

ANÁLISE DE PASSARELA MODULAR TRELIÇADA PADRONIZADA EM AÇO QUE ATENDA DIFERENTES VÃOS

*ANALYSIS OF STANDARD MODULAR TRUSS FOOTBRIDGE ON STEEL FOR
DIFFERENTS SPANS*

Douglas Nicolao Salton

Eng. Civil, Univates
dnsalton@universo.univates.br

Rebeca Jéssica Schmitz

Ma. Eng. Civil, Univates
rebeca.j.schmitz@gmail.com

RESUMO

A construção em aço possibilita uma obra mais industrializada em que se tem a montagem da estrutura com apenas as fundações sendo moldadas in loco. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um projeto padronizado de uma passarela metálica treliçada, sendo feita análise para três diferentes vãos, 10, 20 e 30 metros, este último foi baseado em vias expressas de classe I com canteiros centrais em regiões planas. Para a elaboração do projeto, teve-se como base as normas NBR 8800 (ANBT, 2008) e NBR 7188 (ABNT, 2013), sendo utilizado dois *softwares*: Ftool e ANSYS. No Ftool foi modelada apenas a treliça de 30 metros considerando a combinação entre os carregamentos permanentes e variável de uso, com o objetivo de obter as forças axiais para definir os perfis que seriam utilizados nos banzos, montantes e diagonais. Após feito o dimensionamento, foi desenvolvido no ANSYS um modelo mais refinado, no qual se analisou os três diferentes vãos considerando além das cargas verticais (permanente e uso), cargas de vento e excepcional. Ao final, verificou-se que para o maior vão se teve um dimensionamento otimizado e como era de se esperar, para os demais vãos os perfis atenderam com folga.

Palavras-chave: Passarela Treliçada. Estrutura Padronizada. Passarela Modular. Treliças.

ABSTRACT

The steel construction permits more industrialization and on the construction site occurs the assembly of the structure and only the foundations are built in loco. In this context, the goal of the present work is developed a standard project of a steel truss footbridge, considering three different spans, 10, 20 and 30 meters, this last was based on highways class I with central garden in plan regions. To elaborate the project, it was mainly used the standards NBR 8800 (ANBT, 2008) and NBR 7188 (ABNT, 2013), being used two softwares: Ftool and ANSYS. In Ftool, it was modeled only the truss with 30 m considering the combination of the permanent loads and live loads related to use. The objective was obtaining the axial forces to define the profiles used in cords, posts and webs. After that, it was developed in ANSYS a more refined model used to analyze three different spans with beyond the vertical load (death and use), wind and exceptional loads. After all, it was verified that the design for the bigger span was optimized, and how was expected, for the others spans, the profiles easily attend.

Keywords: Truss Footbridge. Standard Structure. Modular Footbridge. Truss.

1. INTRODUÇÃO

Passarelas são estruturas que estão presentes no cenário da sociedade desde a antiguidade, facilitam o deslocamento de pessoas. Além disso, também trazem segurança para pedestres que precisam passar sobre obstáculos como grandes rodovias e até fazer a ligações de uma edificação para outra.

Conforme destacado por Tonin (2014), atualmente, os materiais mais comumente empregados em passarelas são concreto armado, aço e madeira. Em se tratando das estruturas em aço, verifica-se que requerem mão de obra especializada, o que pode acarretar em aumento de custo na estrutura. Entretanto se essa estrutura já estiver projetada e com peças prontas antes mesmo da obra iniciar, o empreendedor conseguirá diminuir o tempo de entrega e até mesmo fazer passarelas em série, o que diminuiria o custo, tanto de material, quanto de mão de obra.

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho é analisar um projeto padrão de uma passarela treliçada feita em aço estrutural, adotando-se um projeto modular que atenda diversos vãos, sendo o vão máximo 30 metros.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

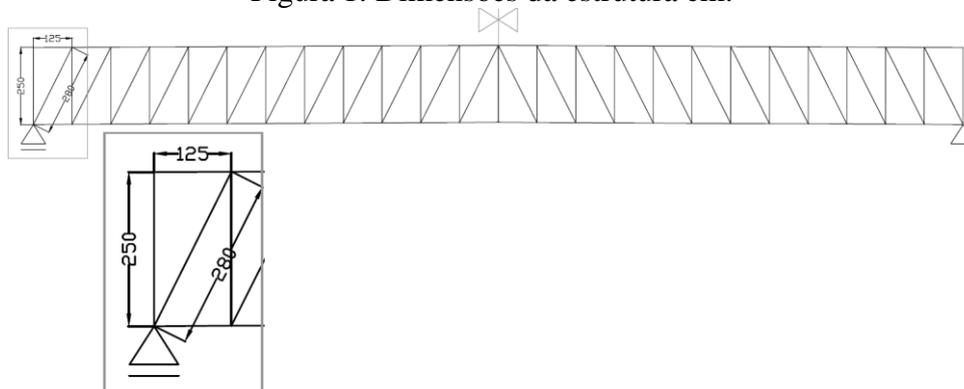
Para a concepção da passarela foi escolhido a treliça plana Howe sendo adotada uma medida modular de 2,5 m, que está relacionada com a distância entre nós e é a altura da treliça, concordando com o manual de projeto geométrico de travessias urbanas do DNIT (2010). Considerando o módulo adotado, é possível a construção de vãos diversos para a passarela, sendo eles múltiplos do módulo. O vão máximo é 30 metros, sendo este o limitador do dimensionamento, mas, além dele também foram analisados os vãos de 10 m e 20 m. Em relação à largura, definiu-se também igual a 2,5 m, obedecendo a NBR 9050 (ABNT, 2015), que indica que a largura mínima de uma passarela é 2 m. A concepção da estrutura, assim como as principais medidas estão apresentadas na Figura 1.

Para a cobertura foi escolhida telha trapezoidal galvanizada com 1,00 m de largura, 8,00 m de comprimento e 20 mm de espessura. Para o piso da passarela, foram adotadas duas medidas de chapa galvanizada xadrez ambas com espessura de 4,75 mm: 1x1 m e 1,5x1,5 m.

Os perfis escolhidos para os banzos superiores e inferiores foram perfis I laminados da série W. Já para diagonais e montantes, foram adotados perfis U laminados. A escolha por estes perfis se deu pela recorrência que aparecem em projetos deste tipo, facilidade de encaixe de perfis U nos perfis I, facilitando as conexões, além de serem perfis robustos capazes de

resistir ao nível de esforços esperados para uma passarela. Para ambos tipos de perfil será adotado o aço ASTM A 572 grau 50, com resistência ao escoamento de 345 MPa.

Figura 1: Dimensões da estrutura cm.



Fonte: Autores, 2020.

Pela falta de formulações empíricas para definição prévia dos perfis, fez-se uma estimativa com relação ao peso da estrutura. Os autores consideraram que o peso da estrutura representa 40% da carga móvel, ou seja 2 kN/m^2 sendo este um parâmetro empírico. Esse parâmetro empírico foi escolhido com base na experiência dos autores do presente artigo. Ao final do dimensionamento isto foi verificado.

As cargas consideradas sobre a passarela foram: permanentes, variável de uso (tráfego de pessoas), variável de sobrecarga na cobertura, variável de vento e excepcional. A carga permanente corresponde ao peso próprio da estrutura (2 kN/m^2), peso da cobertura ($0,107 \text{ kN/m}^2$) e peso do piso ($0,38 \text{ kN/m}^2$), sendo que o peso dos elementos não estruturais foi obtido segundo especificações de fabricantes.

O carregamento de uso foi definido conforme a NBR 7188 (ABNT, 2013) sendo igual a carga uniforme distribuída de 5 kN/m^2 e aplicada sobre o pavimento na região entre os guarda-corpos. Em se tratando da sobrecarga na cobertura, foi considerado $0,25 \text{ kN/m}^2$ conforme indica a NBR 8800 (ABNT, 2008).

Já a carga variável de vento foi calculada conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988), sendo a velocidade característica do vento o primeiro parâmetro necessário. Conforme a norma, a velocidade básica do vento pode ser determinada a partir das isopletras, neste trabalho, adotou-se o valor de 45 m/s que compreende boa parte do Rio Grande do Sul, além de ser um dos valores mais altos observados no Brasil. Desta forma, o projeto estaria atendendo quase a totalidade do país.

Para o fator S_1 , considerou-se condição de terreno plano, o que corresponde ao valor 1. Em relação ao fator de rugosidade (S_2) obteve-se o valor de 0,83 que corresponde a um

terreno de categoria III (obstáculos com altura média de 3 metros) e classe de edificação B (dimensão máxima menor que 50 metros). Por fim, para o fator estatístico (S3) adotou-se o valor de 1,1 pois se deseja maior nível de segurança para a estrutura.

Obteve-se, o valor da velocidade característica do vento igual a 41,09 m/s e a pressão dinâmica do vento igual a 1034,37 N/m², com esses valores definidos é possível determinar a força de arrasto na estrutura. Para o presente trabalho, a determinação da força de arrasto foi feita apenas para direção do vento que incide perpendicular ao vão da passarela, considerando que esta será a condição mais desfavorável. Para a determinação da força de arrasto, a NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta a Equação 1.

$$F = C \cdot K \cdot q \cdot L \cdot c. \quad (1)$$

Sendo:

F = força do vento (N);

C = coeficientes de força dado pela tabela 12 da NBR 6123 (ABNT, 1988) (adimensional);

q = pressão dinâmica do vento ponderada (N/m²);

k = fator de redução dado pela tabela 11 da NBR 6123 (ABNT, 1988) (adimensional);

l = comprimento da barra prismática (m);

c = largura da barra prismática (m).

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados das forças de arrasto para cada elemento, sendo que para o comprimento de montantes e diagonais é 2,5 m e 2,8 m, respectivamente, já para os banzos foram utilizados os três diferentes vão de 10, 20 e 30 m.

Tabela 1: Força do vento sobre as barras da treliça.

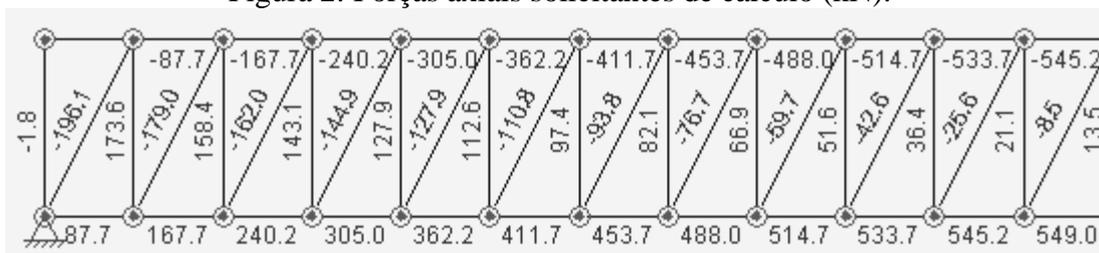
Perfil	L (m)	c (m)	L/d	k	C	Força (kN)	Força de arrasto (kN/m)
I - Banzo	30	0,305	98,36	0,95	2,05	18,43	0,61
I - Banzo	20	0,305	65,57	0,92	2,05	11,90	0,60
I - Banzo	10	0,305	32,79	0,85	2,05	5,50	0,55
U - Montante	2,5	0,254	9,84	0,69	2,5	1,13	0,45
U - Diagonal	2,8	0,254	11,02	0,70	2,5	1,29	0,46

Fonte: Autores, 2020.

Por fim, o carregamento excepcional, está relacionado ao choque devido ao tráfego de veículos transversal à passarela, sendo que a NBR 7188 (ABNT, 2013) recomenda considerar uma carga de 100 kN no ponto mais desfavorável da estrutura, e neste caso, será considerado o centro do vão.

Na etapa seguinte foi desenvolvido um modelo simplificado no *software* Ftool apenas para o maior vão, 30 metros, a fim de analisar a situação mais crítica primeiro e dimensionar os perfis a partir dela. Após a modelagem da estrutura, foram lançadas as cargas geradas pela combinação Estado Limite Último (ELU) normal: permanente, variável de uso e variável de sobrecarga na cobertura. Na Figura 2 pode-se observar os esforços axiais, estes estão apresentados apenas para metade da estrutura devido à simetria e para facilitar a visualização. Vale destacar que os valores positivos referem-se à tração e os negativos, à compressão.

Figura 2: Forças axiais solicitantes de cálculo (kN).



Fonte: Autores, 2020.

A partir dos esforços foi feito dimensionamento dos perfis escolhidos em tração e/ou compressão com base na NBR 8800 (ABNT, 2008). Um resumo dessas verificações está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Resumo da verificação dos perfis.

Tipo de barra	Perfil	Compressão			Tração		
		Solicitação máxima. (kN)	Resistência (kN)	Solicitação/ Resistência (%)	Solicitação máxima. (kN)	Resistência (kN)	Solicitação/ Resistência (%)
Banzo	W310X21,0	-545,20	553,00	98,6	549,00	853,09	64,4
Montante	U10x29,8	-1,80	234,86	0,8	173,60	1188,68	14,6
Diagonal	U10x29,8	-196,10	234,86	83,5	-	-	-

Fonte: Autores, 2020.

Em relação à compressão, o máximo esforço solicitante observa-se na barra mais central do banzo superior, sendo este o limitador do dimensionamento, conforme apresentado a relação entre solicitação e resistência indica o máximo aproveitamento da seção. Verificando os elementos de montante e diagonal tem-se esforços mais expressivos nas diagonais junto aos apoios, sendo esta, a condição que limitou o dimensionamento.

Em relação à verificação à tração foi considerada somente a resistência ao escoamento da seção bruta. Verifica-se o maior esforço nas barras do banzo inferior junto ao centro do vão, entretanto ainda se tem boa margem de resistência. Com relação aos montantes tem-se maiores esforço próximo aos apoios, apesar de se ter boa margem comparada a resistência. As diagonais não possuem solicitação de tração. Cabe salientar, que a escolha por apenas dois tipos de perfis

vai de encontro com a filosofia do projeto de estruturas em aço, pois facilita a produção, compra e também a montagem.

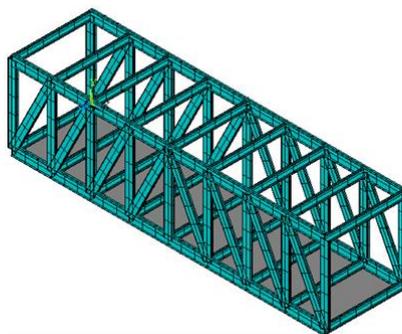
A análise da estrutura metálica dimensionada foi feita no *software* ANSYS e baseou-se no modelo já desenvolvido por Graebin (2018), sendo que utilizou-se *scripts* que facilitaram as análises visto a repetição para os três vãos. Iniciou-se com definições do modelo, como escolha do elemento finito, os parâmetros do material (aço) e as características das seções transversais. Feito isso, foi lançada a geometria da estrutura para em seguida gerar a malha de elementos finitos. Após isso, foram adicionados os vínculos e as cargas isoladamente. As combinações de cargas foram feitas diretamente na fase de pós processamento do *software*.

Para a modelagem da estrutura, foi utilizado o elemento finito *beam188*, ele é adequado para analisar estruturas de vigas esbeltas e robustas pois é baseado na teoria do vigas de Timoshenko, que inclui efeitos de deformação por cisalhamento (ANSYS INCORPORATION, 2012). Cabe salientar que as barras de treliça poderiam ser modeladas com elemento mais simples, podendo até se utilizar elemento apenas com rigidez axial, o que iria de encontro com o modelo feito no Ftool. Entretanto, a intenção foi desenvolver um modelo mais sofisticados utilizando elementos de vigas para que possíveis momentos fletores fossem captados, já que os nós não serão verdadeiramente rotulados.

O único material modelado foi o aço sendo, simplificarmente, considerado um comportamento elástico linear e que apresenta os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade 2×10^8 kN/m², massa específica de 7850 kg/m³ e coeficiente de Poisson igual a 0,3 (ABNT, 2008).

Após as definições de elemento, seção transversal e materiais foi feito o lançamento de *keypoints* e posteriormente as linhas finalizando o modelo físico. A etapa seguinte foi de criação da malha em que se geram nós e elementos que correspondem ao modelo numérico de elementos finitos. Adotou-se como parâmetro de malha, dimensão máxima de 0,5 m baseado no modelo de Grabin (2018). A Figura 3 mostra a malha para o vão de 10 m estando ativada a opção *size and shape* que apresenta a seção transversal do elemento, ou seja, apesar da representação parecer de um elemento tridimensional, na verdade, o elemento é de barra (unidimensional) e tem-se o desenho da seção transversal. Vale salientar que a hachura na região do piso foi feita unicamente para facilitar a visualização.

Figura 3: Aspecto do modelo de passarela (vão 10 m).



Fonte: Autores, 2020.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A primeira verificação feita a partir do modelo do ANSYS foi em relação ao peso da estrutura para que se comparasse com a carga estimada inicialmente de 2 kN/m² sendo que a Tabela 3 apresenta um resumo dos valores. Pode-se observar que a diferença foi muito pequena, sendo assim, a estimativa feita é coerente quando feito o dimensionamento de treliças planas com o uso de perfis laminados. Verifica-se também que quanto menor o vão mais próxima fica a estimativa do valor real.

Tabela 3: Verificação do peso das estruturas.

Vão (m)	Peso estimado	Peso informado pelo ANSYS	Diferença (%)
10	49,25	50	1,5
20	95,54	100	4,46
30	141,84	150	5,44

Fonte: Autores, 2020.

Analisando de fato o dimensionamento, foram feitos dois tipos de análise, ELU em que se verificou o nível de tensão e deformação no aço e ELS em que se verificou os deslocamentos das estruturas. A Tabela 4 apresenta as combinações e os ponderadores considerados.

Tabela 4: Combinação de cargas.

Tipo	Combinação	Peso próprio	Carga permanente	Variável de uso	Variável de sobrecarga na cobertura	Variável de vento	Excepcional
ELU normal	1	1.25	1.35	1.5	1.5x0.5	1.4x0.6	0
	2	1.25	1.35	1.5x0.6	1.5	1.4x0.6	0
	3	1.25	1.35	1.5x0.6	1.5x0.5	1.4	0
ELU excepcional	4	1.25	1.35	0.6	0.5	0.6	1
ELS quase permanente	5	1	1	0.3	0.3	0	0

Fonte: Autores, 2020.

Avaliando os resultados em ELU, considerou-se o limite de tensão igual a 345 MPa, referente a tensão de escoamento, e deformação máxima aceitável de 18‰ (0,018mm/mm)

baseado na tensão e na indicação de alongamento máximo verificado neste tipo de aço. Na Tabela 5 estão apresentados os valores máximos de tensão e deformação verificados em cada combinação. A saber, a tensão extraída é a tensão axial pois as demais tensões são nulas, que é o comportamento esperado para barras que compõem uma treliça. Da mesma forma, as deformações indicadas são axiais.

Tabela 5: Tensões e deformações em ELU.

Vão (m)	Combinação	Tensão (MPa)	Deformação
10	1	77,4	0,0004
	2	46,2	0,0002
	3	63,8	0,0003
	4	43,0	0,0002
20	1	127,9	0,0006
	2	107,7	0,0006
	3	125,0	0,0006
	4	155,0	0,0008
30	1	208,9	0,0010
	2	177,7	0,0090
	3	190,0	0,0010
	4	250,0	0,0020

Fonte: Autores, 2020.

Uma questão importante é que o modelo estava indicando concentração de tensões na ligação entre os elementos dos banzos e os elementos transversais de travamento, acredita-se que seja um erro numérico nas conexões devido à variação de seção dos elementos. Nessas regiões os nós são coincidentes como se a conexão fosse totalmente rígida. Este item não foi investigado mais a fundo pois não era interesse deste trabalho a análise das ligações. Por este motivo, em alguns casos teve-se certa dificuldade de extrair os valores de tensão e deformação, já que essas regiões deveriam ser desconsideradas.

Vale comentar que esta dificuldade não foi indicada por Graebin (2018), entretanto, neste trabalho, o autor optou por elementos transversais de seção igual a dos banzos. A opção por seções diferentes no presente trabalho se deu considerando que os elementos transversais receberiam menor carga e também se teve a intenção de facilitar a montagem, possibilitando que um perfil se encaixe em outro sem a necessidade de chapas extras ou recortes na ligação.

Em se tratando dos resultados apresentados, verifica-se que a condição mais crítica para passarela de 10 m de vão é diferente das demais, sendo para esta a combinação em que se tem a carga móvel como principal. Para os outros dois vãos, a combinação relativa à carga excepcional foi a mais crítica, sendo que nesta condição aplicou-se uma carga pontual no nó do centro do vão no banzo inferior com valor de 100 kN. A questão do erro devido à concentração de tensões se manifestou ainda mais neste caso, devido à forma de aplicação da carga.

Entende-se que quando se tem um nó com carga elevada e os nós adjacentes com carga nula, existe um desequilíbrio muito grande que reflete em dificuldades no processo iterativo de equilibrar forças internas e externas, o que, normalmente remete a um erro numérico nesta região.

Avaliando os valores de tensão, mesmo aplicando um coeficiente de 1,10 sobre o limite de escoamento, o que representa um valor máximo da ordem de 314 MPa, verifica-se que todos os valores estão abaixo. Isto demonstra que o dimensionamento respeita condições de ELU. Por outro lado, para o maior vão, chegou-se próximo ao limite, sendo atingido 80% da tensão, o que demonstra que a estrutura não está superdimensionada. Verificando os valores de deformação, o limite também é respeitado, e, como era de se esperar, respeita a Lei de Hooke.

Por fim, verificou-se os deslocamentos verticais das estruturas para a condição de ELS quase permanente, sendo adotado como deslocamento vertical limite aceitável, a medida do vão dividida por 250. A Tabela 6 apresenta um resumo dos dados obtidos. Verifica-se que todos os casos atendem a condição limite, sendo que o caso mais crítico foi para a estrutura com 30 m de vão, em que a região central teve um deslocamento de 0,017m, entretanto, ainda se tem boa margem em relação ao valor limite aceitável.

Tabela 6: Deslocamentos máximos em ELS.

Vão (m)	Deslocamento (m)	Deslocamento limite (m)
10	0,001	0,040
20	0,050	0,080
30	0,017	0,120

Fonte: Autores, 2020.

4. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver o projeto para passarela treliçada em aço estrutural que fosse modular, podendo atender diversos vãos, e sendo o vão máximo 30 m. O intuito do trabalho foi de propor um projeto padronizado a fim de diminuir custos de projeto e produção, já que, em se tratando de estruturas metálicas, a repetição de estruturas com a padronização pode levar a condições economicamente viáveis.

Antes de apresentar dados referentes ao projeto finalizado, vale destacar um resultado intermediário obtido relativo à análise de peso da estrutura. Considerando as passarelas treliçadas em que se faz uso de perfis laminados, ao invés de pré-dimensionar a estrutura escolhendo perfis, pode-se estimar o peso da estrutura e posteriormente com os dados dos esforços solicitantes definir os perfis com mais embasamento. Verificou-se neste trabalho que considerar que o peso da estrutura representa 40% da carga móvel, o que corresponde a 2 kN/m², é uma boa estimativa, obteve-se diferença entre 1,50% e 5,44% em relação aos pesos reais nas passarelas estudadas.

O dimensionamento indicou para banzos superiores e inferiores perfis I W310X21,0, já para montantes e diagonais, o perfil do tipo U10x29,8. Através das análises feitas com ANSYS percebe-se que para vãos menores, como o de 10 m, os perfis utilizados ficam superdimensionados, sendo que na pior condição teve-se tensões no aço da ordem de 25% do limite de escoamento já considerando fator de segurança (314 MPa). O superdimensionamento para o menor vão analisado já era esperado, com este estudo pode-se conhecer a ordem de grandeza disto.

Para o vão intermediário, 20 m, o aço está sendo um pouco mais aproveitado, e para a condição mais desfavorável atinge-se 50% da tensão aceitável. Por fim, para o vão de 30 m, esta relação sobe para 80%. Com isso, conclui-se que para vãos entre 20 m e 30 m o projeto seria adequado, podendo compor vãos com variação de 1,25m, que é a distância entre nós dos banzos. Já em se tratando de vãos entre 10 m e 20 m se torna mais importante uma análise econômica para validar o projeto como viável.

REFERÊNCIAS

ANSYS INCORPORATION. ANSYS, version 14.5. Canonsburg (USA), 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

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

_____. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 9050**: Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço**: Projeto e cálculo. 5º Ed. São Paulo: Pini, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT).
Manual de projetos geométricos de travessias urbanas. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

GRAEBIN, L. **Dimensionamento de uma passarela em estrutura metálica na cidade de Novo Hamburgo/RS.** 2018. 92 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado, 2018. Disponível em < <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/2250/1/2018LaertiGraebin.pdf>>. Acessado em: 15 mar. 2019.

TONIN, M.G. **Passarelas Metálicas: comparação entre estruturas de perfis abertos e fechados/RS.** 2014. 270 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/107490/000943157.pdf?sequence=1>>. Acessado em: 15 mar. 2019.