de 1,5mm, a não ser que nos desenhos seja indicada como reforçada durante a execução, de modo a obter a espessura total desejada da garganta.

O comprimento efetivo de uma solda de filete dimensionada para uma solicitação de cálculo qualquer não pode ser inferior a 4 vezes seu tamanho da perna e a 40mm; do contrário esse tamanho não pode ser considerado maior que 25% do comprimento efetivo da solda.

Á área efetiva de um filete de solda de lados iguais é dada pela seguinte expressão:

$$A_w = tl = 0,7b \quad (22)$$

Onde l é o comprimento do filete.

Os esforços solicitantes em qualquer direção no plano perpendicular ao eixo longitudinal da solda são considerados, para efeito de cálculo, como esforços cisalhantes, logo a resistência de cálculo do metal da solda, R_d , pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$R_d = A_w(0,6f_w)/\gamma_{w2} \quad (23)$$

Onde:

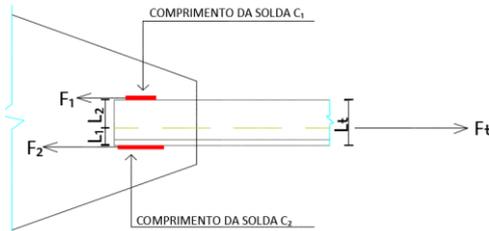
A_w - é a área da solda;

f_w - é a tensão resistente do metal da solda.

Um dos objetivos que também deve ser realizado no dimensionamento das ligações é fazer com que os esforços desenvolvidos nas soldas passem pelo centro de gravidade para que não haja efeitos de flexão, então deve ser realizado o equilíbrio de momentos.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Figura 7: Dupla cantoneira soldada na chapa de Gusset



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

O equilíbrio de momentos para a dupla cantoneira que foi utilizada é dado pelas seguintes expressões:

$$F_1 \times L_1 - (F_t / 2) \times L_1 = 0 \quad (24)$$

$$F_2 = F_t - F_1 \quad (25)$$

A força solicitante de cálculo foi dividida por 2 devido ao fato de se tratar de cantoneira e cada uma delas receberem a metade dessa força.

Para encontrar o comprimento de solda, C_1 , de cada perfil foi utilizada a equação do metal base, onde a mesma foi igualada a F_1 ; e para encontrar o comprimento C_2 da solda, foi estabelecida uma relação entre as forças e seus comprimentos, conforme a equação a seguir:

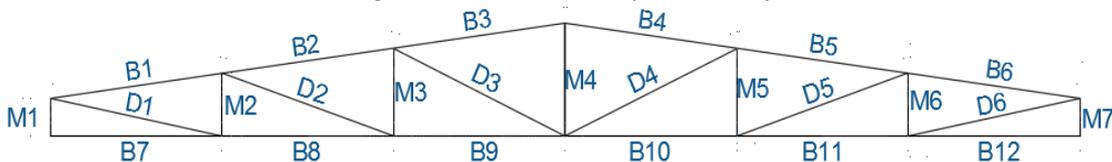
$$L_2 = (F_2 / F_1) \times L_1 \quad (26)$$

Foi verificado o escoamento para tração ou compressão da chapa de *gusset* onde o mesmo deve ser maior que o esforço solicitante de cálculo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizado, para análise e dimensionamento da treliça metálica, o programa comercial de elementos finitos SAP2000. A estrutura, por sua vez, foi dividida em grupos para padronizar seu cálculo.

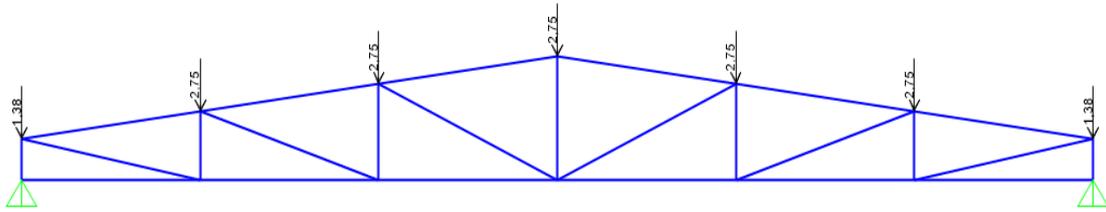
Figura 8: Nomenclatura dos perfis da treliça



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

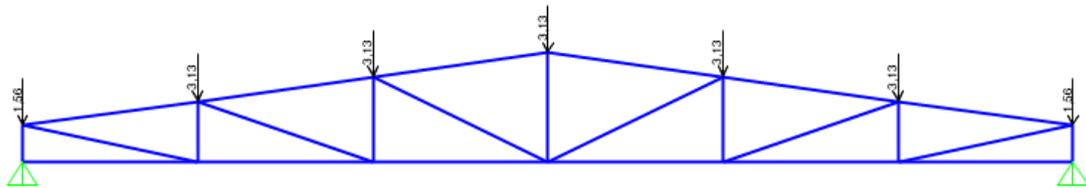
Figura 9: Cargas pontuais provenientes das cargas permanentes

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



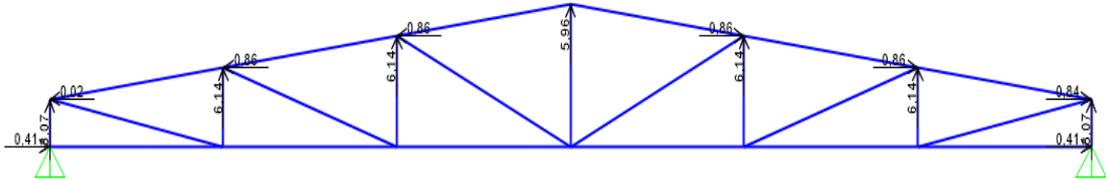
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 10: Cargas pontuais provenientes da sobrecarga



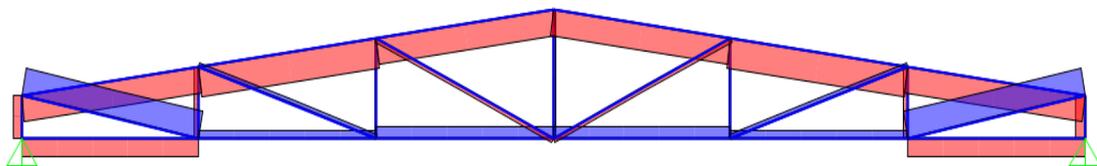
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 11: Decomposição dos esforços pontuais provenientes da ação do vento



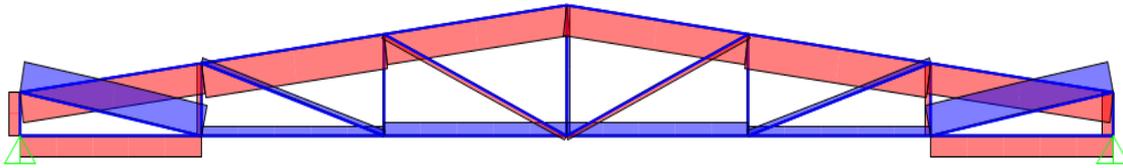
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 12: Esforços causados pelo peso próprio da estrutura



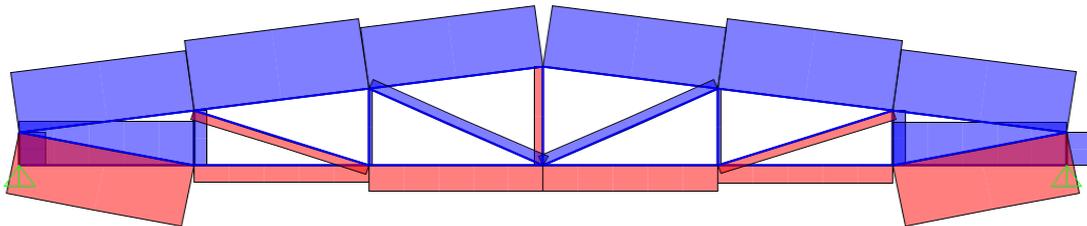
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 13: Esforços causados pela sobrecarga na estrutura



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 14: Esforços causados pela ação do vento na estrutura



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Tabela 6: Perfis de aço utilizados para cada grupo de elementos

Grupo	Perfil (mm)	Kg/m	Aço	L total (m)
Banzos superiores	2L 76 x 76 x 7,9	9,1	ASTM A36	15,14
Banzos inferiores	2L 76 x 76 x 7,9	9,1	ASTM A36	15
Diagonais	2L 64 x 64 x 7,9	7,4	ASTM A36	5,5
Montantes	2L 64 x 64 x 7,9	7,4	ASTM A36	15,9
Terças	U 152 x 50 x 7,5	12,2	ASTM A36	240

Fonte: Elaborado pelos próprios autores



Tabela 7: Tabela com esforços na estrutura e suas combinações

Elemento	Comprimento (m)	Peso próprio	Sobrecarga	Vento	Combinação 1	Combinação 2	Comprimento da menor solda (C1) em mm	Comprimento da maior solda (C2) em mm
M1	0,5	-8,25	-9,38	36,877	-24,38	43,38	40,00	96,17
M2	0,83	-4,13	-4,69	18,51	-12,19	21,78	40,00	96,17
M3	1,17	-0,98	-1,12	4,327	-2,90	5,08	40,00	96,17
M4	1,5	2,75	3,13	-12,724	8,13	-15,06	40,00	96,17
M5	1,17	-0,98	-1,12	4,22	-2,90	4,93	40,00	96,17
M6	0,83	-4,13	-4,69	18,362	-12,19	21,58	40,00	96,17
M7	0,5	-8,25	-9,38	36,794	-24,38	43,26	40,00	96,17
D1	2,55	21,03	23,90	-94,384	62,14	-111,11	40,00	96,17
D2	2,64	3,11	3,53	-13,682	9,18	-16,04	40,00	96,17
D3	2,76	-3,25	-3,70	14,946	-9,61	17,67	40,00	96,17
D4	2,76	-3,25	-3,70	15,142	-9,61	17,95	40,00	96,17
D5	2,64	3,11	3,53	-13,346	9,18	-15,57	40,00	96,17
D6	2,55	21,03	23,90	-93,626	62,14	-110,05	40,00	96,17
B1	2,52	-20,81	-23,65	92,972	-61,48	109,35	40,00	97,56
B2	2,52	-23,78	-27,02	106,937	-70,26	125,93	40,42	98,58
B3	2,52	-20,81	-23,65	94,144	-61,48	110,99	40,00	97,56
B4	2,52	-20,81	-23,65	94,144	-61,48	110,99	40,00	97,56
B5	2,52	-23,78	-27,02	107,116	-70,26	126,18	40,50	98,77
B6	2,52	-20,81	-23,65	93,472	-61,48	110,05	40,00	97,56
B7	2,5	-14,73	-16,74	66,346	-43,52	78,15	40,00	97,56
B8	2,5	5,89	6,70	-26,205	17,41	-30,80	40,00	97,56
B9	2,5	8,84	10,05	-39,185	26,12	-46,02	40,00	97,56
B10	2,5	8,84	10,05	-39,362	26,12	-46,27	40,00	97,56
B11	2,5	5,89	6,70	-26,701	17,41	-31,49	40,00	97,56
B12	2,5	-14,73	-16,74	65,108	-43,52	76,42	40,00	97,56
Obs.:	<p>O sinal (+) significa que as barras estão sendo tracionadas; O sinal (-) significa que as barras estão sendo comprimidas; Foi adotada uma força solicitante de cálculo de 45 KN para a resistência mínima das ligações, nos valores das forças solicitantes menores que este valor, de acordo com a NBR 8800:2008; Os comprimentos das soldas foram calculados e verificados com o comprimento mínimo e máximo, conforme citado no artigo.</p>							

Fonte: Elaborado pelos autores

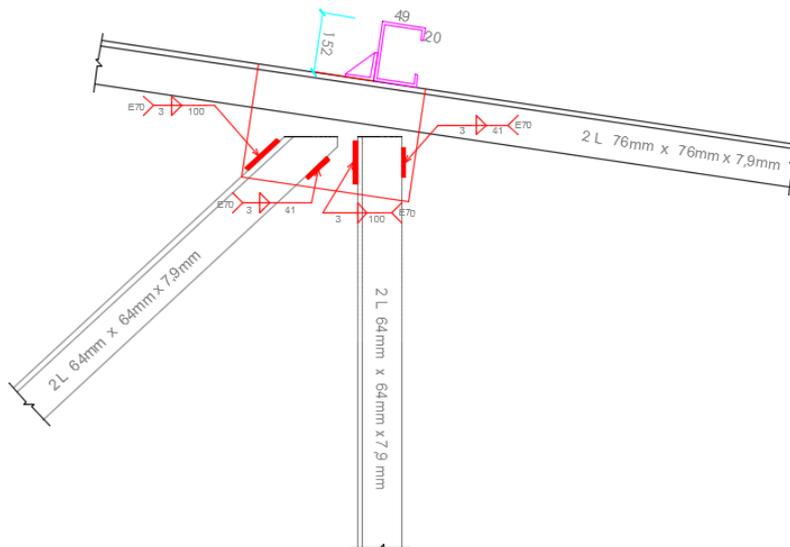
* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 8: Tabela com as principais informações calculadas nos perfis

Banzos superiores em compressão								
ix (cm)	iy (cm)	Ix (cm ⁴)	Gusset(mm)	Iy (cm ⁴)	b/t	(b/t)lim	KI/ix	KI/iy
2,33	3,44	62,4	6,35	271,47	9,645	12,73	108,15	146,51
Ne (KN)	λ_o	X	Nc,Rd	Espaçamento entre as chapas de ligação (cm)				
210,95	1,65	0,332	173,24	100				
Banzos superiores em tração								
Ct	Aef	Nd, res	Obs: Em todos os banzos foram adotadas a mesma seção transversal de perfil					
0,779	17,88	529,78						
Diagonal 1 em compressão (mais solicitada)								
ix (cm)	iy (cm)	Ix (cm ⁴)	Gusset(mm)	Iy (cm ⁴)	b/t	(b/t)lim	KI/ix	KI/iy
1,93	2,93	35,4	6,35	162,36	8,04	12,73	130,57	87,03
Ne (KN)	λ_o	X	Nc,Rd	Espaçamento entre as chapas de ligação (cm)				
214,923	1,48	0,4	172,36	70				
Diagonal 1 em tração (mais solicitada)								
Ct	Aef	Nd, res	Obs: Em todos os montantes e diagonais foram adotadas a mesma seção transversal de perfil					
0,812	15,39	456,16						

Para realização das ligações na prática, foi adotada como comprimento de solda a pior situação aproximando estes valores para 41 mm e 100 mm, conforme figura abaixo:

Figura 15: Ligações dos perfis da cantoneira



Fonte: Elaborado pelos autores

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

4 CONCLUSÃO

É importante destacar a ação do vento como um dos aspectos preponderantes no cálculo dos comprimentos das soldas. Foram os piores esforços no modelo de cobertura adotado, sendo necessário ter uma resistência maior nas ligações.

As ações externas atuantes nas estruturas metálicas foram transformadas em esforços internos, onde estes caminharam segundo os eixos de gravidade.

Os posicionamentos relativos dos elementos de ligação se encontraram em um único ponto, fato que deve ser observado não só em projetos como também na execução desses detalhes, para não haver ou tornar quase desprezível os momentos das ligações nos encontros dos perfis.

Ao completar este artigo, verificou-se que as resistências de ligações soldadas, garantiram a continuidade dos elementos conectados com resistência e rigidez compatíveis com os objetivos adotados no projeto.

No entanto, deve-se sempre fazer projetos bem detalhados referentes às ligações, para que sejam feitos de maneira correta durante o processo construtivo, pois um detalhe com erros ou com algumas informações omitidas podem levar a estrutura ao colapso.

REFERÊNCIAS

- 1 HAYWARD, Alan; WEARE, Frank. **Steel Detailers' Manual**. 3 ed. Editado por Anthony C; Oakhill. Malden. Blackwell Publishing, 2011.
- 2 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.
- 3 PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- 5 CHAMBERLAIN, Zacarias; FICANHA, Ricardo; FABEANE, Ricardo. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Ltda, 2013.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.