

SOLUÇÃO DE VIGA VAGONADA, COMPARADA COM O MODELO DE TRELIÇA PLANA, NO USO DE PASSARELAS COM GRANDES VÃOS.

Eduardo Bicudo de Castro Azambuja

João da Costa Pantoja

ebcazambuja@azmb.com.br

joaocpantoja@gmail.com

PPG-FAU-UnB – Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, DF/Brasília, Brazil.

Abstract. Steel structures, due to the characteristics of the material, presents an efficient relation of the resistance with its own weight, which makes it more suitable in works with needs to overcome bigger spans. The *Pavilhão com Estufa para Parque Botânico*, winner of the 11th Architecture Students Competition of the *Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA)*, stood out for its good urban insertion and the choice of the place of implantation, which adapted well to the topography of the land and valued the local biome, as well as presenting good use and adequate detailing of the steel structure. According to the judging committee, the group provided good programmatic integration and an aesthetic quality that stood out from the others. With the aim of promoting lightness and a better interaction with the environment, a pedestrian walkway was proposed as a solution to access the set of buildings, designed in a metallic structure with a span of 45m and a width of 10m, formed by longitudinal wagon beams, structural model composed of a horizontal full-width element, columns and cables. The trussed beams is another structural model used in large spans, formed by bars that join in nodes, forming triangles. This ensures that when loads act on the nodes, only axial tensile and compressive stresses will be developed, presenting a slimmer bar sizing and a lighter set to overcome large gaps. In this article, we will analyze the structural model of the design of the *Pavilhão com Estufa para Parque Botânico*, proposed with the use of steel wagon beams and compare with a solution in Pratt trussed beams supported by the same actions and the weight aspect of the structure as a function of the maximum vertical displacement defined in Annex C of ABNT NBR 8800: 2008 [2].

Keywords: Steel structures, Structural model, Trussed beams, Wagon beams, Pedestrian Walkway.

1. Introdução

Os elementos de aço estrutural podem ser utilizados em modelos simples compostos por vigas e pilares, mas são também, corriqueiramente, usados na composição de treliças e como barras de pórticos, projetados para suportar esforços de tração e compressão. O aço é um material que apresenta boa resistência para essas duas tensões, contudo, quando submetido a forças de compressão, peças com maior esbelteza tornam-se mais suscetíveis a problemas de instabilidade lateral.

A estrutura de aço, pelas características do material, resistência e módulo de elasticidade, apresenta uma relação eficiente da resistência com o seu peso próprio, o que a torna mais adequada em obras com necessidades de vencer vãos maiores, como é o caso de coberturas destinadas a auditórios, ginásios de esportes, estádios, centros de compras, galpões industriais, hangares, pontes e passarelas.

O 11º Concurso para Estudantes de Arquitetura do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) teve seu resultado divulgado no dia 22/8/2018. Nesta edição, o tema proposto foi um Pavilhão com Estufa para Parque Botânico.

O projeto vencedor, nº 1314, desenvolvido pela equipe da Universidade Presbiteriana Mackenzie de São Paulo/SP, sob a orientação do professor Renato Carrieri, destacou-se por sua boa inserção urbana e pela escolha do local de implantação, valorizando o bioma local, boa resolução do programa, bom uso e detalhamento adequado da estrutura de aço. Segundo a comissão julgadora, o conjunto proporcionou boa integração programática e uma qualidade estética que se destacou dos demais.

A intenção do projeto foi adequar a edificação com a topografia existente do terreno, localizado no Morro São João Batista, na cidade de Cananéia no litoral sul de São Paulo, sem descaracterizar a região de implantação do prédio, conforme maquete mostrada na Figura 1. Para que fosse possível atingir o equilíbrio com poucos apoios, grandes vãos e uma arquitetura respeitosa ao meio ambiente, optou-se pelo uso de aço estrutural no sistema construtivo.



Figura 1. Projeto vencedor do 11º Concurso para Estudantes de Arquitetura do Centro Brasileiro da Construção em Aço - Pavilhão com Estufa para Parque Botânico [4].

Conforme apresentado no memorial descritivo, o primeiro obstáculo projetual encontrado foi o de lidar com os desníveis elevados do terreno. Como solução de acesso ao conjunto de edificações, foi projetada uma passarela de pedestres com vão de 45m e largura de 10m. Com o objetivo de promover a leveza do conjunto e a melhor interação com o ambiente de implantação, foi proposto para a passarela uma estrutura formada por vigas vagonadas longitudinais, apoiadas em pórticos localizados em cada extremidade, e lajes de piso suportadas por vigas secundárias apoiadas nas longarinas.

A Figura 2 apresenta em corte a solução do projeto vencedor com os níveis propostos para as construções e uma vista lateral da viga vagonada da estrutura da passarela de pedestres.

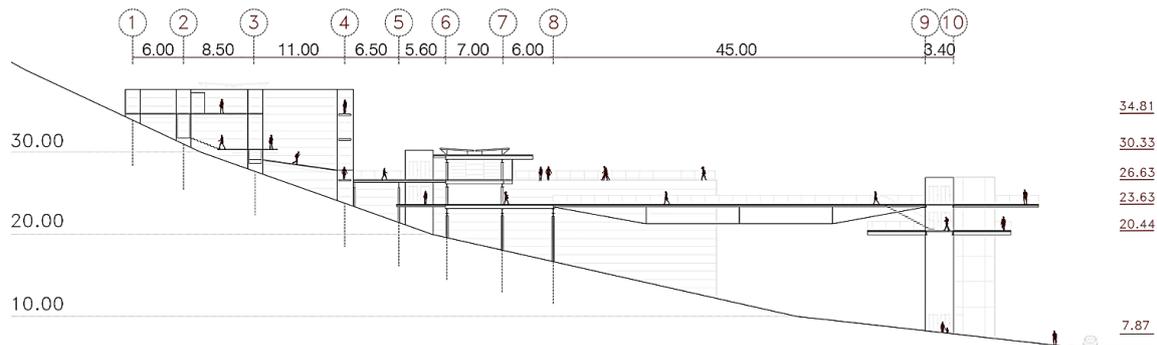


Figura 2. Corte AA do projeto vencedor [4].

Neste artigo iremos analisar a estrutura da passarela do projeto do Pavilhão com Estufa para Parque Botânico, vencedor do 11º Concurso para Estudantes de Arquitetura do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), proposto com o uso de vigas vagonadas metálicas, de acordo com o modelo apresentado na Figura 3, e comparar com uma solução em treliças planas de banzos paralelos também de aço, bi apoiadas, considerando o aspecto de peso da estrutura em função do deslocamento vertical máximo definido no Anexo C da ABNT NBR 8800:2008 [2].

A análise dos modelos estruturais utilizados na passarela será feita com o uso do sistema SCIA Engineer, software de análise e dimensionamento desenvolvido pela Nemetschek [6]. As verificações dos perfis metálicos serão feitas com a utilização do programa MCalc Perfis 4.0 da empresa Stabile Engenharia [8].

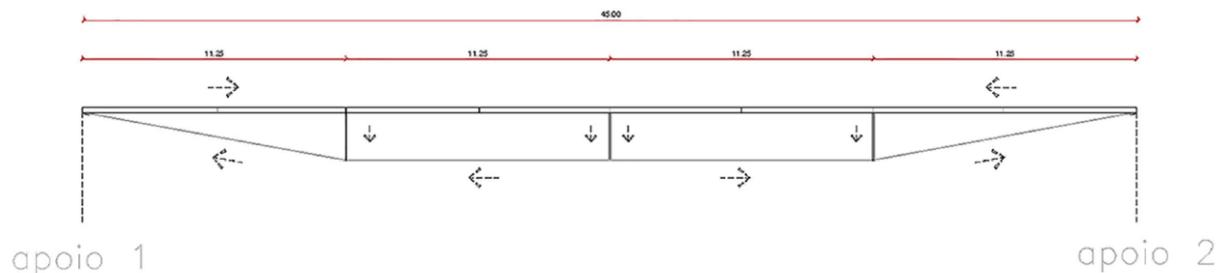


Figura 3. Modelo proposto com vigas vagonadas [4].

1.1 Modelo estrutural de viga vagão

O modelo estrutural denominado por viga vagão é composto por um elemento horizontal de alma cheia, e por montantes e cabos. O nome tem origem pelo seu uso como elemento estrutural de reforço em vagões de trens. O objetivo é fazer com que o cabo auxilie a viga no combate aos esforços e deslocamento oriundos da flexão, possibilitando a redução da sua altura, do seu peso próprio e a sua utilização em vãos maiores.

De acordo com Rebello [7], nesta associação, a viga se comporta como um elemento contínuo, apoiado nos montantes que se apoiam no cabo, esquema apresentado na Figura 4. O empuxo horizontal que o cabo aplica nos apoios é absorvido pela própria viga, resultando apenas em reações verticais.

A viga vagão pode ser composta por um ou mais montantes e conforme aumenta-se o número deste elemento estrutural, varia-se também a forma do cabo. Com um único montante a forma do cabo é triangular, com dois é um trapézio, tendendo no limite, com o uso de vários montantes, à forma de uma parábola, consequência do formato funicular, conforme mostrado por Lopes [5].

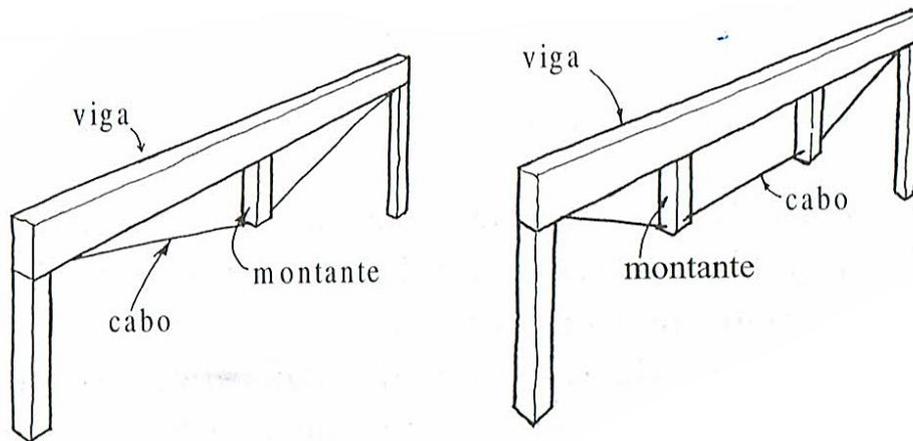


Figura 4. Modelo estrutural de viga vagão [7].

A viga simples não possui a contribuição dos cabos como elementos tracionados, já a ausência de diagonais rígidas é o que diferencia a estrutura vagonada do modelo estrutural de treliça plana. Porém, no caso de um único montante, modelo apresentado na Figura 5, a viga vagão se comporta de maneira semelhante a uma treliça com barra tracionada formada por cabos.

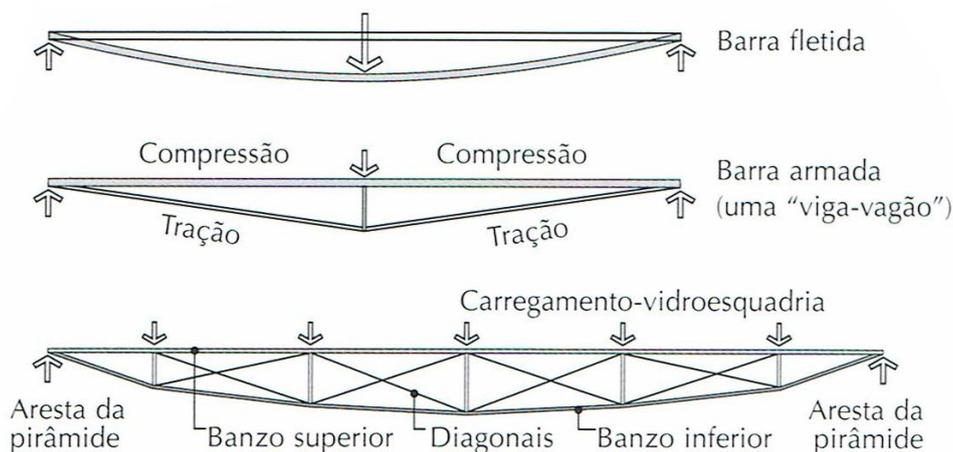


Figura 5. Diferenças entre os modelos estruturais de viga simples, viga vagão e treliça [5].

2. Desenvolvimento

2.1 Tipologia da estrutura

A Figura 6 apresenta o modelo estrutural da passarela de pedestres a ser analisado, seguindo a geometria proposta no projeto vencedor do 11º Concurso para Estudantes de Arquitetura do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), com as seguintes premissas de cálculo:

2.1.1 Tabuleiro com comprimento de 45m e largura de 10m;

2.1.2 Piso em grade metálica eletro fundida com acabamento galvanizado por imersão a quente, com superfície serrilhada e barras de ligação retorcidas, vão máximo de 1.250mm, do tipo E30A303-S4, fornecido pela empresa Metalgrade, peso próprio de 28,5 kg/m²;

2.1.3 Quatro vigas longitudinais com vão de 45m, birotuladas nos apoios das extremidades, considerados vínculos rígidos do 2º gênero, nos modelos estruturais de viga vagon com 3 montantes e treliça plana de banzos paralelos, fabricadas com perfis laminados da Gerdau com aço ASTM A572 grau 50;

2.1.4 Vigas secundárias para apoio das grades de piso do tabuleiro, dispostas transversalmente às vigas longitudinais, com vão de 3.300mm, entre os eixos 1-2 e 3-4, e de 3.400mm entre os eixos 2-3, espaçada a cada 1.125mm, fabricadas com perfis laminados da Gerdau com aço ASTM A572 grau 50;

2.1.5 Tirantes, montantes e contraventamentos com tubos estruturais de seção circular, fabricados pela Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S/A, com o uso de aço ASTM A501 grau A;

2.1.6 Ação variável decorrente do uso no valor de 5,00 kN/m², distribuída no piso da estrutura, conforme prescrito na ABNT NBR 7188:2013 [3];

2.1.7 Será adotado, como critério de aceitação dos modelos estruturais verificados, o valor de 60% do deslocamento máximo no eixo “z” (u_z), definido na Tabela C.1 do Anexo C da ABNT NBR 8800:2008 [2] para vigas de piso, como o comprimento do vão “L” dividido por 350, conforme definido na Eq. (1):

$$u_{z(\text{Lim})} \leq 60\% \times \frac{L(\text{vão})}{350} = 60\% \times \frac{45.000\text{mm}}{350} = 77\text{mm} \quad (1)$$

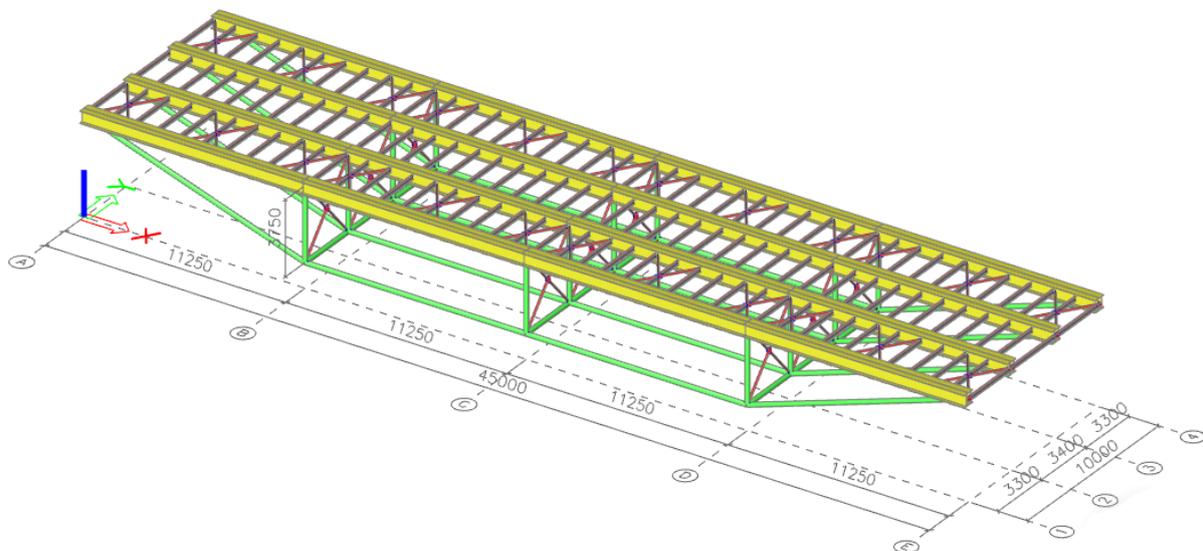


Figura 6. Tipologia da passarela proposta para análise dos modelos estruturais.

2.2 Pré-dimensionamento

A Figura 7 apresenta a estrutura de cobertura do pátio do Edifício Sede Nacional do Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae), em Brasília (DF) [1], com duas vigas vagon longitudinais, de 2.935mm de altura e vão principal de 36m de comprimento, utilizadas com referência de pré-dimensionamento para o estudo da passarela. As vigas vagonadas possuem a relação “ α ”, entre o vão “L” e a altura total “h”, no valor de 12 (doze), conforme mostrado na Eq. (2):

$$\alpha = \frac{L}{h} \therefore \alpha \geq \frac{36.000\text{mm}}{2.935\text{mm}} \cong 12 \quad (2)$$

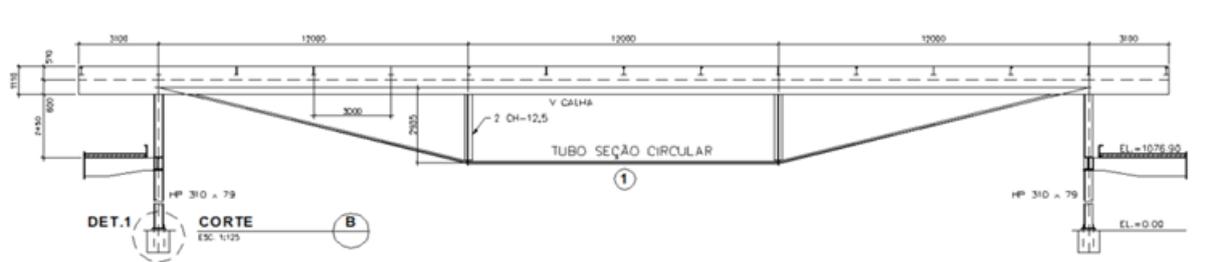


Figura 7. Pré-dimensionamento da viga vagão longitudinal da estrutura de cobertura do pátio do edifício sede do Sebrae em Brasília/DF [1].

2.3 Modelo estrutural de viga vagão

O modelo foi definido utilizando 4 (quatro) vigas longitudinais com vão de 45.000mm, birotuladas nos apoios das extremidades, 3 (três) montantes localizados a cada 11.250mm e altura total de 3.750mm.

O tabuleiro, formado por vigas secundárias dispostas a cada 1.125mm, possui contraventamento horizontal a cada 2.250mm, entre os eixos 1-2 e 3-4, conforme mostrado na Figura 8. A Vista Frontal apresenta o posicionamento do contraventamento vertical, localizado nos 3 (três) módulos transversais dos eixos B, C e D.

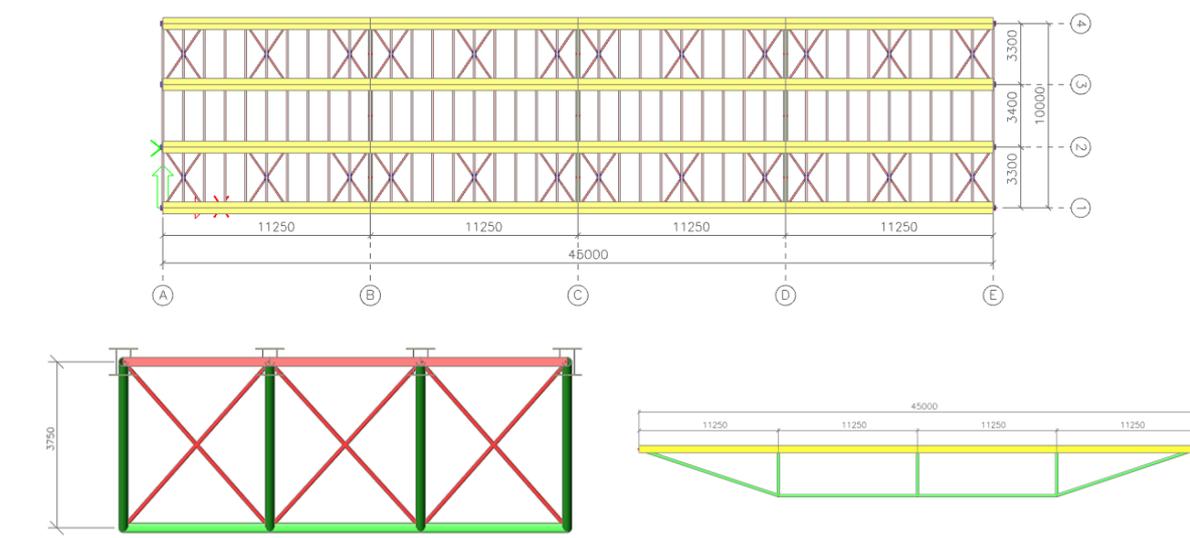


Figura 8. Modelo estrutural de viga vagão, Vista Superior, Frontal e Lateral.

Os grupos de perfis dimensionados no modelo de viga vagão estão descritos na Tabela 1, considerando o tipo de seção transversal, com sua massa unitária e total, o aço estrutural utilizado e o Fator de Verificação (FV), definido como a relação entre a solicitação e a resistência, estabelecido conforme as prescrições de Estados Limites Últimos da ABNT NBR 8800:2008 [2]. O valor de FV deverá ser inferior a 100%.

Tabela 1. Descrição dos grupos de perfis do modelo estrutural de viga vagon (Fonte: Autor, 2019).

Grupo	Nome	Seção Transversal	Massa Unit (kg/m)	Massa Total (kg/m)	% Part	Aço Estrutural	FV
1	Viga Principal	2x W610x155	311,0	55.981,1	68%	ASTM A572-50	34%
2	Montante	Tubo $\Phi 219,1 \times 12,5$	63,7	16.547,2	20%	ASTM A501	63%
3	Tirante	Tubo $\Phi 219,1 \times 12,5$	63,7			ASTM A501	85%
4	Contraventamento	Tubo $\Phi 88,9 \times 5,6$	11,5	3.243,8	4%	ASTM A501	47%
5	Viga Secundária	W200x15	15,2	6.248,0	8%	ASTM A572-50	64%
Total				82.020 kg	100%		
Taxa por área de tabuleiro				182 kg/m ²			

O deslocamento máximo no modelo de viga vagon, considerado no eixo "z" (u_z) em uma combinação frequente de Estados Limites de Serviço, foi de -75,8mm, conforme mostrado na Figura 9, correspondendo a 98% do valor máximo e a massa total de 82.020 kg, equivalente a taxa por área de tabuleiro no valor de 182 kg/m².

O dimensionamento foi determinado, predominantemente, pela verificação dos Estados Limites de Serviços (ELS), referente ao deslocamento dos elementos estruturais, obtidos a partir de uma combinação do tipo Frequente.

O modelo estrutural apresentou um fator de verificação (FV) médio, analisado conforme os Estados Limites Últimos estabelecidos na ABNT:NBR 8800:2008 [2], inferior a 59%, porém, a flecha atingiu 98% do limite estabelecido no estudo.

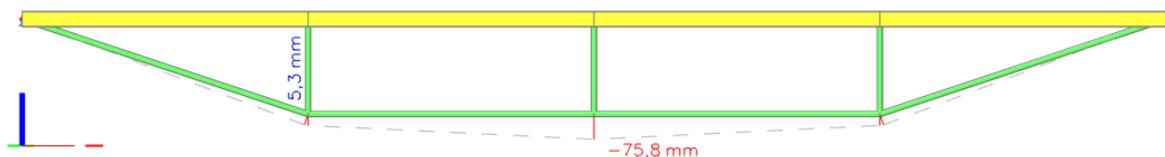


Figura 9. Deslocamento máximo no eixo "z".

2.4 Modelo estrutural de treliça plana de banzos paralelos

O modelo foi definido utilizando 4 (quatro) treliças longitudinais com vão de 45.000mm, birotuladas nos apoios das extremidades, do tipo Pratt com banzos paralelos e altura total de 3.750mm. Os banzos superiores e inferiores da treliça foram projetados com perfis laminados tipo W da Gerdau, as diagonais e montantes com perfil tubular de seção circular, conforme desenho mostrado na Figura

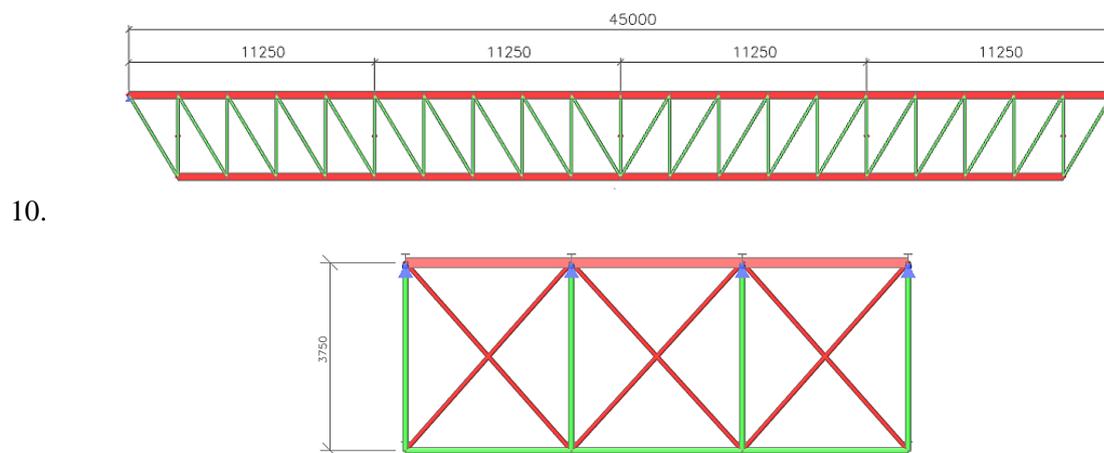


Figura 10. Modelo estrutural de treliça plana: Vista Frontal e Lateral (Fonte: Autor, 2019).

A Figura 11 apresenta o tabuleiro, mantido com as mesmas vigas secundárias dispostas a cada 1.125mm e contraventamento horizontal a cada 2.250mm. Os banzos da treliça, devido ao apoio fora dos nós das vigas secundárias, ficará submetido a esforços de flexão composta.

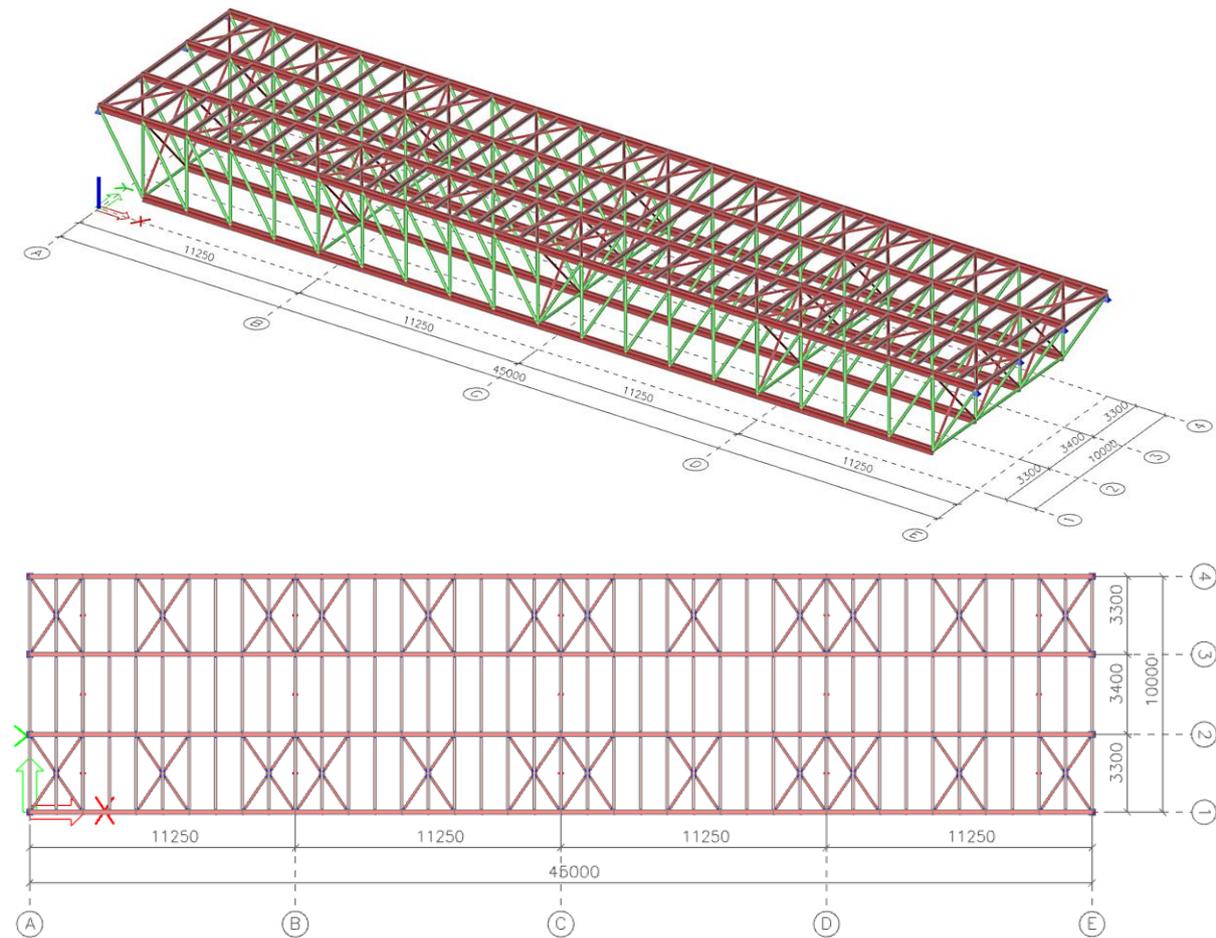


Figura 11. Modelo estrutural de treliça plana com banzos paralelos, tipo Pratt, perspectiva e vista superior.

Os grupos de perfis dimensionados no modelo de treliça plana de banzos paralelos estão descritos na Tabela 2, considerando o tipo de seção transversal, com sua massa unitária e total, o aço estrutural utilizado e o Fator de Verificação (FV), definido como a relação entre a solicitação e a resistência, estabelecido conforme as prescrições de Estados Limites Últimos da ABNT NBR 8800:2008 [2]. O valor de FV deverá ser inferior a 100%.

Tabela 2 - Descrição dos grupos de perfis do modelo estrutural de treliça plana, divididos em banzos, diagonal, montante, contraventamento e viga secundária (Fonte: Autor, 2019).

Grupo	Nome	Seção Transversal	Massa Unit (kg/m)	Massa Total (kg/m)	% Part	Aço Estrutural	FV
1	Banzo Superior	W360x64	64,1	21.921,0	43%	ASTM A572-50	76%
2	Banzo Inferior	W360x64	64,1			ASTM A501	85%
3	Diagonal	Tubo $\Phi 168,3 \times 7,1$	28,2	19.326,5	38%	ASTM A501	74%
4	Montante	Tubo $\Phi 168,3 \times 7,1$	28,2			ASTM A501	83%
5	Contraventamento	Tubo $\Phi 88,9 \times 5,6$	11,5	3.936,3	8%	ASTM A501	47%
6	Viga Secundária	W200x15	15,2	6.248,0	12%	ASTM A572-50	64%
Total				51.432 kg	100%		
Taxa por área de tabuleiro				114 kg/m ²			

O deslocamento máximo no modelo de treliça plana de banzos paralelos, considerado no eixo “z” (u_z) em uma combinação frequente de Estados Limites de Serviço, foi de -45,1mm, conforme mostrado na Figura 12, correspondendo a 35% do valor máximo e a massa total de 51.432 kg, equivalente a taxa por área de tabuleiro no valor de 114 kg/m².

O dimensionamento foi determinado, predominantemente, pela verificação dos Estados Limites Últimos (ELU) dos elementos estruturais, com fator de verificação (FV) médio de 72% e flecha de 58% do valor máximo estabelecido no estudo.

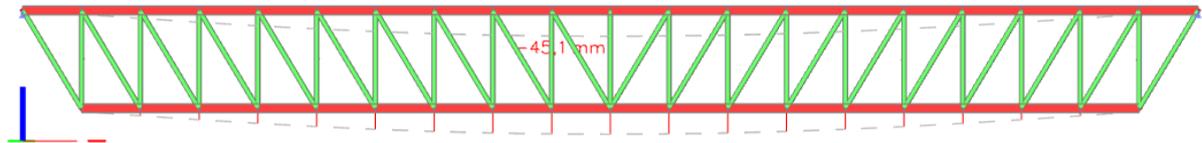


Figura 12. Deslocamento máximo no eixo "z" (Fonte: Autor, 2019).

3. Análise e conclusões

O modelo estrutural da passarela, proposto pelos autores do projeto, vencedores do 11º Concurso para Estudantes de Arquitetura do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), com o uso de vigas longitudinais vagonadas, quando comparado com uma solução em treliça plana, demonstrou um pior desempenho em relação aos parâmetros analisados no estudo: taxa de consumo de aço por área de tabuleiro e deslocamento vertical máximo “ u_z ” do conjunto.

Observou-se no modelo de viga vagonada a influência maior do Estado Limite de Serviço no dimensionamento das peças da passarela e do Estado Limite Último na opção de vigas treliçadas planas.

A estrutura metálica da solução com treliças planas para a passarela de pedestres apresentou peso próprio de 51.432 kg, aproximadamente 63% do valor obtido na opção de vigas vagonadas, com 82.020 kg. O deslocamento máximo da solução treliçada, na combinação do tipo Frequente, também teve um resultado inferior, sendo obtido o valor de 45mm, cerca de 59% do alcançado na opção de vigas vagonadas, com 76mm.

Não foram quantificados os valores referentes aos custos de fabricação, transporte e montagem de cada solução analisada, percebe-se, contudo, que a solução de vigas longitudinais vagonadas, por apresentar uma menor quantidade de elementos componentes, sugere uma maior facilidade de fabricação do conjunto, indicador não analisado no estudo e que deve ser considerado na definição do modelo estrutural.

A solução vagonada, por ter menos componentes, apresenta também uma menor quantidade de conexões, sugerindo uma montagem mais rápida da estrutura e acessos mais fáceis a eventuais serviços de manutenção dos elementos de ligação.

Além disso, por ser uma opção mais permeável que a solução com uso de treliças planas, o modelo de vigas vagonada, parece ser mais adequada à intenção do projeto de adequar a edificação com a topografia existente do terreno, em respeito ao meio ambiente e sem descaracterizar a região de implantação.

Assim, a solução mais adequada de um modelo estrutural está relacionada com o peso da estrutura e o seu desempenho quanto aos Estados Limites Últimos e de Serviço, porém, no caso de estruturas pré-fabricadas devem ser incluídas, necessariamente, as variáveis relacionadas com a fabricação, o transporte e a montagem das peças. A facilidade relacionada à manutenção também deve ser considerada e quantificada na durabilidade da estrutura durante a sua vida útil.

E, dentre os demais indicadores objetivos, deve-se ponderar a melhor compatibilização da proposta estrutural com a intenção do projeto do projeto arquitetônico, tornando a decisão por vigas vagonadas possível e mais adequada.

Referências

- [1] Arquitetura & Aço. Rio de Janeiro: CBCA, Nº 28, 1 nov. 2011.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 8800: Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7188: carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- [4] CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço. Disponível em <http://www.cbca-acobrasil.org.br/arquitetura_2018/vencedores.php>. Acesso em: 17 de abril de 2019.
- [5] Lopes, João Marcos; Bogéa, Marta; Rebello, Yopanan Conrado Pereira. Arquiteturas da engenharia, ou, Engenharias da arquitetura. São Paulo: Mandarim, 2006.
- [6] Nemetschek Group. Disponível em <<https://www.scia.net/pt/software>>. Acesso em: 17 de abril de 2019.
- [7] Rebello, Yopanan Conrado Pereira. A concepção estrutural e a arquitetura. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.
- [8] Stabile Engenharia Ltda. Disponível em <<http://www.stabile.com.br/index-programas.php>>. Acesso em: 17 de abril de 2019.