

PROJETO DE UMA PASSARELA DE ESTRUTURA METÁLICA

PROJECT OF FOOTBRIDGE STEEL STRUCTURE

NASCIMENTO, Maria de Fatima Fernandes do ¹
REIS, Eduardo ²
BASTOS, Cristiane Cruxen Daemon d'Oliveira e ³

Resumo: Este trabalho aborda o projeto de passarelas sobre rodovias utilizando estruturas de aço treliçadas. Será realizada uma análise da utilização de diversos perfis estruturais em aço, de forma a se obter um dimensionamento otimizado da passarela. O objetivo desse trabalho é realizar uma análise comparativa de passarelas metálicas adotando-se diferentes tipos de perfis de aço (perfis laminados I e H e tubulares), com o intuito de se obter uma estrutura com material adequado, funcional e leve, visando à segurança e o conforto dos pedestres.

Palavras-chave: Estruturas de aço, passarelas treliçadas, perfis estruturais em aço, passarelas sobre rodovias.

Abstract: This work presents the design of footbridges on highways using steel lattice structures. An analysis of the use of various structural steel profiles will be carried out in order to obtain an optimized design of the footbridge. The objective of this work is to perform a comparative analysis of metal footbridges using different types of steel profiles (hot-rolled I and H and tubular profiles), in order to obtain a structure with suitable, functional and light material, aiming safety and comfort of pedestrians.

Keywords: Steel structure, lattice footbridge, steel structural profiles, footbridges on highways.

1. INTRODUÇÃO

As passarelas são fundamentais para o tráfego de pessoas sobre as vias com elevado volume de automóveis, provendo segurança aos pedestres e agilidade na transposição. Antigamente, elas eram rústicas feitas com troncos de árvores e usadas, principalmente, para transpor rios, riachos e vales elevados.

Para iniciar o projeto realizou-se uma pesquisa de campo com o objetivo de conhecer os diversos tipos de passarela, com o intuito de escolher a melhor estrutura para o artigo. Com isso, vários dados foram coletados, como, largura da passarela, altura, espessura dos perfis, tipos de ligações, conexões, inclinações das rampas entre outras informações. A figura 1 é uma passarela de concreto, localizada na Rodovia Presidente Dutra, a figura 2 é uma passarela de estrutura mista com chapa dobrada e concreto, localizada na Rodovia Washington Luís, a figura 3 é uma passarela metálica com diversos tipos de perfis, localizada na Avenida Maracanã e a figura 4 é uma passarela com perfis tubulares redondos, localizada na Avenida Maracanã.

¹Graduanda em Engenharia Civil; Universidade Santa Úrsula; Estruturas; mffernandesnascimento@gmail.com.

²Graduando em Engenharia Civil; Universidade Santa Úrsula; Estruturas; reisdu2004@gmail.com.

³Doutora em Engenharia Civil COPPE UFRJ/Professora Universidade Santa Úrsula; Cristiane.daemon@usu.edu.br.

Figura 1 - Passarela em concreto



Fonte: Autores

Figura 2 - Passarela mista com chapa dobrada



Fonte: Autores

Figura 3 - Passarela metálica treliçada



Fonte: Autores

Figura 4 - Passarela metálica tubular treliçada



Fonte: Autores

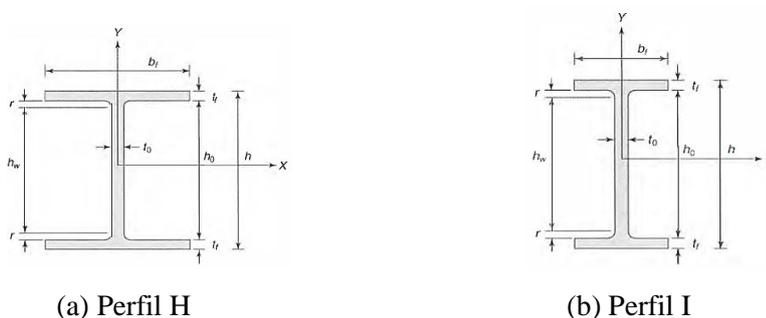
Hoje, é possível observar a adoção de vários materiais na construção de passarelas, como o aço, concreto armado, concreto protendido e madeira. O aço, com a evolução das técnicas da metalurgia, é composto de ligas mais resistentes na sua composição, tornando o material mais leve e resistente. Diferente das ligas de ferro fundido usada no passado, tem-se vários teores de carbonos entre outros componentes na sua composição, de forma que as estruturas são mais leves e dúcteis, gerando uma montagem mais rápida e limpa, além de maior soldabilidade.

Atualmente, é possível observar vários tipos de perfis de aço nas estruturas de passarelas, como por exemplo os perfis soldados, laminados ou de chapa dobrada (perfis formados a frio). Os perfis de aço laminados são I, H, L, C e U, e são regidos pela norma ABNT NBR 15980 (2011). Os perfis tubulares, que podem ser tubos redondos, retangulares e quadrados, são regidos pela norma ABNT NBR 16239 (2013).

Os perfis de aço soldados padronizados pela norma ABNT NBR 5884 (2013) são: Coluna Viga Soldada (CVS), Viga Soldada (VS) e Coluna Soldada (CS). Já os perfis formados a frio são regidos pelas normas ABNT NBR 6355 (2012) e ABNT NBR 14762 (2010). Cada um tem a sua vantagem, como menor preço, maior capacidade de carga, execução e montagem com menor desperdício de tempo e estética.

Nesse contexto, este artigo abordará sobre a melhor estrutura de aço a ser usada na construção da passarela que será projetada, com uma comparação entre os perfis de aço laminados (I e H), conforme a figura 5 (a) perfil H e (b) perfil I, e os perfis de aço tubulares (TR), conforme a figura 6 do perfil tubular redondo. Para isso, serão analisadas duas passarelas idênticas, porém, utilizando-se perfis de aço diferentes. Serão adotados os carregamentos atuantes na estrutura, seguindo os procedimentos normativos, para a perfeita escolha dos perfis que serão utilizados neste trabalho, garantindo a segurança estrutural em função dos cálculos de dimensionamento. Será comparado o peso total de aço obtido em cada solução (perfis laminados e perfis tubulares redondos), de forma a se obter a estrutura mais leve.

Figura 5 - Perfis laminados



Fonte: PFEIL (2009)

Figura 6 - Perfil tubular redondo



Fonte: Centro Brasileiro de Construção em Aço (2019)

Existem disponíveis no mercado diversos tipos de *softwares* de análise estrutural, tais como o SAP2000, ANSYS, CYPECAD, STRAP, GTSTRUDL, ÁBACUS, MASTAN2, entre outros. Para realizar esse projeto foi escolhido o *software* de análise estrutural (SAP2000 v21-versão de avaliação). O SAP2000 é um programa de elementos finitos, com interface gráfica 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, a modelação, análise e dimensionamento do mais vasto conjunto de problemas de engenharia de estruturas. No modelo

elaborado para a análise estrutural da passarela deste artigo, foram utilizados elementos de barra tridimensionais com seis graus de liberdade.

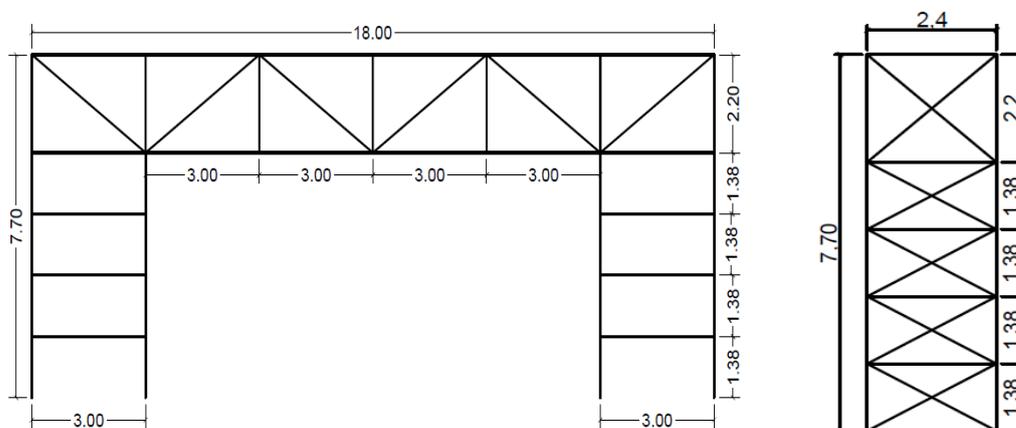
O SAP2000 fornece os esforços solicitantes nos elementos da estrutura, para as combinações no Estado Limite Último inseridas manualmente pelo usuário no programa, considerando as principais cargas atuantes na estrutura, tais como: peso próprio da estrutura, peso próprio do piso (laje) de concreto, sobrecarga, força horizontal excepcional e carregamento de vento.

O programa realiza grande parte dos cálculos do projeto, incluindo a análise estrutural e a verificação dos perfis de aço segundo a norma ANSI/AISC 360-10 (*Specification for Structural Steel Buildings*). Isto facilita muito o dimensionamento pois, ao mudar a seção de algum perfil, os resultados são mostrados automaticamente.

2. DESENVOLVIMENTO

A passarela deste trabalho foi planejada para uma pista simples de 18 metros, com 5,50 metros de altura do solo ao piso da passarela (para atender o gabarito rodoviário). De acordo com o Manual de projeto geométrico de travessias urbanas - DNIT (2010), a largura mínima de uma passarela deve ser 2,40 m, portanto essa foi a medida adotada, e com altura da treliça de 2,20 metros, conforme demonstrado na Figura 7 (a) vista frontal e (b) vista lateral.

Figura 7 – Vistas frontal e lateral da estrutura da passarela



(a) Vistas frontal

(b) Lateral

Fonte: Autores

As duas rampas de acesso, localizadas em cada lado da passarela metálica, foram dimensionadas de acordo com a norma de Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos ABNT NBR 9050 (2015), possuindo 58,6 metros de projeção horizontal em cada lado, com três áreas de descanso nos patamares localizadas a 27,50 metros de suas extremidades, que foram projetadas com o objetivo de fornecer um melhor conforto aos pedestres e as pessoas com dificuldades de locomoção.

O aço utilizado na estrutura da passarela foi o ASTM 572 grau 50 que possui limite de escoamento $f_y = 345$ MPa e resistência à ruptura $f_u = 450$ MPa.

O material utilizado para o piso (laje) da passarela e das rampas foi o *Steel Deck*, que possui elevada vida útil, fácil montagem e peso próprio reduzido. O modelo escolhido foi do fabricante METFORM® modelo MF-50, com altura total da laje de 120 milímetros.

3 CÁLCULO DA RAMPA

3.1 Área de descanso

Recomenda-se prever uma área de descanso, fora da faixa de circulação, a cada 50 m, para piso com até 3 % de inclinação, ou a cada 30 m, para piso de 3 % a 5 % de inclinação.

3.2 Patamares das rampas

Os patamares no início e no término das rampas devem ter dimensão longitudinal mínima de 1,20 m. Entre os segmentos de rampa devem ser previstos patamares intermediários com dimensão longitudinal mínima de 1,20 m. Os patamares situados em mudanças de direção devem ter dimensões iguais à largura da rampa.

3.3 Dimensionamento de rampas

A Tabela 1 mostra o dimensionamento de rampas, com as inclinações admissíveis conforme a ABNT NBR 9050 (2015).

Tabela 1 – Dimensionamento de rampas

Desníveis máximos de cada segmento de rampa h (m)	Inclinação admissíveis em cada segmento de rampa i (%)	Número máximo de segmentos de rampa
1,50	5,00 (1:20)	Sem limite
1,00	5,00 (1:20) < i ≤ 6,25 (1:16)	Sem limite
0,80	6,25 (1:16) < i ≤ 8,33 (1:12)	15

Fonte: ABNT NBR 9050 (2015)

O desnível máximo selecionado foi 1,50 m para cada segmento de rampa (h), para o cálculo em lide usou-se $h = 1,375$ m e esse valor foi utilizado na Equação 1.

$$\text{Fórmula: } i = \frac{h \times 100}{c} \quad (1)$$

i é a inclinação, expressa em porcentagem (%);

h é a altura do desnível; e

c é o comprimento da projeção horizontal.

Calculando a projeção horizontal de cada rampa, encontrou-se o $c = 27,50$ m.

4 CÁLCULO DAS AÇÕES ATUANTES NA PASSARELA

Nesse projeto serão calculadas as seguintes cargas atuantes na estrutura:

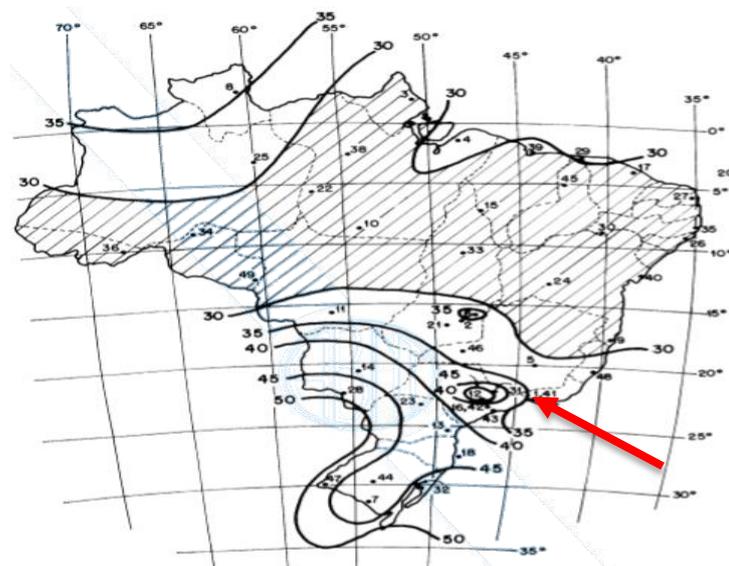
- Peso próprio da laje;
- Sobrecarga;
- Vento.

O peso próprio da estrutura de aço da passarela essa já é calculado automaticamente pelo *software* de análise estrutural (SAP2000), a partir do valor do peso específico do material inserido pelo usuário. Como a laje está apoiada nas transversinas, as cargas devido ao peso próprio da laje e à sobrecarga serão aplicadas como cargas distribuídas nas transversinas. A carga devida ao vento é distribuída ao longo da estrutura, porém, como se trata de uma estrutura treliçada, as cargas resultantes de vento serão aplicadas nos nós da estrutura.

4.1 Cálculo da ação do vento

O cálculo da ação do vento foi realizado considerando o mapa de isopletas (gráfico de curvas de igual velocidade do vento) com a velocidade básica, conforme a Figura 8, medida em (m/s) para cada região do Brasil. A velocidade básica (V_0) é a máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano conforme a ABNT NBR 6123 (1988).

Figura 8 - Mapa de isopletas



Fonte: ABNT NBR 6123 (1988)

O projeto da passarela foi realizado para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, sendo assim a velocidade básica (V_0) adotada foi de 35 m/s.

O cálculo da velocidade característica do vento deve considerar os fatores S1, S2 e S3. O fator topográfico (S1) leva em consideração as variações do relevo do terreno. O fator S2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. O fator estatístico S3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

Adotou-se o fator **S1** = 1,0 (terreno plano ou fracamente acidentado), pois a passarela foi projetada para um terreno plano. O fator de rugosidade do terreno **S2** leva em consideração as condições das vizinhanças da edificação. Para isto, a norma considera a existência de 4 categorias. A categoria adotada foi a II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Além disso, a dimensão da edificação é classificada em 3 classes (A, B e C). Adotou-se a classe A, visto que a maior dimensão é de 18 m (classe A, todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m).

Selecionadas as categorias e classes, a próxima etapa é consultar a Tabela 2 da ABNT NBR 6123 (1988) de classes e categorias para encontrar o valor de S2 que se enquadre na edificação. A Tabela seguir apresenta as informações conforme a norma, com os valores do fator S2 (fatores devidos à rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno).

Tabela 2 – valores do fator S2

Z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988)

Como a altura máxima da passarela é de 7,70 m, entrando-se na tabela com a categoria II e classe A, obtém-se os valores 0,94 e 1,00, para as alturas de 5 e 10m respectivamente. Interpolando-se os valores, obtém-se **S2**=0,97 para a altura de 7,7m.

O fator estatístico **S3**, como o próprio nome indica, é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Esse fator é dividido em 5 grupos,

conforme o grau de importância da edificação. Adotando-se o grupo 2 (que é referente a edificações para hotéis e residências, e/ou edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação), obtém-se $S3 = 1,00$.

O cálculo da velocidade característica é definido pela Equação 2:

$$V_k = V_o \times S1 \times S2 \times S3 \quad (2)$$

$$V_k = 33,95 \text{ m/s}$$

A norma ABNT NBR 6123 (1988) estabelece para o cálculo da pressão dinâmica a Equação 3:

$$q = 0,613 \times (V_k)^2 \quad (3)$$

$$q = 706,54 \text{ N/m}^2$$

4.1.1 Coeficientes de arrasto (C_a)

Os coeficientes de arrasto dependem da relação $h/L1$ entre o comprimento do corpo e a dimensão de referência $L1$ e, em diversos casos, do número de Reynolds, ilustrado na Equação 4. No caso da passarela deste trabalho, tem-se:

$L1$ = altura da treliça (2,20 m);

$L2$ = largura da passarela (2,40 m);

$2h$ = comprimento da passarela ($2h = 18$, logo $h = 9$ m).

$$Re = 70000 \times V_k \times L1 \quad (V_k \text{ em m/s; } L1 \text{ em m}) \quad (4)$$

$Re = 5.228.300,00 \text{ m}^2/\text{s}$, onde $Re \times 10^{-5} = 52,28$. Consultando-se a tabela da norma ABNT NBR 6123 (1988) na página 22, obtém-se $C_a = 0,5$.

A favor da segurança, como os cantos da seção transversal não são arredondados, foi adotado o coeficiente de arrasto de 0,9.

4.1.2 Coeficientes de força

A força global do vento sobre uma edificação ou parte dela, F_g , é obtida pela soma vetorial das forças do vento que nela atuam. A componente da força global na direção do vento, força de arrasto F_a , é obtida pela Equação 5.

$$F_a = C_a \times q \times A_e \quad (5)$$

Onde:

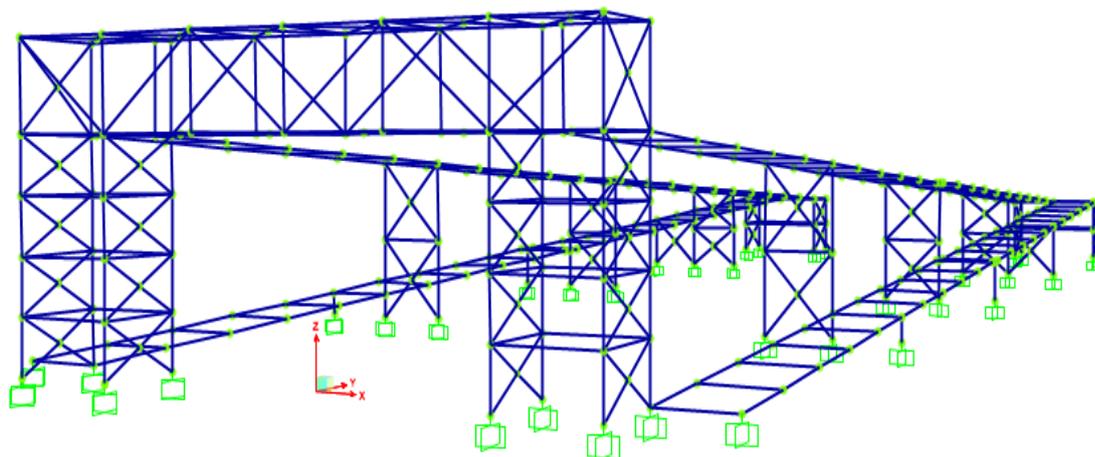
C_a = coeficiente de arrasto;

q = pressão dinâmica;

A_e = área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento ("área de sombra").

Os cálculos da carga de vento na passarela serão discriminados conforme o seu eixo de atuação. A Figura 9 mostra o desenho estrutural da passarela com seus respectivos eixos.

Figura 9 – Desenho estrutural da passarela



Fonte: SAP2000 (2019)

Os resultados dos cálculos da carga de vento com seus respectivos eixos de atuação e aplicados nos nós correspondentes, encontram-se discriminados na Tabela 3.

Tabela 3 – Vento aplicado em cada nó no modelo da passarela

Área de atuação na passarela	Força de arrasto F_a eixo x (kN)	Força de arrasto F_a eixo y (kN)
Vento frontal na passarela (aplicado em 14 nós)	-	1,8
Vento nas rampas lado direito (aplicado em 45 nós)	1,79	-
Vento lateral nos pilares (aplicado em 17 nós)	0,7	-
Vento frontal nos pilares (aplicado em 16 nós)	-	1,31

Fonte: Autores

4.2 AÇÕES PERMANENTES A SEREM CONSIDERADAS:

4.2.1 Cálculo do peso próprio do *Steel Deck* na passarela e nas rampas

A Tabela 4 apresenta a distribuição do peso da laje na passarela e nas rampas. Para o cálculo do peso próprio da laje, foi considerado o peso do *Steel Deck* MF-50, com altura da laje de 120 mm e espessura da fôrma de 0,95 mm.

Tabela 4 – Distribuição do peso da laje na passarela e nas rampas

Peso da laje na passarela		Peso da laje nas rampas	
Dados	Valores	Dados	Valores
Peso próprio + revestimento (kN/m ²)	3,33	Peso próprio + revestimento (kN/m ²)	3,33
Área da passarela (m ²)	43,2	Área da rampa (m ²)	563,12
Peso total (kN)	143,86	Peso total (kN)	1.875,19
Carga aplicada por nó (20 nós) (kN)	7,19	Carga aplicada por nó (180 nós) (kN)	10,42

Fonte: Autores

4.2.2 Cálculo da carga de utilização na passarela

O carregamento de utilização a ser adotado na passarela, conhecido como carga móvel ou carga de multidão, é uma carga uniformemente distribuída aplicada sobre o piso entre os guarda-corpos, sem consideração do coeficiente de impacto vertical. A norma ABNT NBR 7188 (2013) especifica o valor de carga móvel a ser adotado em passarelas de **5,0 kN/m²**. Aplicando-se esse carregamento distribuído em toda a área do piso da passarela, obtém-se a carga a abaixo a ser aplicada em cada um dos 20 nós do piso da passarela:

- Carga a ser aplicada em cada nó do piso da passarela = **10,8 kN**.

4.2.3 Cálculo da carga de utilização na rampa

O carregamento de utilização a ser adotado na rampa é o mesmo da passarela, de **5,0 kN/m²**. Aplicando-se esse carregamento distribuído em toda a área do piso da rampa, obtém-se a carga a abaixo a ser aplicada em cada um dos 180 nós do piso das rampas:

- Carga a ser aplicada em cada nó do piso da rampa = **15,64 kN**.

Usando a tabela de cargas e vãos máximos do fabricante, observa-se que, com um vão de 2.400 mm com a laje escolhida, é possível suportar uma carga sobreposta de 7,06 kN/m² (de acordo com a tabela do fabricante METFORM® modelo MF-50).

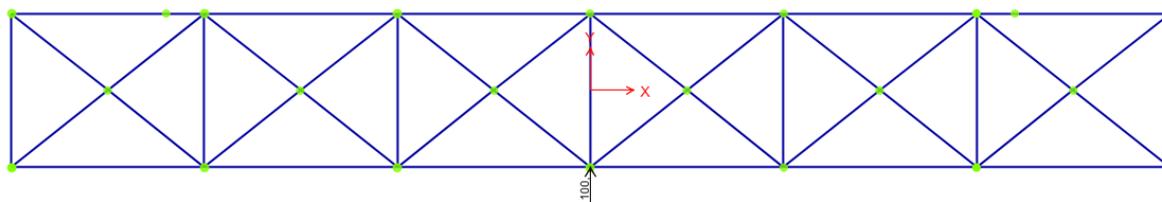
Como a passarela possui uma carga móvel de 5,0 kN/m², e adotando-se uma carga de revestimento de 1,0 kN/m², totaliza 6,0 kN/m², que é inferior a carga máxima suportada pela laje modelo MF-50 (que é de 7,06 kN/m²).

4.2.4 Carga horizontal Excepcional

De acordo com a NBR 7188 (ABNT,2013), é necessário considerar uma carga pontual de 100 kN aplicada no ponto mais desfavorável da estrutura, no sentido do tráfego sob a passarela. Portanto será aplicada uma carga de **100 kN** no meio do vão, (onde o momento é máximo), conforme a Figura 10. É importante destacar que a consideração dessa carga horizontal não descarta a possibilidade de

ocorrer o colapso parcial ou total da estrutura caso ocorra uma colisão. Essa carga deve ser utilizada apenas para verificação dos pilares.

Figura 10 – Vão principal com a carga pontual de 100kN



Fonte: SAP2000 (2019)

5. COMBINAÇÃO DAS AÇÕES ATUANTES NA PASSARELA

Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período pré-estabelecido. A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação dos estados limites últimos e dos estados limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente (ABNT, NBR. 8800: “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.” *Rio de Janeiro-2008*, p.20 e p.21).

Um estado limite ocorre sempre que a estrutura deixa de satisfazer um de seus objetivos. Eles podem ser divididos em:

- Estados limites últimos e
- Estados limites de utilização.

Os estados limites últimos estão associados à ocorrência de cargas excessivas e consequente colapso da estrutura devido, por exemplo:

- a perda de equilíbrio como corpo rígido;
- a plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção;
- a ruptura de uma ligação ou seção;
- a flambagem em regime elástico ou não;
- a ruptura por fadiga.

Os estados limites de utilização (associados a cargas em serviço) incluem:

- deformações excessivas e
- vibrações excessivas.

Para determinar os esforços solicitantes é necessário realizar uma análise estrutural utilizando uma combinação de ações. Se apenas uma ação variável atua na estrutura, essa combinação pode ser feita somando as ações permanentes com a ação variável, cada uma com seus respectivos fatores de

ponderação. Caso atue mais de uma ação variável, é levado em conta o fato de que dificilmente todas as ações variáveis terão um valor igual ou superior ao característico durante um mesmo intervalo de tempo. Portanto, devem ser feitas todas as combinações possíveis em cada uma das ações variáveis que atuará com seu valor característico (ação variável principal), enquanto as outras atuarão com seus valores reduzidos em até 50% (ações variáveis secundárias). Em todas as combinações, as ações são majoradas por coeficientes de ponderação, que levam em consideração as incertezas dos seus valores característicos. As ações variáveis que não são principais são minoradas pelos fatores de combinação.

Neste trabalho, a comparação entre as soluções estruturais com perfis laminados e tubulares, foi realizada considerando-se apenas os Estados Limites Últimos (ELU).

A norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008) adotou uma formulação compatível com as normas nacionais e internacionais de segurança das estruturas. A Norma Brasileira NBR 8681 da ABNT – Ações e Segurança nas Estruturas - fixa os critérios de segurança das estruturas e de quantificação das ações e das resistências a serem adotados nos projetos de estruturas constituídas de quaisquer dos materiais usuais na construção civil.

Segundo a ABNT, NBR 8800 (2008), “As combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação. Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados limites últimos aplicáveis. Em cada combinação devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação”

Os Coeficientes de Segurança Parciais aplicados às ações (ou solicitações) no Estado Limite Último e os Fatores de Combinação e de Redução para as ações, constam nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 – Valores dos Fatores de Combinação Ψ_0 e de Redução Ψ_1 e Ψ_2 para as ações

Ações		γ_{f2}		
		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Fonte: PFEIL (2009)

Tabela 6 – Coeficientes de Segurança Parciais γ_f aplicados às ações (ou solicitações) no Estado Limite Último ABNT NBR 8800 (2008)

Ações		Combinações		
		Normais	Especiais ou de construções	Excepcionais
Permanentes	Peso próprio de estruturas metálica	1,25 (1,00)	1,15 (1,00)	1,10 (1,00)
	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,40 (1,00)	1,30 (1,00)	1,20 (1,00)
	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	1,50 (1,00)	1,40 (1,00)	1,30 (1,00)
Variáveis	Ação do vento	1,40	1,20	1,00

Fonte: PFEIL (2009)

As combinações normais de ações para estados limites últimos são escritas em função dos valores característicos das ações permanentes (G) e variáveis (Q), conforme a Equação 6.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (6)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

As combinações nos **Estados Limites Últimos** (ELU) adotadas para efeito deste artigo estão listadas a seguir:

Combinação 1 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,5.CA)

Combinação 2 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,4.CVy)+(1,4.Cpy)

Combinação 3 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,4.CVpx)+(CVrx.1,4)

Combinação 4 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,4.CVy.0,6)+(1,5.CA)

Combinação 5 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,5.CA.0,6)+(1,4. CVy) +(1,4.CVpy.0,6)

Combinação 6 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,5.CA.0,6)+(1,4.CVy.0,6)+(1,5.CE)+ (1,4.CVpy.0,6)

Combinação 7 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,5.CA)+(1,4.CVpx.0,6)+(1,4.CVrx.0,6)

Combinação 8 = (1,25.CP1)+(1,4.CP2)+(1,5.CA.0,6)+(1,4.CVpx)+ (1,4.CVrx.0,6)

Onde:

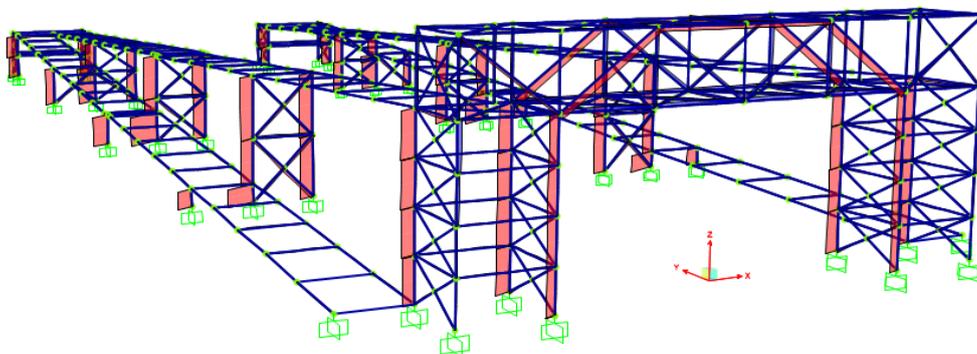
CP1 = ações permanentes do peso próprio da estrutura da passarela;

CP2 = ações permanentes do peso próprio da laje;

CV_y = ações variáveis devidas ao vento na passarela no eixo y;
 CV_{py} = ações variáveis devidas ao vento no pilar no eixo y;
 CV_{px} = ações variáveis devidas ao vento no pilar no eixo x;
 CV_{rx} = ações variáveis devidas ao vento na rampa no eixo x;
CA = ações variáveis devido à sobrecarga de utilização;
CE = ação excepcional de impacto horizontal.

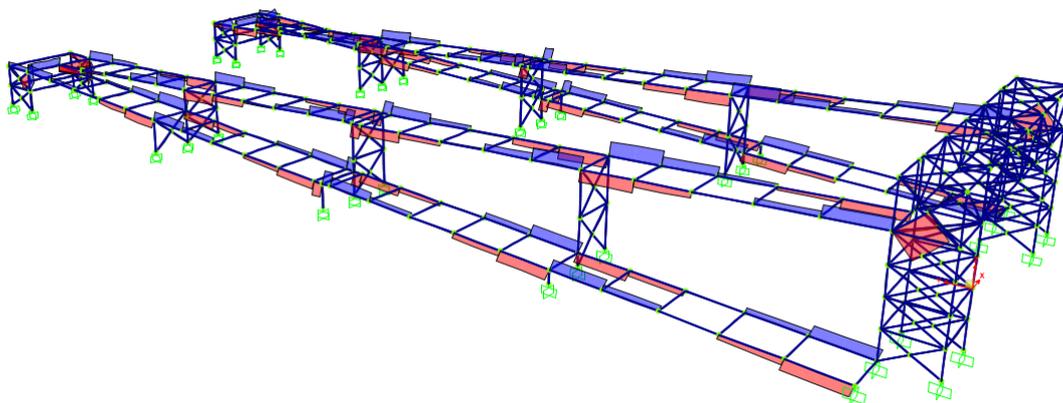
A seguir estão mostrados, os diagramas de esforços normais (Figura 11), de esforços cortantes (Figura 12) e de momentos fletores (Figura 13), apenas para a Combinação 1, a título de exemplo. Os diagramas dos momentos torsores não se encontram apresentados pois os mesmos apresentaram valores pequenos.

Figura 11 - Diagrama de esforços normais (Combinação 1)



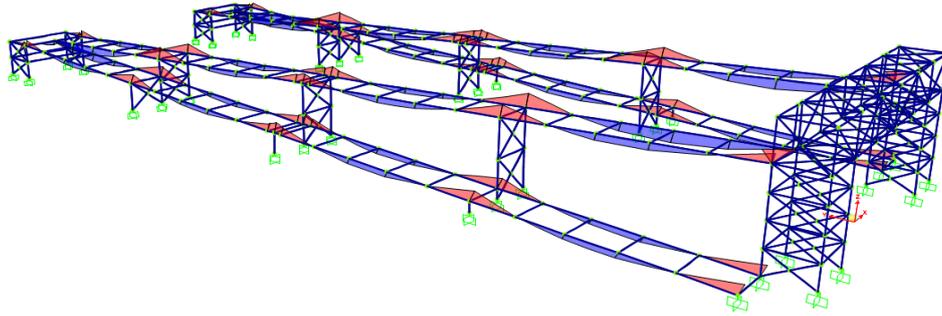
Fonte: SAP2000 (2019)

Figura 12 – Diagrama de esforços cortantes (Combinação 1)



Fonte: SAP2000 (2019)

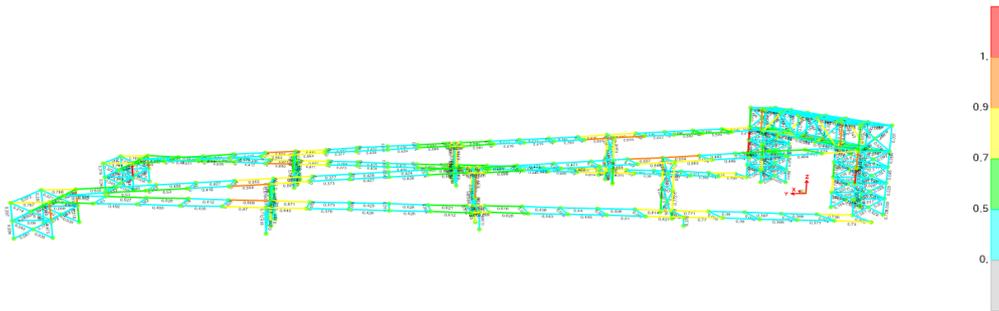
Figura 13 – Diagrama de momentos fletores (Combinação 1)



Fonte: SAP2000 (2019)

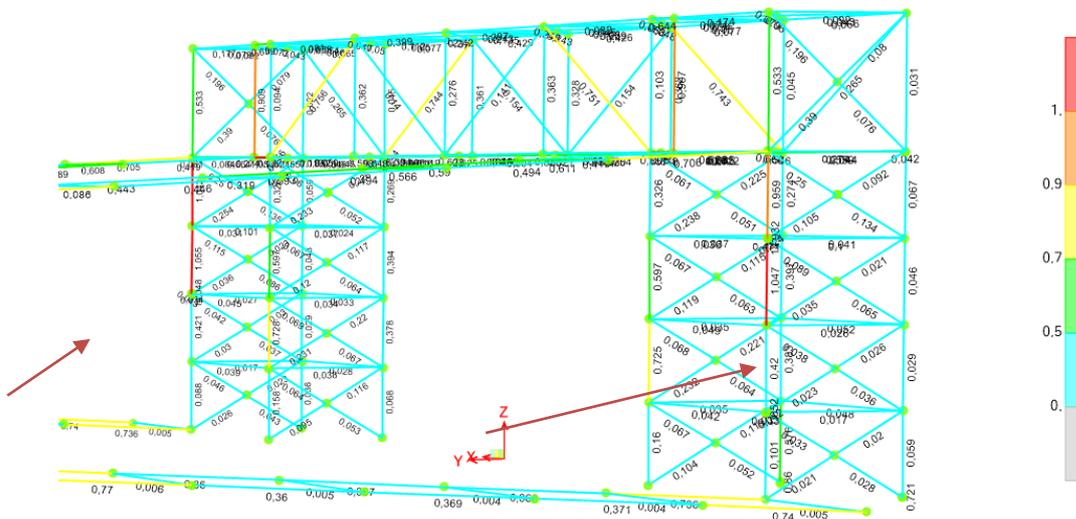
As Figuras 14 a 17 apresentam as solicitações impostas aos elementos da passarela, quando submetidos às combinações, apresentando a razão entre os esforços solicitantes e esforços resistentes (que deve ser inferior a 1). O gráfico de cores a direita indica o grau de intensidade, a cor azul significa que a seção está pouco solicitada e a cor vermelha indica um alto grau de solicitação (razão superior a 1). As setas nas figuras apresentam as seções mais solicitadas.

Figura 14 – Razão entre os esforços solicitantes e esforços resistentes nos elementos da passarela e da rampa



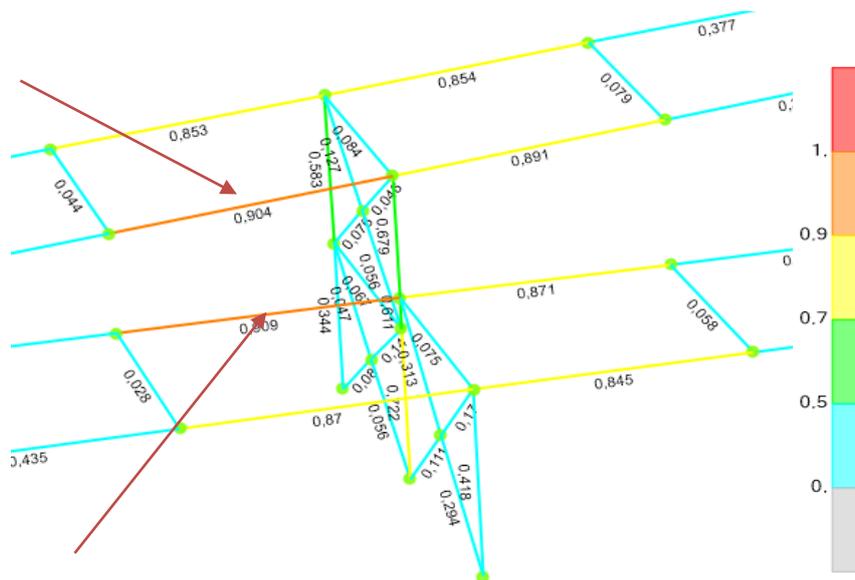
Fonte: SAP2000 (2019)

Figura 15 – Razão entre os esforços solicitantes e esforços resistentes nos elementos da passarela



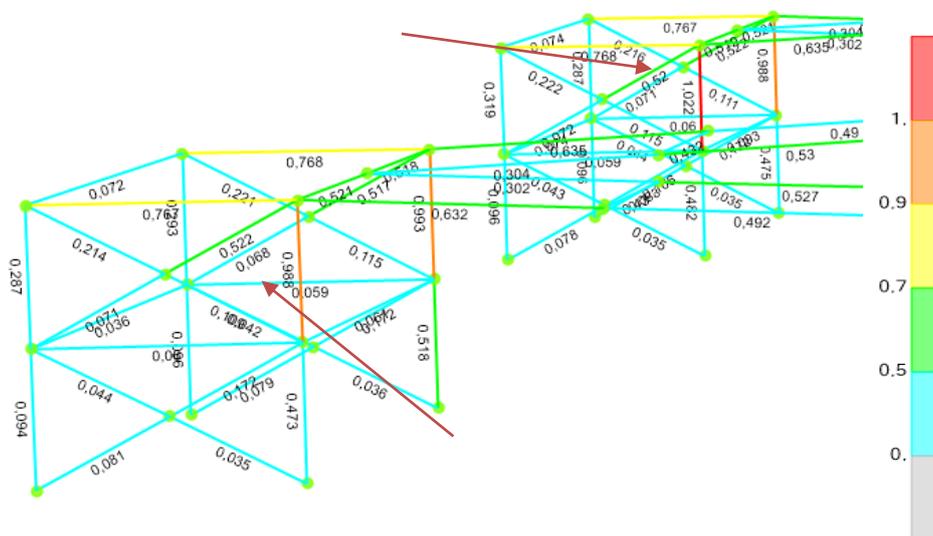
Fonte: SAP2000 (2019)

Figura 16 - Razão entre os esforços solicitantes e esforços resistentes nos elementos da rampa (detalhe da região da conexão da viga da rampa com o pilar da rampa)



Fonte: SAP2000 (2019)

Figura 17 - Razão entre os esforços solicitantes e esforços resistentes nos elementos dos pilares (detalhe ampliado)



Fonte: SAP2000 (2019)

6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS DUAS PASSARELAS

Para efeito dessa análise comparativa, inicialmente serão apresentadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de perfil, conforme as Tabelas 7 e 8 respectivamente, e posteriormente será realizada uma comparação em termos de peso, preço e montagem (com foco na execução das ligações).

Tabela 7 – Vantagens dos perfis tubulares e dos perfis I e H

Vantagens dos perfis tubulares	Vantagens dos perfis I e H
Excelente resistência à compressão.	Maior flexibilidade na escolha do formato e dimensões mais adequados.
Ótima aparência e excelente acabamento.	Os perfis são mais baratos quando comparado aos tubulares.
As seções com tubos redondos são mais resistentes à torção, pois devida à sua geometria, o seu material é distribuído uniformemente em torno do eixo.	Caso haja corrosão interna é fácil localizar, pois a seção é aberta.
Os perfis tubulares sem costura apresentam maior resistência à corrosão, uma vez que não apresentam frestas nem arestas.	As soldagens entre as seções são mais simples de serem executadas.
Os perfis tubulares apresentam uma maior facilidade de manutenção, já que não possuem cantos e arestas que permitem o acúmulo de sujeira e poeira.	Possui grande eficiência estrutural.
Os perfis tubulares também apresentam menor área de pintura quando comparados com os perfis abertos, reduzindo o custo necessário para a execução da proteção contra a corrosão.	Perfil facilmente encontrado no mercado.
Grande capacidade de carga quando solicitado axialmente por ações de compressão.	-
Perfis tubulares de aço apresentam uma boa característica de vencer grandes vãos.	-

Fonte: Autores

Tabela 8 – Desvantagens dos perfis tubulares e dos perfis I e H

Desvantagens dos perfis tubulares	Desvantagens dos perfis I e H
Necessita de mão de obra altamente qualificada para realizar as soldagens.	Ocorrência da flambagem local, que reduz a resistência das peças.
Caso haja corrosão interna é difícil localizar, pois a seção é fechada.	Necessita de mão de obra qualificada para realizar as soldagens.
Os perfis são mais caros.	A seção é aberta facilitando a corrosão da estrutura.
As ligações entre as seções de diâmetros diferentes são mais complexas.	-
Não é de fácil comercialização no mercado (não existe uma vasta gama de perfis tubulares, como é o caso dos perfis laminados).	-
Há carência em pesquisas que forneçam ferramentas capaz de prever o comportamento das ligações destes elementos estruturais.	-

Fonte: Autores

6.1 Comparação de peso das duas soluções de passarela

A Tabela 9 mostra a comparação entre os pesos das seções utilizadas nas duas passarelas. Logo, é possível observar que a passarela com perfis tubulares resultou um peso ligeiramente superior (1,6% a mais) ao peso obtido na passarela com perfis laminados.

Tabela 9 – Comparação entre os pesos das seções das duas passarelas

Perfil I e H		Perfil tubular redondo	
Seção	Peso (kN)	Seção	Peso (kN)
W 150 X 13	86,07	TR 101,6 X 4,0	75,67
W 150 X 29,8	26,56	TR 141,3 X 8,0	15,25
W 310 X 21	12,50	TR 141,3 X 8,8	5,82
W 310 X 52	14,67	TR 273,0 X 7,1	28,11
W 360 X 32,9	24,93	TR 355,6 X 8,0	322,07
W 360 X 64	275,29	-	-
Peso total	440,02	Peso total	446,91

Fonte: SAP2000

6.2 Comparação de preços dos perfis

Os perfis I e H (série W da Gerdau Açominas) são facilmente encontrados no mercado, pois os mesmos têm uma grande demanda de vendas, com diversas espessuras e tamanhos, portanto seus preços foram fáceis de serem obtidos. Em contrapartida, os perfis tubulares estruturais são mais difíceis de serem encontrados comercialmente. Foram realizados vários contatos com as empresas e fabricantes de perfis tubulares, contudo, os mesmos responderam que para fazer o orçamento de um tipo de peça deste tamanho e com ASTM 572 de grau 50 é muito difícil, pois as mesmas são compradas por encomendas e é necessária a apresentação do projeto para fazer o orçamento. Logo não foi possível concluir a comparação em termos de preço, mas em geral, sabe-se que os preços dos perfis tubulares são superiores aos dos perfis laminados, gerando solução mais caras.

6.3 Tipos de conectores e de ligações

Segundo a ABNT, NBR 8800 (2008), “As ligações metálicas consistem em elementos de ligação, como enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras e consolos, e meios de ligação, como soldas, parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos”. Para Pfeil (2009), “conectar é um meio de união que trabalha através de furos feitos nas chapas. Em estruturas usuais, encontram-se os seguintes tipos de conectores: rebites, parafusos comuns e parafusos de alta resistência. Em estruturas fabricadas a partir de 1950, as ligações rebitadas foram substituídas por ligações parafusadas ou soldadas”.

6.3.1 Parafusos de alta resistência

Os parafusos de alta resistência são feitos com aços tratados termicamente. O tipo mais usual é o ASTM A325 de aço-carbono temperado com resistência à ruptura $f_u = 725$ a 825 MPa e limite de escoamento $f_y = 635$ a 560 MPa. Eles podem ser instalados com esforços de tração mínimos

garantidos. Embora os parafusos de alta resistência trabalhem através do esforço de protensão que aplicam nas chapas, o dimensionamento dos mesmos se faz no estado limite último, utilizando tensões nominais de corte ou de apoio. Além disso, nas ligações em que um possível deslizamento for prejudicial, como, por exemplo, nos casos de cargas reversíveis com ou sem fadiga, deve-se verificar a resistência ao deslizamento para cargas em serviço, ou para combinações em estado limite último, dependendo do tipo de furo adotado.

6.3.2 Ligações com solda

A solda é um tipo de união por coalescência do material, obtida por fusão das partes adjacentes. A energia necessária para provocar a fusão pode ser de origem elétrica, química, óptica ou mecânica. Para os aços estruturais é comum usar o eletrodo revestido, geralmente, é um processo manual, porém, pode-se admitir o processo mecânico.

6.3.3 Soldabilidade de Aços Estruturais

A soldabilidade dos aços reflete a maior ou menor facilidade de se obter uma solda resistente e sem fraturas. Para os aços de baixa liga (A242, A441, A572) recomendam-se eletrodos do tipo baixo hidrogênio.

As ligações nas estruturas com perfis tubulares, seja utilizando-se parafusos ou soldas, é muito mais difícil de serem executadas e mais caras que a ligações nas estruturas com perfis laminados tipo W. A ligação nas estruturas tubulares é o maior desafio neste tipo de perfil. A otimização da concepção e dimensionamento da mesma é objeto de várias pesquisas (Barros, 2014), e constitui o ponto chave para solucionar problemas de fabricação, montagem e até mesmo, na redução do custo deste tipo de estrutura.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do projeto da passarela demandou grande revisão bibliográfica e trabalho de campo, incluindo visitas a várias passarelas que foram fotografadas, medidas e catalogadas. Durante a execução, foi necessária a obtenção de uma vasta gama de conhecimento nas comparações dos tipos de perfis, como capacidades de cargas, vantagens, desvantagens e suas complexidades no que tange às ligações metálicas, quando se muda o tipo de estrutura.

Ao dimensionar a passarela, toda a estrutura foi imposta a capacidade máxima de resistência dos perfis, considerando as piores situações das combinações atuantes, com a intenção de se trabalhar com perfis mais esbeltos e com segurança. Assim, buscou-se seções mais leves e com grande capacidade estrutural, na comparação entre os tipos de perfis utilizados nos dois modelos de passarela (com perfis laminados abertos e tubulares).

A análise comparativa realizada entre os perfis I, H e TR, durante o desenvolvimento do presente trabalho, apresentou diversas vantagens dos perfis de aço laminados I e H em relação aos perfis tubulares redondos, sendo possível observar que a solução com perfis laminados I e H ficaram 1,6% mais leve que a solução com os perfis tubulares. Outro fator importante a destacar é a facilidade de manutenção, pois se tratam de perfis abertos, portanto um eventual problema de corrosão, é mais fácil de ser identificado e tratado. Os perfis tubulares, apesar de sofrerem menos problemas de corrosão pois não acumulam água, por serem perfis fechados, um eventual ponto de corrosão é difícil de ser identificado. Os perfis laminados apresentam também maior flexibilidade na hora da escolha da seção, visto que nas pesquisas realizadas não foi difícil encontrar esse material no mercado, com comprimento e espessura diversas. Além disso, a complexidade das ligações dos perfis tubulares, é um fator que aumenta o tempo de realização do projeto e obra.

A utilização de estruturas de aço tubulares está crescendo no Brasil, devido à suas propriedades geométricas favoráveis para resistência e rigidez à flexão e torção, quando comparada com perfis laminados abertos e seções soldadas abertas. Além disso, os perfis tubulares apresentam vantagens do ponto de vista estético e arquitetônico, além de maior durabilidade e menor necessidade de manutenção devido à corrosão. Apesar do crescimento e disseminação do uso de estruturas tubulares no Brasil, ainda há uma carência em pesquisas que forneçam ferramentas capazes de prever o comportamento destes elementos estruturais. Soma-se a esta escassez, a complexidade envolvida na análise estrutural, principalmente em relação às ligações, o que contribui para a sub-exploração desta modalidade de estruturas.

Em 2012, foi criada a nova norma brasileira da ABNT para embasar o dimensionamento de estruturas tubulares (NBR16239:2012-Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares), mas somente algumas ligações foram descritas. A concepção das ligações é um aspecto importante do comportamento estrutural dos membros e do desempenho global da estrutura. Com os avanços das pesquisas nessa área, a tendência é que as passarelas com estruturas tubulares se tornem soluções mais atrativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5884: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico — Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9050: Acessibilidade de pessoas portadoras de deficiências a edificações, espaço, mobiliário e equipamentos urbanos.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15980: Perfis laminados de aço para uso estrutural - Dimensões e tolerâncias** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 16239 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares.** Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL, DNIT. **Manual de projeto geométrico de travessias urbanas.** *Rio de Janeiro: DNIT–Instituto de Pesquisas Rodoviárias*, 2010.

Perfil tubular. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/biblioteca-detalhes.php?cod=101074>. Acesso em: 05 jun. 2019.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de Aço - Dimensionamento Prático de Acordo com a ABNT NBR 8800: 2008.** *Editora LTC, 8ª. Edição, Rio de Janeiro* (2009).

SANTOS, G.B. **Análise Experimental de Ligação Viga-Coluna em Perfis Tubulares em Aço.** Dissertação de mestrado, COPPE, UFRJ. *Rio de Janeiro* (2014).

SAP2000 (versão 21 de avaliação) - Programa de elementos finitos para modelação, análise e dimensionamento de qualquer tipo de estrutura. Computers and Structures, Inc., CSI, *Portugal* (2019).