

**Ana Carolina Teixeira da Silva**

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Norte Shopping)

**Miguel Henrique de Oliveira Costa**

Universidade Estácio de Sá (UNESA/Norte Shopping)

## RESUMO

O Brasil foi apontado, no ano de 2018, pela Organização Mundial da Saúde, como o 3º país com maior número de acidentes de trânsito; entre 2017 e 2020 a Polícia Rodoviária Federal concluiu que 73% dos atropelamentos ocorridos no Brasil resultaram em dano à pessoa. No Rio de Janeiro, os atropelamentos se destacam como causador de 35% das mortes ocorridas no trânsito. Visando atenuar esta adversidade, este trabalho propõe a análise de uma passarela de pedestres sobre a Avenida Presidente Vargas como uma estratégia de proteção aos transeuntes, especialmente por conta de sua proximidade com a Escola Municipal Tia Ciata, onde jovens cursam o Ensino Fundamental, com o Sambódromo e Terreirão do Samba, onde os cariocas e turistas costumam frequentar para assistir ao Desfile das Escolas de Samba e a Shows. Para tanto apresentou-se uma análise da viabilidade de projeto, a modelagem em Elementos Finitos e dimensionamento analítico da superestrutura da passarela em perfis laminados de abas planas, bem como nas verificações da resistência das peças no Estado Limite Último e no Estado Limite de Serviço quanto ao deslocamento vertical máximo. A modelagem foi desenvolvida no software de Elementos Finitos ANSYS®, versão estudante 2020 R2, obtendo como resultado os diagramas dos esforços internos que possibilitaram realizar as verificações dos elementos, cuja maior porcentagem de utilização do perfil relativo aos momentos fletores e esforços axiais ocorreu em uma das diagonais, no valor de 72%. Com isso, a análise de viabilidade técnica de mostrou satisfatória e a estrutura logrou êxito não só nas verificações relativas ao ELU como também no ELS.

**Palavras-chave:** Passarela; Estruturas de aço; Elementos Finitos.

## INTRODUÇÃO

Passarela pode ser definida como estrutura longilínea que visa transpor obstáculos, naturais ou não, tendo como usuários pedestres e/ou ciclistas, conforme expõe a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na Norma Brasileira (NBR) 7188:2008. Passarelas costumam ser apresentadas na literatura técnica como um subtipo de pontes, nesta linha define FIALHO (2004) que passarelas são pontes com características especiais, tendo uma definição mais detalhada atribuída por LEBET e HIRT (2013), que concedem às passarelas o *status* de pontes para pedestres, cuja diferença se dá ao menor peso próprio e às menores cargas atuantes na superestrutura.

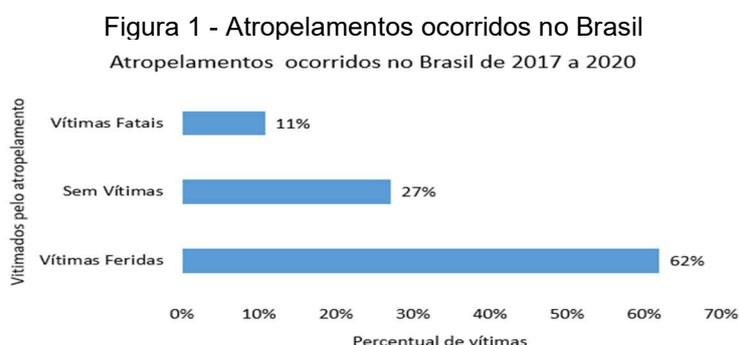
Os tipos de pontes variam em ao sabor da função que devem atender, do material de que são compostas, da disposição estrutural que detêm e quanto ao tempo de vida

(REIS e PEDRO, 2019). Devido a ausência de registros históricos, não há como precisar quando a primeira ponte do mundo foi construída (STANDERSKI, 2012), mas sabe-se que a passarela de pedestres mais antiga que se tem conhecimento foi construída na China, em 65 d.C., e se utilizava se um sistema de suspensão por correntes. Entretanto, tal tecnologia tinha o ônus do peso das correntes, que aumentavam o peso próprio da estrutura, limitando sua extensão (LEBET e HIRT, 2013).

Em 1779 a primeira ponte em ferro fundido foi construída em Coalbrookdale, na Inglaterra, tal estrutura é tida como um marco metalúrgico por ser a primeira obra de arte, em arco, construída com este material (PFEIL e PFEIL, 2009). No Brasil, conforme notícia a Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM), a Ponte Paraíba do Sul, em São Fidélis, Rio de Janeiro, é tida como a primeira ponte construída em aço no país, feita pelo Barão de Mauá, em 1857, sob a supervisão do engenheiro britânico Dadgson (ABCEM, 2019).

Atualmente, em meios urbanos, devido a evolução da frota rodoviária, houve um aumento na densidade das vias e com isso um aumento no número de acidentes, conforme relata o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), vinculado ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) (DNIT IPR 735:2010). Uma das medidas, segundo o (DNIT IPR 740:2010), é a construção de travessias em desnível, que abrange não apenas as passarelas/ pontes para pedestres, mas também as passagens subterrâneas, tais estratégias conseguem transpor o obstáculo assegurando a integridade do pedestre sem gerar atraso no deslocamento dos veículos. Para que sejam construídas é necessário verificar se há justificativa e relevância para tanto, já que sua construção, além de gerar um ônus financeiro, acaba por impactar na paisagem local, podendo, inclusive, não ter aderência dos pedestres caso mal locada.

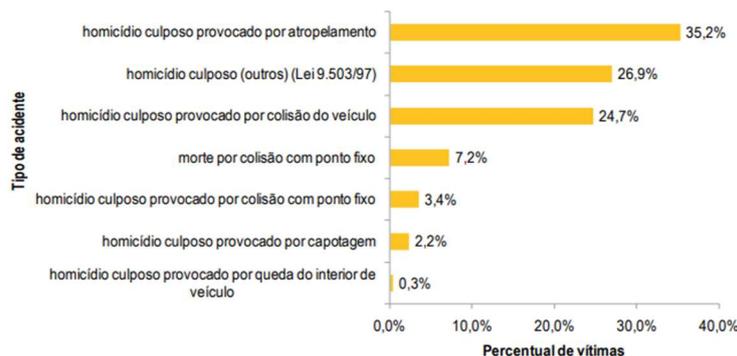
Dos atropelamentos que ocorreram no Brasil entre os anos de 2017 a 2020, 73% resultaram em danos à pessoa, sendo 62% relativos a vítimas feridas e 11% relativos a óbito, Figura 1, conforme a base de dados fornecida pela Polícia Rodoviária Federal (PRF).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da PRF, 2020.

Na cidade do Rio de Janeiro, de todos os acidentes de trânsito que levaram os transeuntes à morte, o atropelamento é o tipo de acidente que mais se destaca, sendo responsável por 35,2% das vítimas (Figura 2), conforme pesquisa do Instituto de Segurança Pública (ISP).

Figura 2 - Acidentes ocorridos no Rio de Janeiro  
 Vítimas fatais por tipo de acidente – estado do Rio de Janeiro – 2018<sup>5</sup> (valores percentuais)



Fonte: ISP, 2019. Adaptado pelo autor, 2021.

Segundo o (DNIT IPR-740:2010), conforme consta na Tabela 12, pedestres da faixa etária de 19 a 40 anos são os únicos que possuem completa compreensão do trânsito e boa capacidade de julgamento. Sendo a faixa etária que antecede este intervalo ainda pouco prudente quanto ao julgamento e a que sucede começa a apresentar alterações em função do declínio da idade. Por esse motivo, em vias públicas os pedestres figuram como os elementos mais frágeis, tornando-se objeto de preocupação por partes dos projetistas que precisam desenvolver tecnologias atrativas que lhes protejam durante as travessias de vias movimentadas.

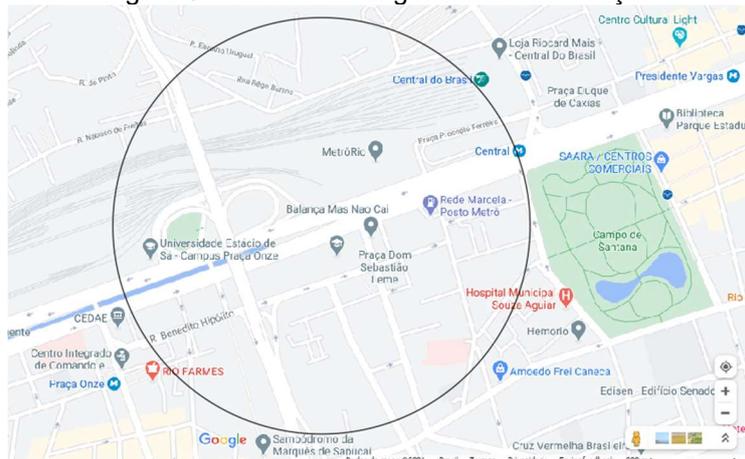
Nesse contexto, as passarelas surgem como uma solução factível por possuírem um viés a favor da segurança dos pedestres, também contribuem para a mobilidade urbana, estimulando o uso de meios não motorizados; não obstante, para que atendam bem aos usuários é fundamental que sejam implantadas juntamente a outros modos de circulação, de modo a não gerar um conflito entre diferentes modos de circulação não motorizados (BRASIL, 2010).

Consoante com o exposto logo acima, propõe-se a modelagem e o pré-dimensionamento de uma passarela de pedestres locada na Avenida Presidente Vargas, RJ. Como mostrado no esquema da Figura 3, que consiste em um raio de abrangência de quinhentos metros em torno da passarela, o ponto de locação sofre a influência de diversos pontos que justificam sua implantação.

Esses pontos são os mais variados, segue breve explanação dos pontos e distâncias: a 44 metros a Sudeste (SE) da passarela encontra-se a Escola Municipal Tia Ciata, cujo corpo discente é composto por alunos do Ensino Fundamental; a 100 metros a Leste-Sudeste (ESE) encontra-se o Edifício Residencial Pedro Ernesto, que recebeu a alcunha de Balança mas não Cai; a 296 metros Sudoeste (SO) a entrada do Sambódromo da Marquês de Sapucaí; a 310 metros (SO) encontra-se a 1ª e 2ª Varas da Infância, da Juventude e do Idoso; a 410 metros (SE) os Hospitais Universitários da Universidade Federal do Rio de Janeiro; a 416 metros Oés-Sudeste (OSO) a Universidade Estácio de Sá – Campus Praça Onze.

Há também pontos que se encontram relativamente próximos a passarela, como a Central do Brasil, estação ferroviária e metroviária do Centro do Rio de Janeiro, que se localiza a 510 metros a Leste (L) e também 17 pontos de ônibus circunscritos na área destacada, que contribuem com um fluxo variável de pessoas.

Figura 3 - Raio de abrangência da intervenção



Fonte: Google Maps, 2021. Adaptado pelo autor, 2021.

Segundo GOLD e WRIGHT (s/d) *apud* FRANCO (2015, P. 74), “passarelas eliminam acidentes na parte da via em que foram construídas e acidentes entre veículos por freadas bruscas”. Funcionando, deste modo, como um instrumento de proteção ao pedestre e aos motoristas. Segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER - (1996), nem sempre as passarelas são bem recebidas pelos pedestres indisciplinados, que precisam ser impelidos a usá-las.

Tal resistência ao uso destes elementos se dá em virtude dessas estruturas gerarem um desvio de trajeto, fazendo com que os pedestres tenham que dispendir uma quantidade maior de energia. Uma das formas de intervenção seria a implementação de passagem em desnível, dentre as hipóteses figuram as passagens subterrâneas e as passarelas de pedestres (DNIT IPR 740:2010).

Segundo a *World Health Organization* – Organização Mundial da Saúde – WHO (2018), o Brasil figura como o 3º país do mundo com maior número de mortes reportadas no trânsito. Apesar das medidas relativamente recentes como, por exemplo a Lei Seca, que passou a considerar infração gravíssima “dirigir embriagado ou sob influência de álcool ou qualquer substância psicoativa” (Brasil, 2008), e a Resolução do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que impôs a obrigatoriedade do sistema antitravamento de rodas, conhecido como freios *Anti-lock Braking System* (ABS) , como formas de diminuir os acidentes, o país ainda figura como um dos que possuem o trânsito mais violento (BRASIL, 2015).

Conforme consta no Relatório Global (WHO, 2018, P. 11), “pouco progresso foi feito ao adotar boas práticas de limite de velocidade, apesar da importância da velocidade, ela é a maior causa de morte e ferimentos”. Com base nisto, mais do que penalizar duramente motoristas que dirigem embriagados e melhorar o sistema de freios dos carros, deve-se proteger o pedestre; uma das medidas de redução de conflitos entre transeuntes e veículos é a adoção de travessias de pedestres em desnível (DNIT IPR 740:2010).

As passarelas são soluções possíveis para a intervenção de vias de grande fluxo de veículos (DNER, 1996). Essas intervenções são preteridas pelos pedestres entre as travessias em desnível, por “serem mais higiênicas, esteticamente agradáveis e mais baratas que as passagens subterrâneas” (DNIT IPR 740:2010, P. 108). Além disso, “passagens subterrâneas são potenciais áreas de crimes, o que reduz seu uso” (DNIT IPR 740:2010, P. 94).

A preferência dos pedestres é relevante, já que estes podem não aderir a intervenção, de modo que as passarelas devem estar bem localizadas (DNER, 1998). Ademais, não deve ser um estorvo aos motoristas, “deve causar o mínimo de transtorno ao fluxo normal de veículos e ser construída com o menor prazo possível” (DNER, 1996).

O objetivo geral deste trabalho é dimensionar a superestrutura da passarela de pedestres localizada sobre a Avenida Presidente Vargas, bem como ampliar o escopo de trabalhos que abordam este tema. Além disso, por ser uma proposta de intervenção nas vias urbanas embasada no número de acidentes de trânsito no Brasil, funcionar como sugestão estratégica para a diminuição no número de acidentes no Estado do Rio de Janeiro, garantindo a integridade física dos cidadãos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Escolher um local de implantação que possa atender a um fluxo latente de pessoas ao longo do ano;
- Fazer os desenhos da superestrutura;
- Levantar as solicitações externas atuantes na superestrutura;
- Gerar o modelo numérico da superestrutura;
- Apresentar uma conclusão de viabilidade técnica;

## REFERENCIAL TEÓRICO

Passarelas, assim como as pontes, podem ser divididas em duas grandes partes: superestrutura e a subestrutura. A superestrutura é a parte que vence o obstáculo, é composta por um tabuleiro que sofre os carregamentos verticais e os transfere à parte “rígida” que o suporta e que, por sua vez, conduz esses carregamentos para a subestrutura. A subestrutura compreende os pilares e a fundação, em que os pilares funcionam como elementos que suportam a superestrutura e conduzem as cargas para as fundações, que as dispersam no solo (REIS e PEDRO, 2019).

Existe também uma variedade de tipologias estruturais de que são compostas estas estruturas, podem ser compostas em arco, viga e laje ou estruturas treliçadas. A principal diferença entre as tipologias estruturais reside na forma como as cargas atuantes no tabuleiro serão direcionadas aos apoios (KEIL, 2013).

Os materiais são vários, pedra ou alvenaria, madeira, metal – ferro e aço, concreto armado e concreto protendido, sendo sua utilização condicionada ao nível de tecnologia e conhecimento disponível para manipular estes materiais. As pontes em pedra ou alvenaria e madeira compõem a maior parte das pontes romanas do século XVIII, ao passo que as pontes em concreto e aço tiveram seu uso mais pujante do século XVIII até recentemente (REIS e PEDRO, 2019). Hoje em dia, o material mais utilizado para a construção de ponte e passarelas é o aço (KEIL, 2013).

### Sistema estrutural da Superestrutura

Segundo SANTOS (2017, P.15), “um sistema estrutural é um conjunto de elementos interconectados de modo a formar um todo organizado”, ou seja, consiste na definição do arranjo estrutural e a forma de ligação que promoverá a união de cada elemento, formando a essência da estrutura como um todo, em suas três dimensões.

A escolha do sistema estrutural se faz importante porque cada sistema responde de uma maneira às solicitações sofridas, de modo que o sistema deve ser escolhido em função dos esforços que a estrutura sofrerá. Como exemplo, pode-se citar as treliças, “que operam basicamente a tração e compressão” (SOUZA e RODRIGUES, 2008, P. 29) além de “possuírem esbeltez e baixa relação peso/capacidade de carga”. (SILVA e LIMA JR, 2016), estando aptas a vencer grandes vãos sem sobrecarregar demasiadamente a estrutura.

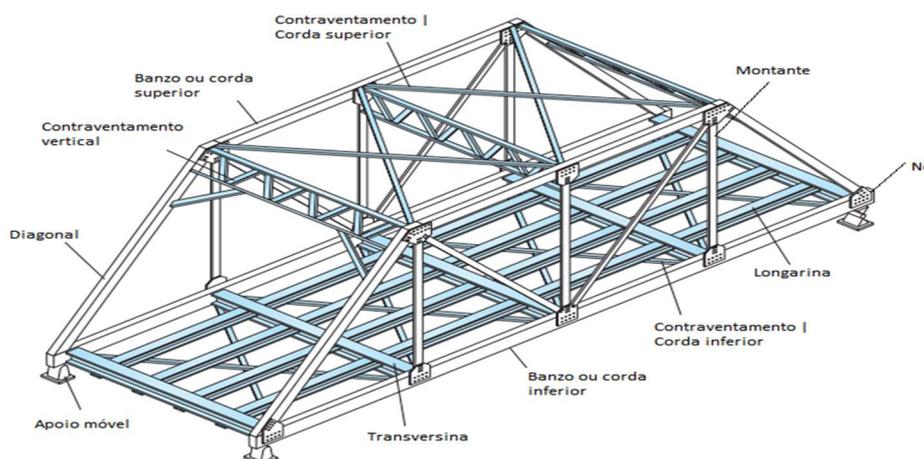
O sistema estrutural que compõe a superestrutura do projeto em questão é o treliçado. Treliça é um subtipo de sistema articulado no qual as articulações estão localizadas nas extremidades de suas barras (MARTHA, 2010) e cujo ponto de união denomina-se nó. (REBELLO, 2000). Segundo PFEIL e PFEIL (2009), hoje em dia os nós são rígidos, mas as barras só podem ser tidas como esbeltas se a estrutura em questão não estiver submetida à fadiga e não haver excentricidade em relação aos nós, isto é, se as cargas estiverem aplicadas nos nós; esta concepção também pode ser chamada de “treliça ideal” (SUSSEKIND, 1991), já que “trata-se de uma idealização, por não existir rótula perfeita e pelo fato de sempre atuar o peso próprio distribuído ao longo da barra” SORIANO (2013, P. 271).

## Classificação de treliças

As treliças podem ser classificadas em planas e espaciais. Treliças planas podem ser definidas como o conjunto de elementos interligados entre si na forma geométrica triangular, visando obter uma estrutura rígida que resista aos esforços normais (LIMA, 2020?). Treliças espaciais são formadas por treliças planas como mostrado na figura 4, cuja a estrutura consiste em duas treliças planas contraventadas transversalmente (SORIANO, 2013). Podem ainda ser classificadas quanto ao grau de estaticidade, podendo ser isostática, hipostática e hiperestática. Quando há mais elementos do que o necessário para evitar o colapso da estrutura, esta é dita hiperestática; quando há somente o necessário, esta é denominada isostática e quando há menos, hipostática. (MERIAN e KRAIGE, 2011).

Estruturas isostáticas e hipostáticas são estaticamente determinadas, ou seja, são analisadas através das equações de equilíbrio, ao passo que estruturas hiperestáticas possuem mais apoios que o necessário, de modo que podem ser removidos sem afetar a condição de equilíbrio da estrutura. (MERIAN e KRAIGE, 2011).

Figura 4 - Partes de uma treliça espacial



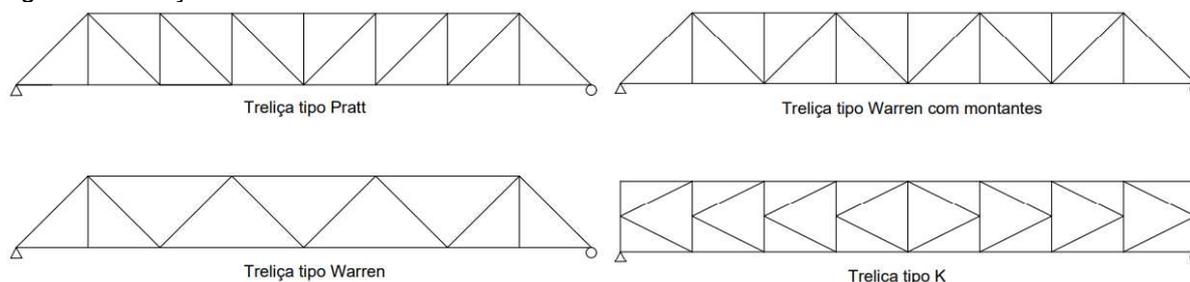
Fonte: Leet *et al.*, 2018. Adaptado pelo autor, 2021.

Segundo SUSSEKIND (1991, P. 187), “as treliças surgiram como um elemento estrutural mais econômico que as vigas para vencer vãos maiores e suportar cargas mais pesadas.” Sua utilização avançou e seu sistema foi melhorado na Revolução Industrial, sendo cada um dos seus tipos batizados em homenagem a seus criadores (GOMES, 2016).

Os tipos mais comuns de treliças são: Modelos Pratt, Warren, Warren com montantes e K (Figura 5), podendo haver modificação nos tipos através da inserção de

montantes (PINHO e BELLEI, 2008). O impacto dos montantes nas treliças Warren com montantes reside no montante fornecer capacidade de suporte ao reticulado, funcionando como um elemento conferidor de estabilidade (MORAES, 2007).

Figura 5 - Treliças mais comuns



Fonte: PINHO e BELLEI, 2008. Adaptado pelo autor, 2021

A treliça tipo Warren, sistema estrutural escolhido para compor a superestrutura, remonta a 1837, quando um inglês Alfred Neville construiu uma ponte em ferro forjado na Itália, cuja disposição dos elementos estruturais remetia a triângulos isósceles. O sistema era ineficiente e foi trocado logo depois, levando Alfred a modificar o sistema em 1840 quando inseriu componentes em paralelo para reforçá-lo. Um engenheiro autodidata chamado James Warren melhorou o sistema de Neville e reivindicou para si a patente de todas as formas de treliças triangulares, seja com triângulos equiláteros, seja eles isósceles (SIMMONS, 2017).

A disposição dos elementos estruturais deste tipo de treliça faz com que seja adequado a vencer vãos de comprimento superior a 20 metros, mas menores que 100 metros, tendo uma melhor eficiência na disposição de diagonais que varia de 35 a 55° com a horizontal. (BAREIRO, 2015).

### Comportamento frente a solicitações dinâmicas

Passarelas de pedestres, por estarem sujeitas a solicitações menores, serem mais leves e esbeltas são suscetíveis a efeitos dinâmicos mais intensos. Há ainda a questão da sensibilidade à vibração ser mais intensa devido aos materiais cada vez mais resistentes, que permitem a utilização de seções transversais cada vez menores, bem como vencer vãos maiores, aumentando consideravelmente a esbelteza dessas estruturas. A utilização de elementos de maiores rigidezes diminui a flexão a que essas estruturas estão sujeitas, aumentando a probabilidade da ocorrência do fenômeno de ressonância em função dos efeitos dinâmicos impostos pelos pedestres. (Lebet e Hirt, 2013).

O estudo das ações dinâmicas provenientes do caminhar humano é uma seara significativa na engenharia civil, visto que há formas e intensidades diferentes de caminhar, sendo o efeito agravado em virtude do aumento de energia transmitido do pedestre à estrutura, seja pelo aumento do impacto da passada, seja pelo aumento no número de pedestres (DEBONA, 2011). Assim, ao analisar dinamicamente uma estrutura deve-se atentar, segundo a NBR 6118:2014, se a frequência natural da estrutura se encontra o mais afastada possível da frequência crítica, de modo não apenas a tornar a utilização da estrutura confortável, mas também a evitar uma possível ressonância.

### Aço

O aço pode ser classificado em aço-carbono e aço de baixa liga, tal divisão se dá em função dos elementos químicos que se encontram em sua estrutura. O aço-carbono,

como o próprio nome denuncia, possui o Carbono em sua composição e pode ainda se classificar quanto a concentração deste elemento, que atribui resistência ao aço. (PFEIL e PFEIL, 2009).

Quanto maior for a concentração de carbono em determinado material, maior será sua resistência, mas esta característica traz como ônus a diminuição da ductilidade deste. O aço de baixa liga, em contrapartida, tem sua resistência aumentada e comportamento mecânico melhorado por adição de elementos de liga, tais como Cobre, Manganês e Molibdênio, que modificam a microestrutura do material. (PFEIL e PFEIL, 2009). Tanto o aço-carbono quanto o aço baixa liga podem ainda sofrer tratamento térmico visando melhorar sua resistência frente a ciclos de aquecimento e resfriamento que modificam a estrutura cristalina do aço. (SILVA e MEI, 1988).

## **Propriedades do aço**

Todo material de construção tem uma particularidade comportamental, sendo adequado para uma finalidade, mas inadequado para outras. Cabe ao profissional que irá manipulá-lo conhecer suas propriedades, previamente ensaiadas, de modo a adequá-lo ao ambiente e às solicitações atuantes sobre ele (CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2012).

### **Elasticidade**

A elasticidade é a propriedade que permite que o aço, quando solicitado a um carregamento, retorne à condição inicial. Tal fenômeno ocorre quando o material se mantém no regime elástico. Segundo (DIAS, 2008, P. 73), “quanto mais intensas forem as forças de atração entre os átomos maior será o módulo de elasticidade.”

### **Ductilidade**

De acordo com PFEIL e PFEIL (2009) ductilidade é a capacidade do material se deformar plasticamente sob a ação de cargas. “Quanto mais dúctil um aço maior será o alongamento ou estrição da área antes da ruptura” DIAS (2008, P. 73). Tal característica tem sua relevância na construção civil por redistribuir as tensões locais muito grandes, gerando uma espécie de “mecanismo de alerta” antes de atingir o Estado Limite Último (ELU).

### **Fragilidade**

É a propriedade diametralmente oposta à ductilidade. Materiais que sofrem fratura por pouca ou nenhuma deformação plástica são chamados frágeis. (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2012). Porém, a fragilidade não se restringe às solicitações mecânicas, efeitos da temperatura também geram fragilidade, seja pela solda que modifica o retículo cristalino do material, seja por baixas temperaturas que diminuem a capacidade do material de absorver energia de impacto. (SOUZA, 1982).

### **Resiliência e tenacidade**

Conforme expõe SOUZA (1982, P. 33), “é a capacidade do material absorver energia quando deformado elasticamente e liberá-la quando descarregado”. Já a tenacidade é o quanto um material consegue absorver de energia até sua ruptura. (PFEIL e PFEL, 2009).

## Dureza

Dureza é a resistência que um material oferece quando pressionado ou riscado por outro. A dureza está diretamente relacionada a ligação atômica dos átomos que compõe o material, no caso dos metais as forças moleculares são iônicas fazendo deles materiais mais duros, mas que podem ter sua dureza aumentada por meio de adições, tratamentos, etc. (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

## Perfis de aço laminado produzidos no Brasil

Perfil de aço laminado é o aço que passou por procedimento mecânico que transformou suas características físicas, tal processo denomina-se laminação. (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016). Quanto a maneira de se obter a forma, há dois processos, a laminação à quente e a formação a frio; o presente trabalho irá utilizar o aço laminado à quente.

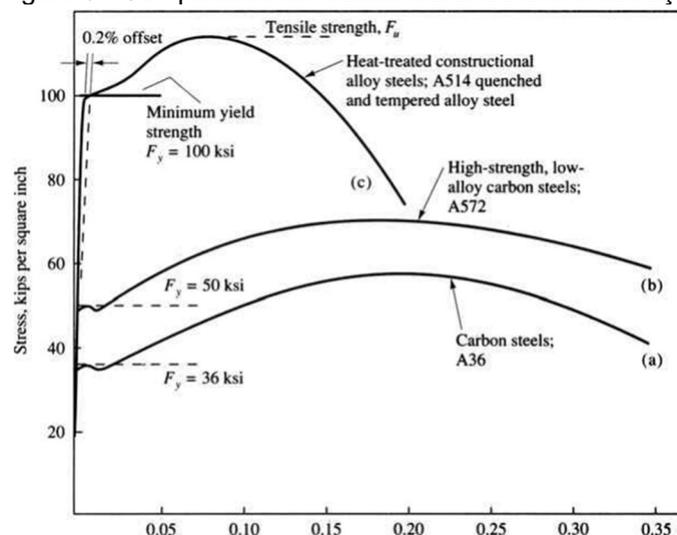
As empresas que mais se destacam na produção de perfis laminados são a Gerdau e a ArcelorMittal. Em que os perfis laminados de abas inclinadas (perfis, I, U, L e T) são amplamente produzidos tanto pelas empresas citadas acima, como também pela Votorantim, enquanto que os perfis de abas paralelas só têm a Gerdau como produtora (DIAS, 2008).

Segundo a ABNT 15980:2020, perfis W são “perfis I e H duplamente simétricos, com faces de abas paralelas, sendo a espessura da alma menor que a espessura das abas”. Esses perfis também são apresentados na literatura técnica como perfis padrão americano de abas paralelas ou ainda como perfis *Wide Flange* (WF), que em tradução livre seria “aba larga”, começaram a ser produzidos no Brasil pela Gerdau em 2002, variando sua altura de 150 a 610 mm. Tais perfis têm suas características dimensionais e propriedades geométricas definidas pela ABNT NBR 15980:2020 e ASTM A6/A6M e são produzidos no comprimento de 12 metros (PEREIRA, 2014).

Segundo a Gerdau (2021), os perfis W somente são produzidos em aço ASTM A 572 Grau 50, sendo um aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), tendo limite de escoamento mínimo de 345 MPa e limite de resistência de 450 MPa, entretanto há outros materiais mais resistentes à ruptura e à corrosão em que podem ser produzidos, mas apenas sob encomenda. Os aços (ARBL) resultam da “seleção da liga ideal e do processamento controlado cuidadosamente, como a laminação à quente” SHACKELFORD (2008, P. 257).

A Figura 6 traz um comparativo entre três tipos de aço, a curva (a) retrata o comportamento de um aço A36 (aço carbono), enquanto que as curvas (b) e (c) retratam o comportamento de um aço A572 (ARBL) e A514 aço de liga temperado e revenido (aço estrutural de liga tratado termicamente), mostrando que o A572 tem uma resistência superior ao aço comum e apesar de ser menos resistente que o A514, ele tem maior ductilidade, comportamento apreciado na engenharia em virtude da ruptura ser precedida pela fase de deformação plástica antes e durante a propagação de trincas (GARCIA, SPIN e SANTOS, 2012).

Figura 6 - Comparativo de resistência entre diferentes aços



Fonte: Salmon, Johnson e Malhas, 2009

O tratamento à quente tem sua relevância no sentido melhorar as características do aço, dentre elas estão o aumento da ductilidade através da diminuição da energia necessária para que o elemento se deforme e a mudança da direção das regiões segregadas, tornando-o um material homogêneo (SILVA e MEI, 1988).

Segundo (McCORMAC e CSERNAK, 2012), perfis do tipo W costumam ser mais econômicos para vigas por terem mais aço concentrado em suas mesas que o perfil I, também têm maiores momentos de inércia para o mesmo peso. Além disso, tem uma resistência superior à corrosão em comparação com o aço carbono (SANTOS e CARNEIRO, 2019), isso se dá pela sua liga possuir baixa porcentagem de Cobre.

## Corrosão em estruturas de aço

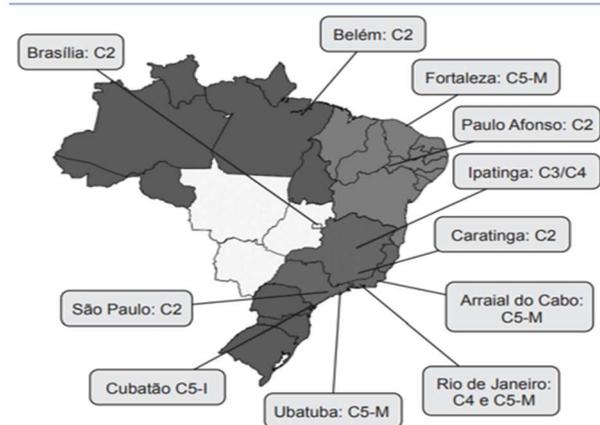
Segundo DIAS (2008), corrosão consiste em alterações físico-químicas que um material sofre em decorrência do contato com agentes da natureza. Pode ser eletroquímica, que ocorre com a umidade, ou química, que ocorre em meios secos (muito comum em atmosferas poluídas). Conforme afirma (PANNONI, 2015, P. 22), “a corrosão atmosférica é a mais importante forma de corrosão uniforme. Ela é, também, a mais importante forma de corrosão metálica. A maior parte dos problemas causados pela corrosão está associada a essa forma de ataque.”

A corrosão pode ser acelerada a depender do meio em que a estrutura está inserida, ambientes urbanos costumam conter uma atmosfera rica em poluentes, como óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), Sulfeto de Hidrogênio (H<sub>2</sub>S). Tais elementos contribuem para a corrosão visto que a chuva carrega esses gases da atmosfera, reagindo com eles e tornando-se, em certa medida, ácida. Ambientes marinhos, por sua vez, costumam ter uma atmosfera rica em cloretos de sódio e magnésio, em forma de cristais ou aspergido na atmosfera, sendo então arrastados pelos ventos. Esta atmosfera acelera a velocidade de corrosão em metais de 30 a 40 vezes. (HELENE, 1993).

Conforme informa (PANNONI, 2015), a *International Organization for Standardization* (ISO) 12944-2 tem uma classificação específica para agressividade ambiental, diferenciando ainda se devido a atividade industrial ou por consequência da proximidade com o mar. Tal classificação encontra-se representada na Figura 7.

Figura 7 - Índice de agressividade segundo a ISO 12944-2

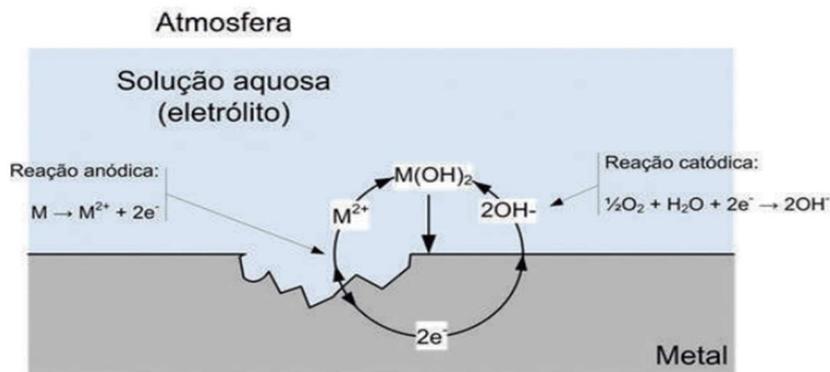
Categoria de agressividade	Perda de massa e espessura para aço baixo carbono, após 365 dias de exposição		Exemplos de ambientes típicos (informativo)	
	Perda de massa (g/m <sup>2</sup> )	Perda de espessura (μm)	Exterior	Interior
C1 (muito baixa)	≤ 10	≤ 1,3	—	Edificações condicionadas para o conforto humano (residências, escritórios, lojas, escolas, hotéis).
C2 (baixa)	> 10 a 200	> 1,3 a 25	Atmosferas com baixo nível de poluição. A maior parte das áreas rurais.	Edificações onde a condensação é possível, como armazéns e ginásios cobertos.
C3 (média)	> 200 a 400	> 25 a 50	Atmosferas urbanas e industriais com poluição moderada por SO <sub>2</sub> . Áreas costeiras de baixa salinidade.	Ambientes industriais com alta umidade e alguma poluição atmosférica, como lavanderias, fábricas de alimentos, salicinos, cervejarias, etc.
C4 (alta)	> 400 a 650	> 50 a 80	Áreas industriais e costeiras de salinidade moderada.	Ambientes como indústrias químicas e coberturas de piscinas.
C5-I (muito alta, industrial)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	Áreas industriais com alta umidade e atmosfera agressiva.	Edificações ou áreas com condensação quase permanente e com alta poluição.
C5-M (muito alta, marinha)	> 650 a 1.500	> 80 a 200	Áreas costeiras com alta umidade e atmosfera agressiva.	



Fonte: PANNONI, 2015. Adaptado pelo autor, 2021.

Em metais, a corrosão eletroquímica costuma ser mais pujante, que se caracteriza por haver a transferência de elétrons de uma espécie química para outra, assim os átomos metálicos cedem ou perdem elétron (reação de oxidação), enquanto que a outra espécie química recebe este elétron (reação de redução); chama-se o polo responsável por ceder elétrons de anodo, ao passo que quem recebe é chamado de catodo (CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2012). O processo encontra-se representado na figura 8.

Figura 8 - Representação da corrosão úmida eletroquímica



Fonte: CBCA; IAB, 2017

## Medidas profiláticas em projeto

Como DIAS (2008) detalha, é fundamental que se proteja a estrutura de efeitos corrosivos, quando for possível, impedindo o contato com o fator que contribui para a corrosão. São exemplos as boas práticas de projeto, em que se prevê furos de drenagem em perfis; as cantoneiras devem estar dispostas de modo a permitir a rápida secagem da sua superfície; deve-se evitar contato de materiais diferentes visando impedir a formação de uma diferença de potencial quando em um meio eletrolítico.

Há também a necessidade de evitar que elementos metálicos fiquem semienterrados (em contato com o solo, úmido, rico em minerais, ácido ou alcalino) ou semisubmersos (em contato com a água, que pode conter gases, minerais, matéria orgânica e/ ou bactérias), evitar solda ponto porque há uma tendência a concentração de íons em frestas (MELO, 2020?).

No melhor dos mundos a estrutura ficaria completamente protegida de solicitações químicas, mas nem sempre consegue-se adaptar a estrutura para protegê-la. Como medida

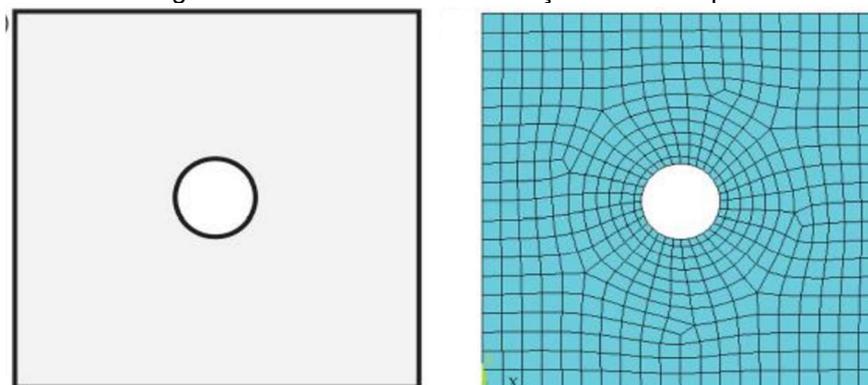
profilática, pode-se adotar aços que possuam uma melhor performance em um meio agressivo (PANNONI, 2017).

## Modelagem Numérica

Como conta Vaz (2011) e complementa DIAS *et al.* (2007), o Método dos Elementos Finitos (MEF) deriva da evolução do Método dos Deslocamentos (que através do uso dos computadores sistematizou a análise matricial para diferentes estruturas reticuladas), tendo como diferença principal a limitação do Método dos Deslocamentos que se restringe a estruturas reticuladas. De modo diverso, o MEF avançou graças às raízes nos métodos de energia e métodos aproximados, possibilitando a análise de estruturas reticuladas e contínuas; bi e tridimensionais; lineares estáticas e elásticas; análise estática de estruturas lineares e análise estática de estruturas não lineares física e geometricamente, além da análise dinâmica. Não obstante, evoluiu ainda das estruturas para a engenharia geotécnica, análise de fluxo térmico e hidráulico e interação fluido-mecânica.

No método dos elementos finitos, os corpos, contínuos ou não, são subdivididos em pequenas partes denominadas elementos, interconectadas entre si por juntas denominadas nós ou pontos nodais. Os nós ficam nos limites dos elementos, promovendo a ligação entre eles (RAO, 2018). O processo de dividir um corpo em pequenas sub-regiões denomina-se discretização e encontra-se exemplificado na Figura 9. Através da discretização conhece-se o comportamento global da estrutura, uma vez que pelo comportamento individual de cada elemento pode-se obter o comportamento global da estrutura através de um processo chamado agrupamento ou *assemblagem*, que deriva do inglês *assembly*, que em tradução livre significa “conjunto”. DIAS *et al.* (2007).

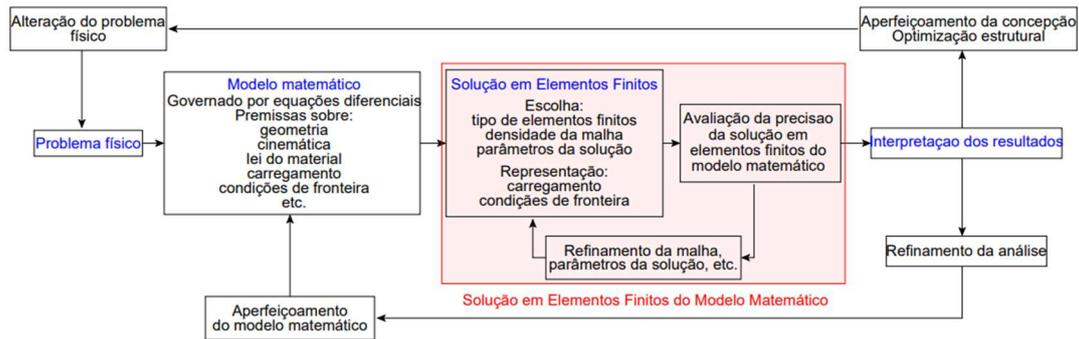
Figura 9 - Processo de discretização de um corpo



Fonte: CHEN e LIU, 2015

Para estruturas simples, pode obter a solução exata pelos métodos matemáticos clássicos (método analítico), mas esses métodos se tornam ineficientes frente a uma estrutura mais complexa, para contornar este problema lança-se mão de aproximações numéricas que culminarão em uma solução aproximada de um modelo exato (ALTABEY; NOORI; WANG, 2018). O método de análise de estruturas por elementos finitos encontra-se desmistificado na figura 10.

Figura 10 - Resolução de um modelo matemático por elementos finitos



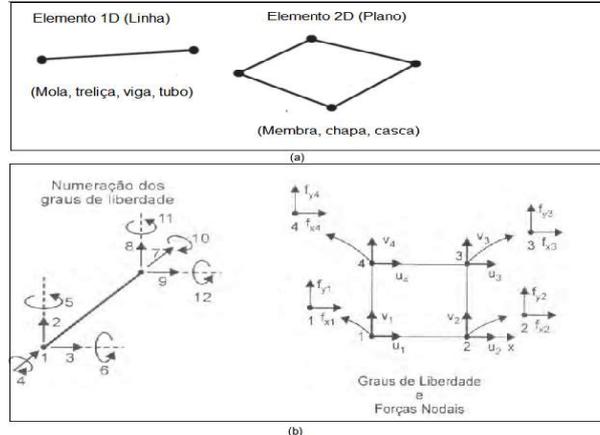
Fonte: Cismasiu, 2014

## Tipos de elementos

Os elementos surgem como uma maneira de limitar o número de graus de liberdade em meios contínuos, impondo uma discretização para cada tipo de comportamento, limitando o número de nós e, conseqüentemente, o número de graus de liberdade. (ALTABEY; NOORI; WANG, 2018)

A depender da geometria e da natureza do problema físico, pode-se construir um modelo discretizado através linhas, áreas e volumes, cada elemento é identificado por um nome e número específico e possui uma quantidade definida de graus de liberdade. (MADENCI e GUVEN, 2015). Conforme explica FILHO (2000), elementos de geometria unidimensional são indicados para vigas, treliças, cabos e elementos bidimensionais são adequados para placas, cascas e membranas;

Figura 11 - Tipos de elementos e graus de liberdade



Fonte: (a) ALTABEY; NOORI e WANG, 2018. (b) FILHO, 2000. Adaptados pelo autor, 2021.

A Figura 11a representa os elementos geométricos, lineares e de área, enquanto que a Figura 11b atribui a esses mesmos elementos graus de liberdade e forças nodais. O elemento unidimensional representa uma viga, “uma viga é definida como um elemento estrutural longo e delgado que pode ser submetido a carregamentos transversais. Portanto, vigas podem ser torcidas e dobradas. Os elementos de barra podem sustentar apenas cargas transversais” ALAWADHI (2016, P. 42). Esses elementos estão sujeitos a 12 graus de liberdade por estarem sujeitos aos esforços axiais (tração e ou compressão), esforços transversais (cisalhamento e momento fletor) e momento torsor. O comportamento desta estrutura é descrito pela hipótese de Bernoulli. (VAZ, 2011).

As chapas “contêm uma dimensão muito menor do as outras duas” (FILHO, 2000, P. 277). Para placas delgadas adota-se a Teoria de Kirchhoff, cuja principal hipótese se

assemelha a Teoria de Euler-Bernoulli, enquanto que para placas delgadas ou espessas adota-se a teoria de Mindlin, que implementa uma visão semelhante a de Timoshenko para vigas (Vaz, 2011).

Conforme FILHO (2000) detalha ao longo de seu livro, quando se trata de elementos bi e tridimensionais deve-se também lançar mão dos conhecimentos da Teoria da Elasticidade; Condições de Equivalência de Energia; conhecer os Campos de Deslocamento do elemento. Tais conhecimentos servirão para que o profissional que manipula o modelo compreenda-o do ponto de vista matemático, este é o fundamento do livro em questão, que contém em seu prefácio a seguinte máxima: “Se o engenheiro não sabe modelar o problema sem ter o computador, ele não deve fazê-lo tendo computador”.

### Vantagens e desvantagens da análise por elementos finitos

Para CHEN e LIU (2015), esse método apresenta tanto vantagens como desvantagens, conforme consta no Quadro.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens de um modelo elaborado pelo MEF

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• É um método exequível para problemas grandes que adotará algumas aproximações de modo a tornar a solução executável nas capacidades do computador;</li> <li>• Menos tempo de execução já que a “macroestrutura” é resolvida a partir da solução das “microestruturas”, possibilitando que a montagem seja mais simples;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esforço computacional desenvolvido para o gerenciamento de arquivos</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Você pode utilizar diferentes tipos de elementos para compor uma estrutura;</li> <li>• Uma pequena alteração no modelo requer apenas uma reanálise, com um menor custo computacional envolvido;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende-se tempo para configurar o sistema ao inicia-lo</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiente para problemas não lineares locais, que podem ser detalhadas com o refinamento da malha;</li> <li>• Resultados exatos para análise de deformação e tensão;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em análises dinâmicas, as condensações de matrizes acumulam novas aproximações</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

### Estados-limites

Estados limites são critérios de segurança, podem ser últimos ou de serviço, em ambos o dimensionamento deve considerar que nenhum estado limite seja excedido. Conforme definição atribuída pela NBR 8681: 2004 (ABNT, 2004, P.1), “estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção”.

### Estados limites últimos

Segundo a ABNT NBR 8681:2003, relacionam-se à perda de estabilidade global ou parcial e ainda à ruptura da estrutura. Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008, P.14), “estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional”

## Estados limites de serviço

Segundo a (ABNT NBR 8800, 2008, P.14), “estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização” e conforme exposto pela ABNT NBR 8681:2003, relacionam-se ao conforto que o usuário tem ao utilizar a estrutura ou mal estar visual devido às deformações excessivas.

## Normatização

Segue abaixo a enumeração das normas utilizadas no decorrer do trabalho:

### Normas brasileiras

Apesar de haver inúmeras normas brasileiras, certas estruturas, por serem muito específicas, ainda não foram contempladas com uma normatização particular, o que costumeiramente é contornado lançando-se mão, no que couber, de normas atribuídas a outros tipos de construção. Como exemplo, pode-se citar a ABNT NBR 6120, que em seu título carrega o direcionamento para edificações, mas pode ser utilizada para atribuir características físicas às lajes de passarelas, por exemplo.

Normas brasileiras usadas para o dimensionamento da estrutura em questão:

- NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;
- NBR 7188:2013 – Cargas móveis em pontes rodoviárias e passarelas para pedestres;
- NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos;
- NBR 6123:1988 – Forças devido aos ventos em edificações;
- NBR 9050:2004 – Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaço e equipamentos urbanos;
- NBR 9077:1993 – Saída de emergência em edifícios;
- NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto - procedimento;
- NBR 15980:2020 – Perfis laminados de aço para uso estrutural – dimensões e tolerância;

### Outras normas

Por mais que haja Normas Brasileiras que padronizam procedimentos, ainda assim, algumas estruturas, por conta de suas peculiaridades, requerem normas específicas para sua tipologia, nestes casos recorre-se a normas estrangeiras. Segue as especificações e normas estrangeiras que são de grande valia para este trabalho: Norma ISSO 12944-2; *American Society for Testing Materials (ASTM) A6/A6* e *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*.

## METODOLOGIA

Para as considerações quanto ao projeto de uma passarela deve-se ater às diretrizes dadas pelas Normas Brasileiras 9050:2004 e 9077:1993 bem como aos direcionamentos fornecidos pelas autarquias federais quanto ao distanciamento de uma passarela a outra, medidas de tabuleiro, gabarito, elementos de segurança e acessibilidade.

## Elementos de acessibilidade em pontes e passarelas

Segundo o item 3.1 da (ABNT NBR 9050:2004, P. 2), acessibilidade é a “possibilidade e condição de alcance, percepção e entendimento para a utilização com segurança e autonomia de edificações, espaço, mobiliário, equipamento urbano e elementos.” Dentre esses elementos que conferem acessibilidade figuram as escadas, rampas e corrimãos e elevadores.

### Escadas

Segundo a mesma norma, as escadas devem possuir um patamar a cada 3,2 m de desnível vertical, patamares a cada mudança de direção e estes, por sua vez, não devem ter dimensão longitudinal inferior a 1,20 m.

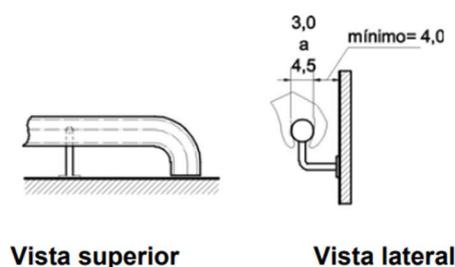
Os degraus devem ser dimensionados de acordo com a ABNT NBR 9077: 1993, em que seu espelho não deve suplantar o valor 18 cm, mas não deve ser inferior a 16 cm. Além disso, seu piso deve ser dimensionado pela fórmula de Blondel, em que a dimensão do piso acrescida do dobro da dimensão do espelho não deve exceder o valor de 64 cm, mas não deve ser inferior a 63 cm.

### Corrimão

Conforme ABNT NBR 9077:1993, os corrimãos devem estar posicionados a 0,80 m a 0,92 m acima do nível do piso. Quanto às características, segundo a ABNT NBR 9050:2004, devem ser instalados em material rígido, em ambos os lados de escadas ou rampas, possuindo de 3,00 a 4,50 cm de dimensão, não podem possuir arestas vivas e devem estar afastados de 4,0 cm das paredes, conforme mostrado da imagem abaixo.

Figura 12 - Especificações para corrimão

**Dimensões em centímetros**



Fonte: ABNT NBR 9050:2004

### Rampas

As rampas são os elementos preferenciais de acesso às passarelas, segundo o (DNIT ISF 219:2015), devem ter inclinação suave de modo a solicitar pouco o pedestre. Segundo o (DNIT IPR 740:2010), as rampas são um meio de atender pedestres com necessidades especiais, assim não devem possuir inclinação acentuada. Conforme expõe o DNER (1996), as rampas não devem ter inclinação superior a 15%, sendo o valor de 8,33% o mais indicado (ABNT NBR 9050:2004).

Porém, ao se tratar de obras de arte especiais, as rampas devem lidar também com um componente estético, não sendo recomendado rampas retas. Para que haja uma

harmonia visual o DNER (1996) recomenda que possuam seções com patamar e que o trecho reto não seja superior a dimensão da passarela.

## Elevadores

Apesar de não haver uma determinação no normativo brasileiro, a Lei nº 10.098:00 que discorre sobre a promoção da acessibilidade de pessoas com deficiência e de mobilidade reduzida determina no seu Art. 10 que “os elementos do mobiliário urbano deverão ser projetados e instalados em locais que permitam que eles sejam utilizados pelas pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida.” De modo que se houver limitação para a instalação de rampas devido a sua extensão, deve-se lançar mão de tecnologias que façam cumprir a lei.

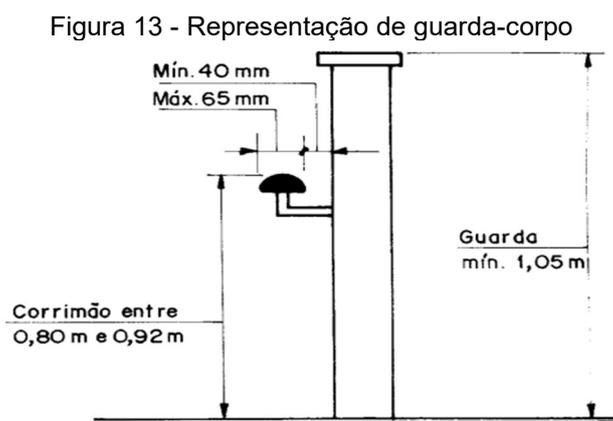
## Elementos de segurança em pontes e passarelas

### Telas de proteção

As telas são instaladas em passarelas sobre rodovias visando inibir a ação de vândalos que costumam lançar objetos de cima das passarelas nos veículos que trafegam logo abaixo. Uma outra alternativa seria fechá-la, mas esta possibilidade se tornaria custosa no projeto além de tornar a passagem mais escura. Além disso, a instalação de telas é extremamente recomendada para locais em que possa ser usada por crianças desacompanhadas de adultos, como escolas, playgrounds, etc. (DNIT IPR 740:2010).

### Guarda corpo

Consiste, segundo a ABNT NBR 9077:1993, em uma barreira que impede a queda de um nível para outro. As escadas e rampas que não forem separadas por paredes, como mostrado na figura 13, devem ter o guarda-corpo associado ao corrimão. Devem ter no mínimo 1,05 m, tendo como parâmetro o piso da edificação aparada (ABN NBR 9050:2004).



Fonte: ABNT NBR 9077:2004

### Piso

Conforme determina o (DNIT ISF 219:2015), o piso das passarelas deve ser em material antiderrapante, obrigatoriamente. Sendo recomendável, segundo a ABNT NBR

9050:2004, que tenha ainda superfície regular, não promovendo trepidação em equipamentos com rodas.

## **Dimensões**

Conforme o DNER (1996) a dimensão de 2,50 m para a seção transversal se mostrou satisfatória nos projetos desenvolvidos pelo órgão. O que é corroborado pela (DNIT ISF 219:2015), que a dimensão mínima para o tabuleiro de uma Obra de Arte Especial não deve ser inferior a 2,00 m, propiciando o trânsito de pedestres em ambos os sentidos. Para o gabarito vertical, segundo o (DNIT ISF 216:2015), deve-se considerar a dimensão mínima de 6,75 m.

## **Malha**

Apesar de compreender a formulação do modelo matemático por trás do modelo numérico, por vezes os modelos podem ser pouco representativos quanto aos resultados que se apresentam, isto se deve pelo baixo grau de precisão. “Geralmente, um número maior de elementos proporciona uma aproximação melhor da solução. Mas em alguns casos, um número excessivo de elementos pode aumentar os erros de arredondamento” MADENCI e GUVEN (2015, P.24). Além disso, “Aumentando o número de elementos ou sua ordem levará a um aumento significativo do tempo computacional e na memória necessária para resolver o problema (ALAWADHI, 2016, P. 393). Com isso, o modelo ideal é aquele que une uma precisão necessária para a obtenção correta dos esforços e deslocamentos, sem que isso acarrete na morosidade da geração do modelo numérico.

## **DESENVOLVIMENTO**

Nesta seção será desenvolvido o estudo de cenário, que consiste no dimensionamento da superestrutura de uma passarela de pedestres sobre a Avenida Presidente Vargas, no Centro do Rio de Janeiro. Para tanto, haverá um esclarecimento sobre o local de implantação da passarela, as principais características da via e medidas a serem vencidas, o que culminará no projeto da superestrutura da passarela. Após isso, serão calculadas as cargas atuantes na superestrutura para que possam ser realizadas as combinações que solicitarão a estrutura.

O modelo numérico será desenvolvido através do software de elementos finitos ANSYS® - versão estudante 2020 R2 – que computará o comportamento interno dos elementos que compõem a superestrutura frente às cargas externas, possibilitando assim que as verificações axiais, cortantes e dos momentos fletores sejam realizadas, seguido da verificação relativa ao deslocamento vertical máximo.

## **Projeto**

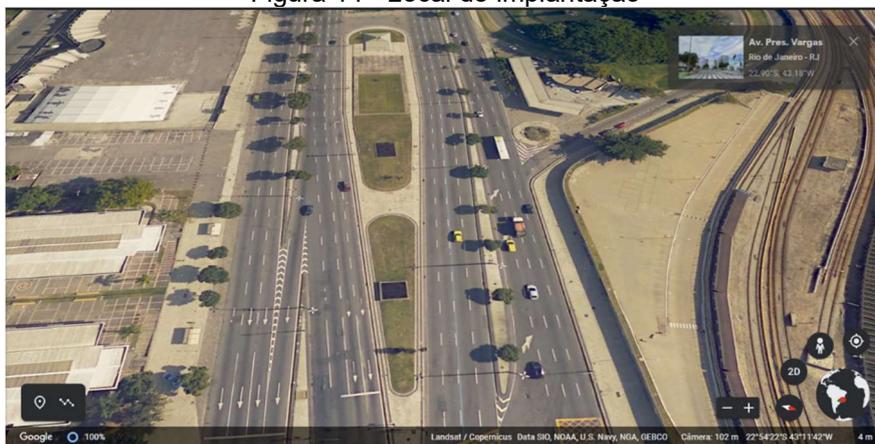
O ponto de intervenção se dá na Avenida Presidente Vargas por ser um ponto de relevância na cidade do Rio de Janeiro e por ter proximidade com escola municipal, edifício residencial, universidade, hospital e com locais onde ocorrem eventos festivos na cidade.

## **Local da implantação**

A passarela será locada na Avenida Presidente Vargas, na cidade do Rio de Janeiro, conforme mostrado na Figura 14, na latitude 22°54'23.600" S e longitude 43°11'43.638" O. A Avenida em questão possui 3,50 km de extensão e é composta por quatro faixas de

rolamento, duas com sentido Praça da Bandeira (faixas à direita) e duas com sentido Candelária (faixas à esquerda). Trata-se de uma via arterial e, portanto, com limite de velocidade de 60 km/h, contando também com a limitação de 50 km/h para ônibus. Segundo o último levantamento de volume de veículos na Avenida Presidente Vargas, realizado em 2013 pela Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro, esta via recebia de 49 mil a 120 mil veículos diariamente.

Figura 14 - Local de implantação



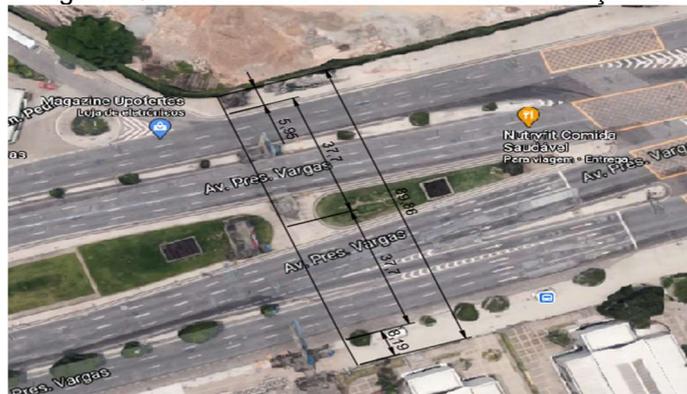
Fonte: Google Earth, 2021.

Apesar de haver uma faixa de pedestres a 100 metros da passarela, paralelamente ao eixo longitudinal de implantação, deve-se considerar que esta faixa se estende por todos os rolamentos da via, está exposta às intempéries e contribui para a vulnerabilidade dos pedestres sujeitos a assaltos enquanto esperam a abertura e fechamento do semáforo, sem contar que os idosos e aqueles com mobilidade reduzida teriam que fazer pausas ao longo da travessia por não conseguirem transpô-la em um intervalo de semáforo. Além disso, a passarela mais próxima dista de 600 metros da proposta, atendendo ao distanciamento mínimo de 200 metros sugerido pelo (DNIT ISF 219:2015).

## Superestrutura

A superestrutura total corresponde ao vão de 80 metros de comprimento, que será vencido através de dois módulos biapoioados e espelhados de 40 metros cada, relativo aos quase 38 metros que compõe os 4 rolamentos da Avenida somado ao espaçamento de 2 metros, um para cada lado, para a locação do pilar nas calçadas, conforme mostrado na Figura 15. Esta configuração se faz conveniente visto que o material o qual comporá a superestrutura é o aço, material pré-fabricado, com dimensões precisas de modo que a montagem é mais rápida sem ser afetada por eventuais intempéries. Além, exige um espaço para montagem menor, organizado e limpo por não haver a necessidade de manipulação de materiais diferentes.

Figura 15 - Medidas do vão a ser vencido e calçadas



Fonte: Google Maps, 2021. Adaptado pelo autor, 2021.

## Transporte

O meio de transporte mais adequado é o rodoviário visto que o local de implantação se encontra em uma via urbana de fácil acesso à veículos. O transporte das peças deverá ser feito por um cavalo mecânico com semirreboque por possuir um comprimento de 14,80 metros, o que é favorável já que há a intenção de manter as peças que compõe os elementos longos, como os banzos, com o comprimento máximo de 12 metros.

## Montagem

Quanto a montagem, no local existem três áreas com potencial para serem usadas (Figura 16), são elas: a ilha que separa as pistas sentido Candelária e sentido Praça da Bandeira, um estacionamento ao lado da Escola Municipal Tia Ciata e um espaço conhecido popularmente como “Terreirão do Samba”, destinado a realização de eventos no período do Carnaval. O estacionamento e o Terreirão do Samba são locais preferenciais de montagem por contarem com uma área maior, possibilitando que o cavalo mecânico estacione para o descarregamento dos perfis, sem dificultar o trânsito em uma das vias.

Figura 14 - Locais potenciais para montagem



Fonte: Google Earth, 2021. Adaptado pelo autor, 2021.

Para possíveis deslocamentos horizontais como, por exemplo, levantamento de perfis mais pesados dentro do próprio canteiro, pode-se usar um caminhão com guindauto, que têm é caracterizado por um braço hidráulico telescópico montado sobre o chassi e que permite que cargas mais pesadas sejam levantadas e transladadas no canteiro, poupando os trabalhadores.

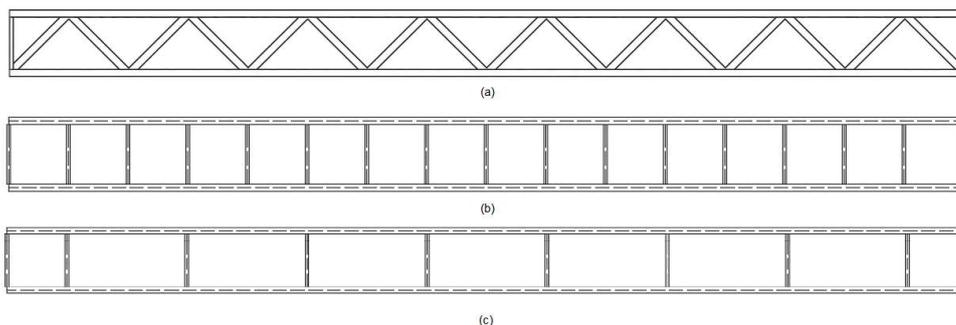
Para a colocação da superestrutura sobre a mesoestrutura pode-se usar um guindaste móvel, que consiste em um equipamento que faz o içamento de cargas e tem como base um veículo, tais equipamentos podem realizar movimentos de rotação e translação, podendo ainda mover sua lança em diferentes ângulos. Esses guindastes se classificam em treliçados, veiculares e hidráulicos e devem ser adotados seguindo um processo específico de cálculo, cujo resultado deve ser comparado com a capacidade do equipamento fornecido pelo fabricante. Tal processo não será abordado neste trabalho.

### Características da passarela de pedestres

A passarela é composta por 2 módulos espelhados de 40 metros, compondo a estrutura de 80 metros. O módulo de 40 metros, representado na Figura 17a, possui travamento superior (Figura 17c) espaçados em 5 metros, de modo que os pontos de conexão coincidam com os nós das treliças planas. O travamento inferior (transversinas) possui espaçamento de 2,50 metros entre si, conforme mostrado na Figura 17b, esta configuração se fez necessária uma vez que o piso será em Steel Deck, com autonomia para vãos de até 4,0 metros sem escora.

O piso do tabuleiro será composto por lajes Polydeck® 59S da empresa Perfilor, cujas telhas terão espessura de 1,25 mm, com espessura de laje de 11 cm, com classe do concreto maior ou igual a C25 e relação água-cimento menor ou igual a 0,60, para classe de agressividade II, conforme preconizado pelas tabelas 6.1 e 7.1 da ABNT NBR 6118:2014. Este trabalho se restringirá ao dimensionamento das estruturas metálicas, não se estendendo à análise de cisalhamento das lajes.

Figura 17 - Partes da superestrutura da passarela

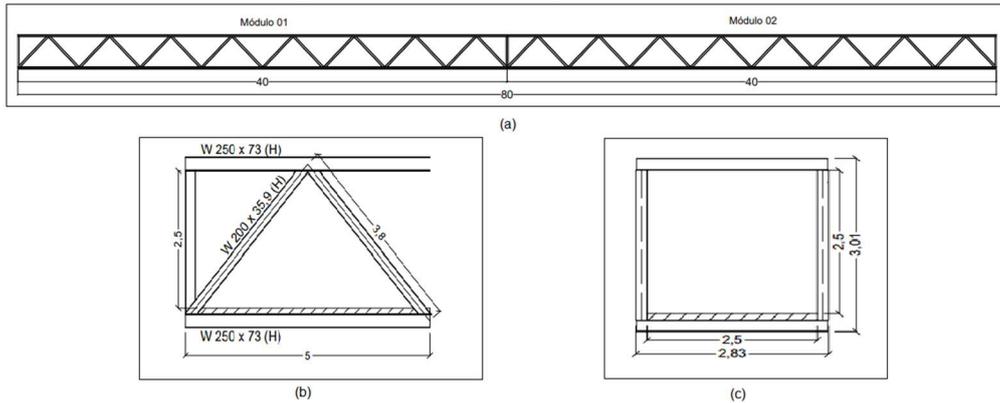


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

### Medidas da Superestrutura

A superestrutura total – 80 metros – encontra-se representada na Figura 18a. O sistema reticulado é formado por um treliçado simples, sua base possui 5 metros de comprimento e altura de 2,50 metros, como representado na Figura 18b, o tabuleiro possui 2,50 metros de comprimento (Figura 18c), atendendo às recomendações do Manual de Projetos de Obras de Arte Especiais do DNER. O gabarito vertical de 6,75 metros segue as diretrizes do (DNIT ISF 219:2015), totalizando uma altura total de 9,66 metros.

Figura 15 - Representação da passarela



Fonte: (a), (b) e (c) Elaborado pelo autor, 2021.

## Perfil utilizado

Como a estrutura em questão encontra-se locada a 1,5 Km do cais do porto e sofre influências da maresia, optou-se pelo aço ASTM A572 com limite de escoamento ( $f_y$ ) de 350 MPa e Resistência à ruptura ( $f_u$ ) de 450 MPa, sendo classificado como Aço de Alta Resistência e Baixa Liga, tendo baixa porcentagem de Cobre em sua composição.

Este é um dos tipos de aço indicados para Obras de Artes Especiais, por ser um aço com maior resistência, mantendo sua ductilidade e por ter uma melhor performance que o aço carbono quando exposto às atmosferas agressivas. Em decorrência disso, há uma menor manutenção envolvida durante a vida útil do aço, acarretando em menores custos diretos (pelo ônus da manutenção em si) e indiretos (pela interdição para reparos).

Os banzos, por serem mais solicitados, serão compostos por perfis W 250 x 73 (H), enquanto as diagonais, montantes e travamentos superiores e inferiores, por perfis W 200 x 35,9 (H).

## Cálculo das informações preliminares

Nesta etapa calcula-se as ações externas que solicitam a estrutura.

## Cargas Permanentes (CP)

As cargas permanentes serão obtidas através das informações geradas pelo próprio software, uma vez que os elementos estruturais (lineares e de área) recebem informações quanto às características mecânicas que possuem, dentre elas figura a densidade do material usado. A partir desta informação e tendo também a seção transversal dos elementos, bem como o comprimento deles, o software realiza o cálculo da massa total da estrutura e de seu peso uma vez que possui o recurso da inserção do efeito da gravidade sobre a estrutura. Em consulta ao modelo verificou-se que a estrutura possui a carga permanente de 448,15 kN.

## Cargas de Vento (CV)

Para o Fator topográfico  $S_1$ , por se tratar de uma região urbana, com o terreno fracamente acidentado, adota-se o valor de 1,0. Já para o Fator estatístico  $S_3$ , adota-se o valor de 1,10 em consulta realizada ao quadro da Figura 19, que versa sobre as cargas de

vento em edificações. A adoção deste valor se dá pela passarela de pedestres se tratar de uma Obra de Arte Especial e estar locada sob a Avenida Presidente Vargas e que caso viesse à ruína acarretaria em potencial risco à vida tanto imediatamente aos pedestres e motoristas que trafegarão com seus veículos abaixo dela, como também imediatamente àqueles que precisarão usar a via virtude de caso fortuito.

Para o Fator  $S_2$  – que abrange a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação e altura sobre o terreno – para a rugosidade do terreno adota-se a Categoria IV por ser mais indicada para área urbanizada; para a dimensão da edificação adota-se a Classe B, já que a superestrutura foi dividida em dois módulos de 40 metros cada; para a altura sob o terreno adota-se 10 metros como arredondamento de 9,66 metros, respeitando o gabarito vertical indicado pelo DNIT de 6,75 metros com a adição da cota externa de 2,91 do módulo analisado. Tendo esses parâmetros preliminares adotados, procede-se então ao cálculo segundo a Equação 1 ou consulta-se o quadro da Figura 19. Por efeito prático e pela diferença de valores ser pequena, adotar-se-á consulta à tabela, obtendo o valor de 0,83.

Equação 1:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (1)$$

Figura 19 - Fator  $S_2$

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. Adaptado pelo autor, 2021.

Após isso, calcula-se a velocidade característica para a região. Em consulta às isopletas de velocidade percebe-se que o Estado do Rio de Janeiro se encontra entre duas velocidades básicas  $V_0$  diferentes, por segurança adota-se a maior velocidade: 35 m/s.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 35 * 1,0 * 0,83 * 1,10 \cong 32 \frac{m}{s}$$

Após o cálculo da velocidade característica é necessário obter o valor da pressão dinâmica do vento atuando na estrutura.

$$q_k = 0,613 \cdot V_k^2 = 0,613 * (32)^2 = 627,71 \frac{N}{m^2} = 0,63 \frac{kN}{m^2}$$

Tendo isso em mãos, procede-se ao cálculo da força de arrasto. Mas antes é necessário definir as variáveis às quais ela é dependente, de início determina-se o índice de área exposta. O cálculo será feito para uma unidade simples triarticulada, os nós que possuem o sistema triarticulado completo receberão o dobro dos valores calculados:

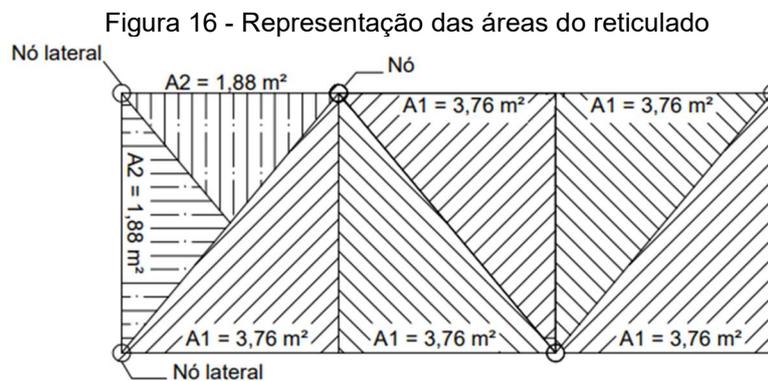
$$\phi = \frac{\frac{b * h}{2} * \frac{1}{2}}{b * h} = \frac{5,0 \text{ m} * 3,01 \text{ m}}{2} * \frac{1}{2} = 0,25$$

Para o coeficiente de arrasto em um reticulado isolado adota-se o valor de 1,8. Para o cálculo do reticulado protegido pelo reticulado à barlavento calcula-se o afastamento relativo ( $e/h$ ) e obtém-se o fator de proteção ( $\eta$ ) de 0,85.

$$\frac{e}{h} = \frac{2,5}{2,5} = 1,0$$

$$C_{an} = C_{a1}[1 + (n - 1)\eta] = 1,8 * [1 + (2 - 1) * 0,85] = 3,33$$

Conforme representado na Figura 20, os nós superiores e inferiores contam com duas áreas de 3,76 m<sup>2</sup>, já os nós localizados na lateral da treliça, formada pela continuidade do banzo superior e pelos montantes, conta uma área de 1,88 m<sup>2</sup>. Assim, haverá duas forças de arrasto atuando no módulo, a força de arrasto  $F_{v1}$  e a força de arrasto da aresta  $F_{v2}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

$$F_{v1} = C_{an}qA_e = 2 * 3,33 * 0,63 * 3,76 = 15,78 \text{ kN}$$

$$F_{v2} = C_{an}qA_e = 3,33 * 0,63 * 1,88 = 3,94 \text{ kN}$$

### Carga Móvel (CM)

A carga móvel pode ser obtida através de consulta à ABNT NBR 7188:2013, que versa sobre cargas móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Segundo o item 6.1 da Norma, a passarela deve receber a ação de 5 kN/m<sup>2</sup> sobre o pavimento, ou seja, local de trânsito dos pedestres, sem considerar o coeficiente de impacto vertical.

### Carga Excepcional (CE)

A carga excepcional pode ser obtida em consulta ao item 6.2 da ABNT NBR 7188:2013, que sugere uma carga pontual, horizontal e excepcional a ser aplicada no local mais desfavorável da passarela, no sentido do tráfego que ocorre abaixo da estrutura. Com essa imposição a Norma dá a entender que a passarela deve ser verificada também para uma colisão, mas logo informa que ainda assim a colisão pode ser tal que leve a estrutura

à ruína, trata-se, portanto, de uma mitigação, mas não anulação da possível ruína em virtude de choque.

## Combinções

Para o cálculo das combinações serão considerados os valores totais. Para as cargas permanentes será usado o valor do peso total auferido pelo próprio software.

### Combinções Últimas Normais (ELU)

Para as cargas móveis aplica-se a tensão de 5 kN/m<sup>2</sup> na área de 100 m<sup>2</sup> do tabuleiro – 40 m de comprimento por 2,50 m de largura – culminando na carga de 500 kN. Para as cargas de vento será usado o valor total relativo à aplicação nodal, 15,78 kN aplicada nos 15 nós e 3,94 kN aplicados nas 4 arestas do reticulado, resultando no valor de 252,46 kN. Para as cargas permanentes adota-se o valor de 448,15 kN.

Quadro 2 - Resultado das Combinções Últimas Normais no ELU

Estado-Comb.	Expressão	Verticais (kN)	Horizontais (kN)
ELU – 1	$F_d = 1,25. CP + 1,5. CM + (1,4.0,6. CV)$	1.310,19	212,07
ELU – 2	$F_d = 1,25. CP + 1,4. CV + (1,5.0,6. CM)$	1.010,19	353,44
ELU – 3	$F_d = 1,25. CP + 1,4. CV$	560,19	353,44
ELU – 4	$F_d = 1,25. CP + 1,5. CM$	1.310,19	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

### Combinção Última Excepcional (ELU)

Para as cargas permanentes, móveis e de vento segue-se as mesmas diretrizes das combinações últimas normais, com exceção da carga excepcional no valor de 100 kN, que não sofre nenhum tratamento.

Quadro 3 - Resultado das Combinção Última Excepcional no ELU

Estado-Comb.	Expressões	Verticais (kN)	Horizontais (kN)
ELU - 5	$F_d = 1,1. CP + CE + (1,0.0,6. CV + 1,0.0,6. CM)$	792,97	251,48

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

### Combinção de Serviço (ELS)

Para a combinação de serviço para carga permanente segue-se as mesmas

Quadro 4 - Resultado da Combinção de Serviço

Estado-Comb.	Expressões	Verticais (kN)
ELS - 1	$F_d = 1,1. CP + 0,3. CM$	642,97

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

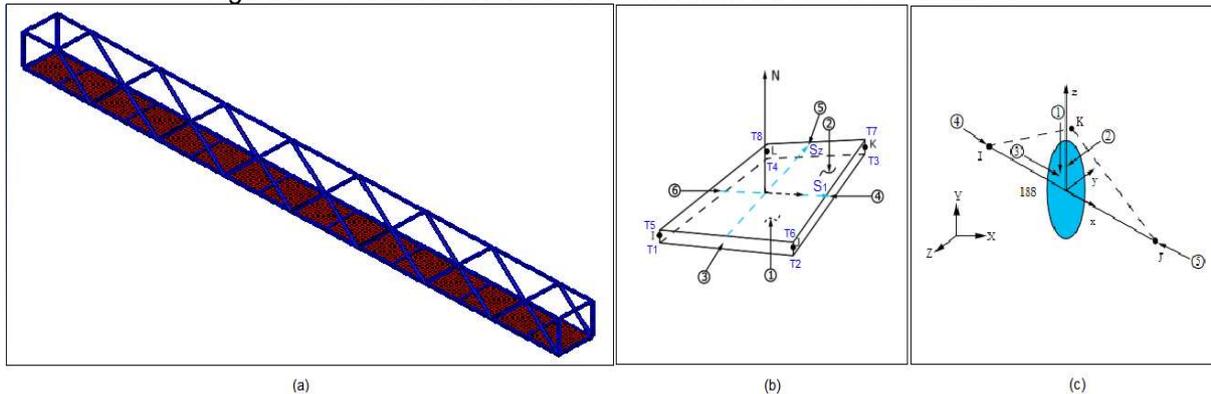
## Criação do modelo numérico

O módulo modelado é composto por dois elementos finitos distintos, beam188 para todos os elementos lineares - banzos superiores e inferiores, travamentos superiores e inferiores (transversinas), diagonais e montantes - shell181 para elementos de área (tabuleiro); ambos encontram-se representados na Figura 21. A vista isométrica do módulo analisado encontra-se na Figura 21a em que os corpos azuis representam os elementos

lineares (compostos pelo elemento finito beam188) e em vermelho os elementos de área (compostos pelo elemento finito shell181).

Os elementos finitos beam188 e shell181 encontram-se representados na Figura 21b e Figura 21c, respectivamente. O elemento de viga beam188 possui dois nós e seis graus de liberdade por nó, três relativos a translações e três rotações, nos três eixos (x, y e z), e são excelentes para representar o comportamento das vigas. Já o elemento de casca Shell181 possui quatro nós, com seis graus de liberdade por nó, três rotações e três translações, nos eixos x, y e z.

Figura 21 - Vista isométrica e elementos finitos Beam188 e Shell181



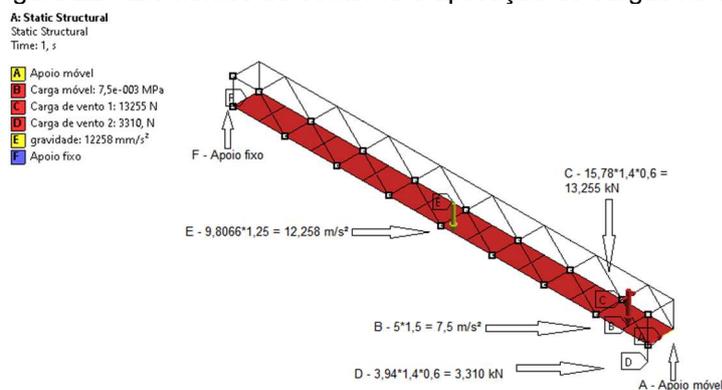
Fonte: (a) Elaborado pelo autor, 2021; (b) e (c) Ansys, 2021

## Aplicação das cargas e elementos de contorno no ELU-1

Na Figura 22 há a representação dos vínculos de apoio da estrutura e dos carregamentos no ELU-1. Conforme representado, submete-se o modelo elaborado aos carregamentos externos na combinação ELU-1, em que o vetor B representa o carregamento móvel já corrigido e as cargas de vento C e D, também corrigidas.

Nesta mesma combinação há, de maneira implícita, as ações relativas ao carregamento permanente, representado pelo peso da estrutura. Para o carregamento permanente agiu-se de maneira diferente visto que a aplicação de uma carga que representasse o peso da estrutura acarretaria em uma distorção dos esforços, nesta situação atribuiu-se uma aceleração da gravidade majorada em 25% para fazer jus ao fator de ponderação das ações permanentes – 1,25 – já que o software calcula o peso através do produto entre a massa dos elementos que compõem o modelo e a aceleração da gravidade.

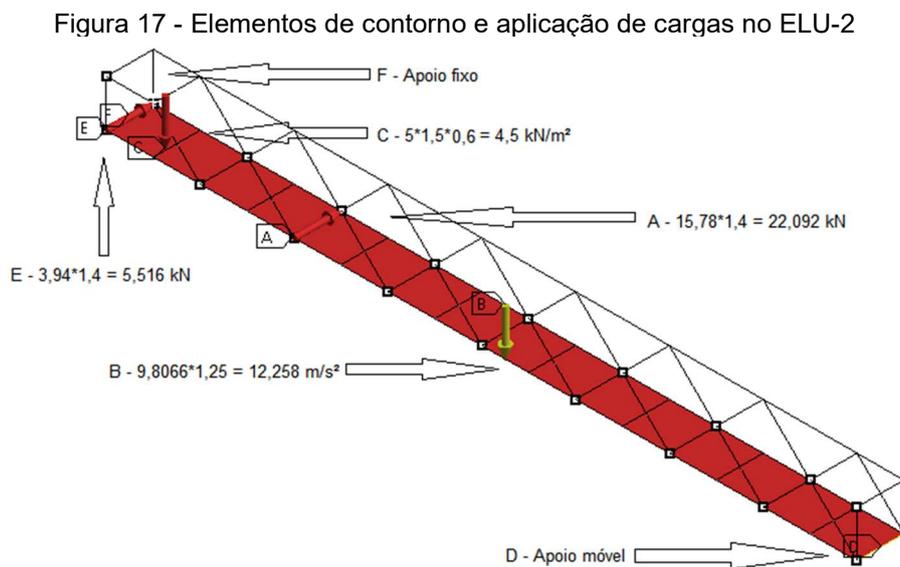
Figura 22 - Elementos de contorno e aplicação de cargas no ELU-1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

## Aplicação das cargas e elementos de contorno no ELU-2

Na Figura 23 há a representação dos vínculos de apoio da estrutura e dos carregamentos no ELU-2. Para esse modelo seguiu-se a mesma disposição explanada para o ELU-1, com a única diferença que no ELU-2 as cargas móveis atuam de modo secundário ao passo que as cargas devido aos ventos de modo principal, conforme explicado no item 3.4.5.1 deste trabalho e calculado no item 4.4.1.



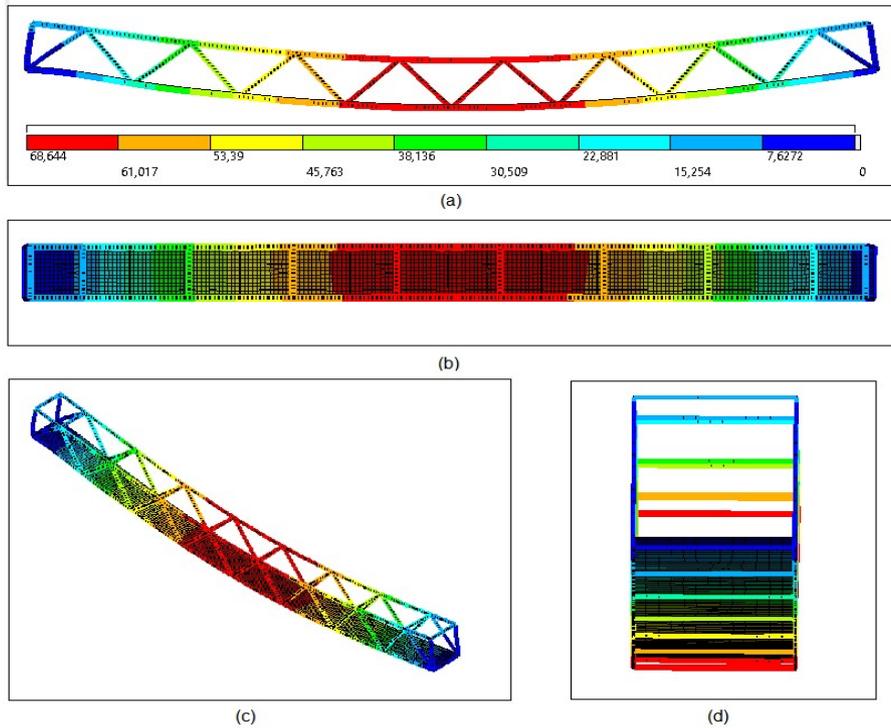
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

## Escolha da combinação

A análise da estrutura em Estados Limites Últimos usará a combinação ELU-1. Para essa escolha as combinações ELU-1 e ELU-2 foram aplicadas à estrutura a fim de verificar qual geraria o cenário mais desfavorável, uma vez que era necessário determinar a quão danosa seria a aplicação das cargas horizontais do ELU-2, que são maiores que o ELU-1.

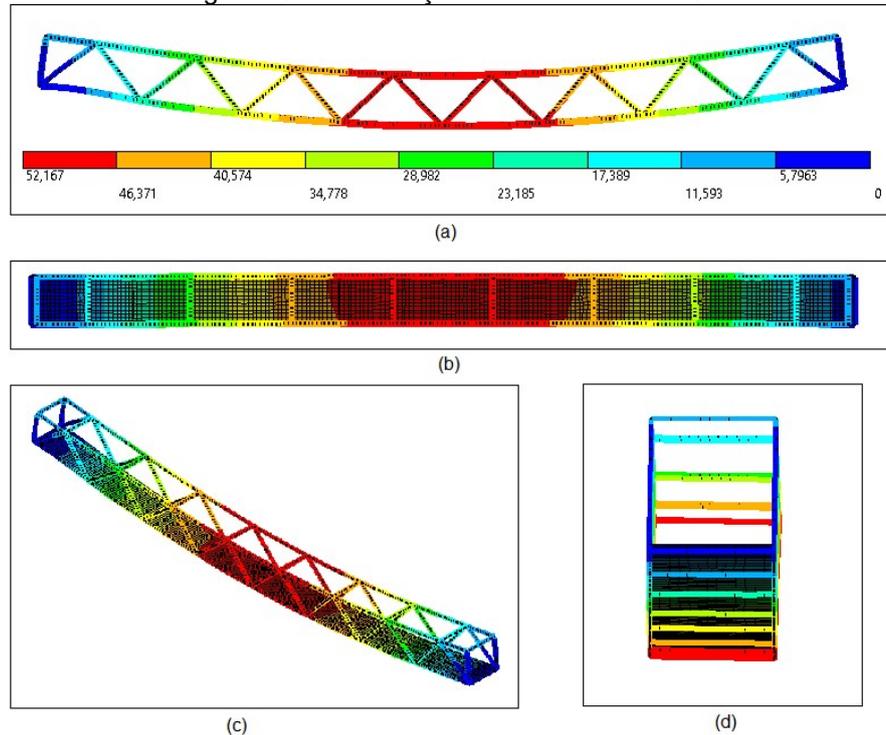
Na Figura 24 há a representação do modelo submetido aos esforços da ELU-1, em que se representa nas imagens a, b, c e d as vistas frontal, superior, isométrica e direita, respectivamente, a fim de melhor representar o comportamento do módulo frente aos carregamentos a que é submetido. Na Figura 25 há a representação do modelo submetido aos esforços da ELU-2, com as vistas frontal, superior, isométrica e direita, representada nas imagens a, b, c e d.

Figura 24 - Deformações do modelo no ELU-1



Fonte: (a), (b), (c) e (d) Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 25 - Deformações do modelo no ELU-2



Fonte: (a), (b), (c) e (d) Elaborado pelo autor, 2021.

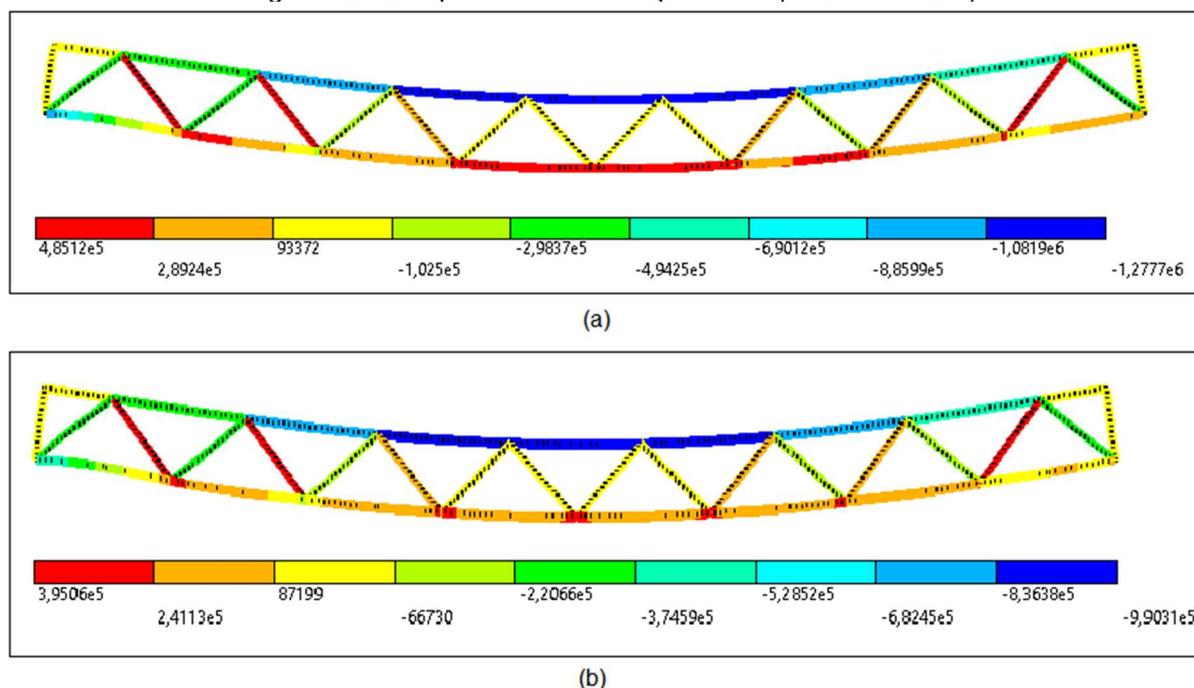
Conforme representado nas Figuras 24 e 25, o ponto crítico dos deslocamentos ocorre no centro da estrutura, que está sujeita ao maior deslocamento, ao passo que as partes próximas ao apoio estão sujeitas às menores deformações. Tal comportamento é explicado pela proximidade com os apoios. Destaca-se ainda que a extremidade à esquerda do treliçado possui uma parcela com menor deslocamento que a extremidade à

direita, isto se dá pelo apoio fixo (à esquerda) restringir dois graus de liberdade, enquanto que o apoio móvel (à direita) restringe apenas um.

Ao comparar o deslocamento de ambas as estruturas se percebe que a deformação relativa ao ELU-1 é preponderante, sendo 31% superior que o ELU-2. Tal resultado indica que há consonância com a Lei de Hooke uma vez que o carregamento vertical para o ELU-1 é 30% superior se comparado com o ELU-2.

Na Figura 26 há o comparativo entre os esforços axiais internos no ELU-2 (Figura 26a) e ELU-1 (Figura 26b). Entre os esforços de tração há uma diferença de 23%, ao passo que para os esforços de compressão a diferença é de 29%, ou seja, o ELU-1 é a combinação predominante. O comportamento de ambos os módulos está em consonância com a teoria acerca do comportamento de treliças do tipo Warren, em que seus banzos inferiores são tracionados em virtude do carregamento vertical que suportam, gerando a compressão dos banzos superiores e estes, por sua vez, acarretam em esforços axiais alternados nas diagonais, sendo os esforços de maior magnitude concentrados nas diagonais mais externas enquanto que as diagonais internas (mais próximas do centro) submetidas aos esforços axiais de menor magnitude.

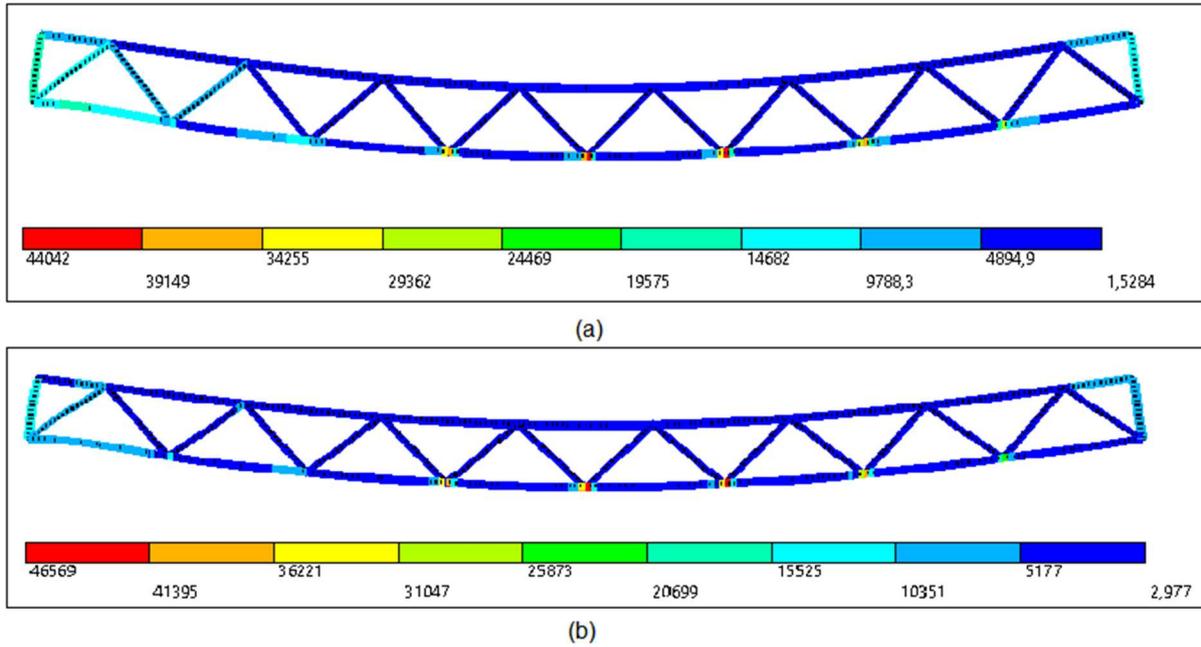
Figura 26 - Comparativo dos esforços axiais (ELU-2 e ELU-1)



Fonte: (a) e (b) Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 27 mostra o comparativo dos esforços cortantes para o ELU-1 (Figura 27a) e ELU-2 (Figura 27b). O maior esforço cortante ocorre para o ELU-2, sendo 6% superior ao maior esforço cortante no ELU-1, isto se dá pelas diagonais descarregarem seus esforços axiais nos banzos, culminando em esforços cortantes, sendo intensificados pela aplicação das cargas horizontais de vento, que para o ELU-2 são 66% superiores. Outro ponto de destaque é que os montantes dos módulos de ambas as combinações, se maneira geral, são mais solicitados que o resto do treliçado, isto se dá devido à proximidade com os apoios.

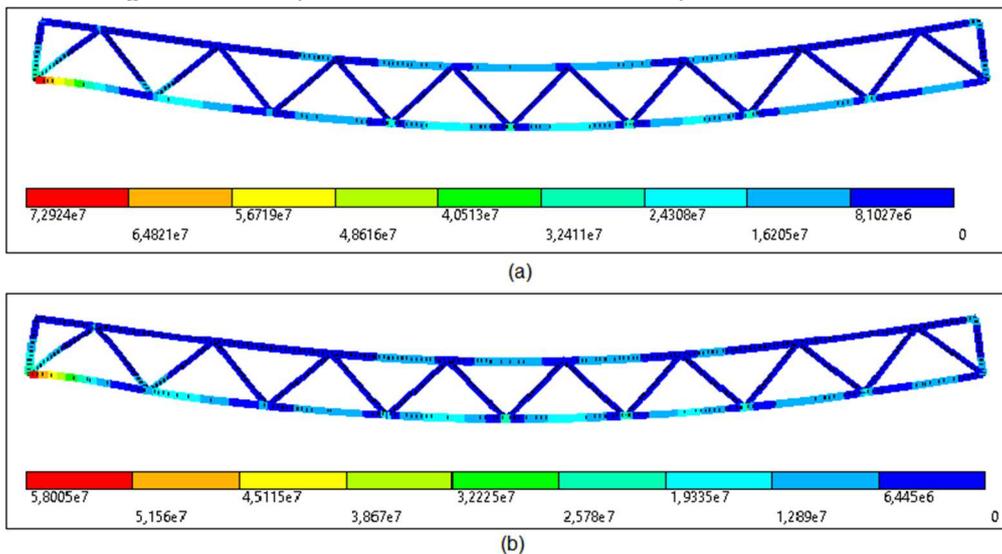
Figura 27 - Comparativo de esforços cortantes para as combinações ELU-2 e ELU-1



Fonte: (a) e (b) Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 28 representa os momentos fletores segundo o ELU-1 (Figura 28a) e ELU-2 (Figura 28b). O maior momento fletor ocorre para o ELU-1 sendo superior em 26%, apesar do treliçado estar biapoado não se deve analisá-lo a luz da analogia de viga biapoada, uma vez que essa concentra seu momento máximo no meio do vão, mas sim como uma sucessão de vigas biapoadas cujo comprimento coincide com o comprimento de flambagem de cada elemento dos banzos. Deve-se destacar também que há uma concentração de momentos próximo ao poio fixo, tal ocorrência explica-se pelas diagonais, apesar de atuarem preponderantemente sob esforços axiais, também sofrem momentos, tal qual os montantes, que impõe ao nó uma necessidade de equilibrar os esforços, gerando ali este momento fletor concentrado.

Figura 28 - Comparativo dos momentos fletores para ELU-2 e ELU-1



Fonte: (a) e (b) Elaborado pelo autor, 2021.

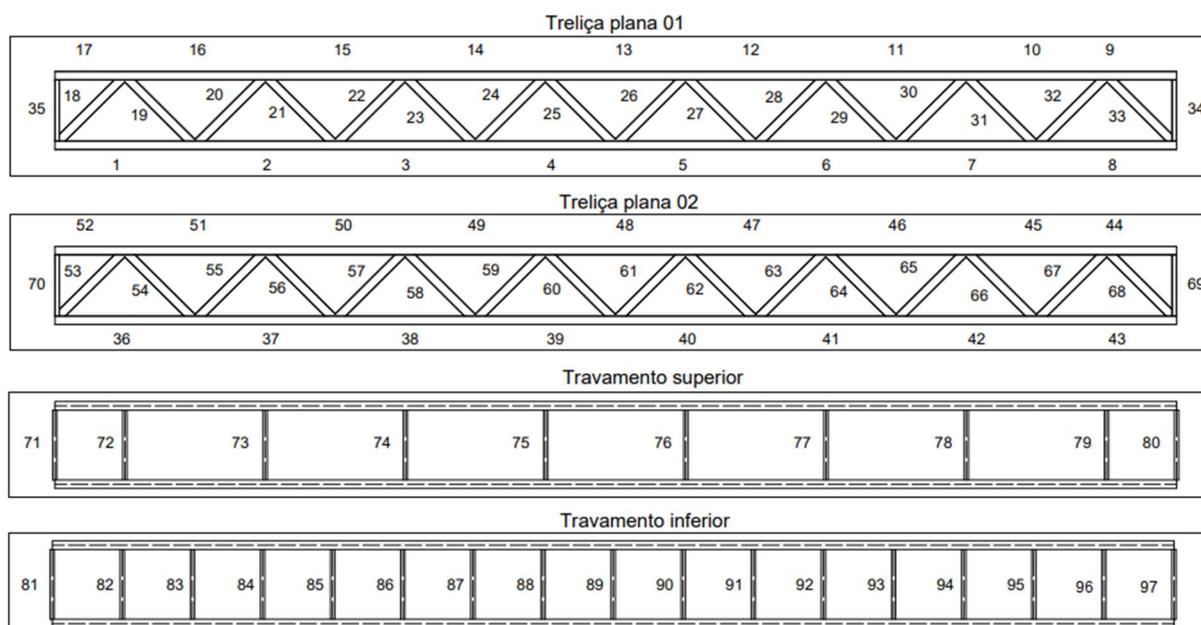
## Escolha da malha

A dimensão dos elementos finitos escolhida para a geração da malha foi de 200 mm, apesar da licença do modelo permitir a malha de até 100 mm para esta estrutura, ao gerar a malha percebeu-se que a diferença entre os valores era muito pequena, de modo a não fazer jus ao esforço computacional adicional dispendido. O modelo em questão consumiu 2590 elementos Shell181, 1781 elementos beam188, totalizando 4371 elementos e 5892 nós.

## Verificação relativa ao ELU

As verificações serão realizadas para toda a estrutura, elemento por elemento. Para que o trabalho não se torne árido devido ao processo repetitivo dos muitos elementos a serem verificados, apenas será demonstrado analiticamente o dimensionamento de 2 banzos, 2 diagonais e 1 montante, os banzos e diagonais são submetidos à tração e compressão enquanto que o montante somente à tração. A partir desse dimensionamento replica-se os valores para toda a estrutura, uma vez que os banzos são compostos por uma única seção transversal, como as diagonais. Os montantes, e travamentos superiores e inferiores trabalham unicamente à tração, possuem a mesma seção transversal e têm o mesmo comprimento destravado, de modo que seus valores resistentes são idênticos, possibilitando a réplica dos resultados.

Figura 29 - Representação da estrutura a ser dimensionada numerada



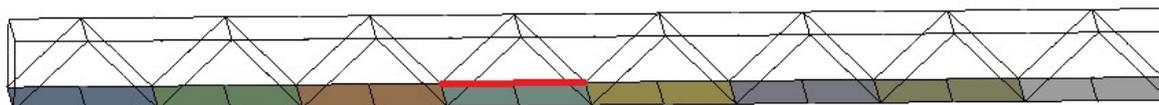
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A Figura 29 representa todos os elementos enumerados que compõe o módulo analisado.

## Esforços solicitantes do elemento 39

O quadro 5 representa um resumo dos esforços solicitantes do elemento 39, que é o elemento do banzo mais solicitado à tração, é composto por perfil laminado Gerdau de seção W 250 x 73, série H, conformado em aço A572 Grau 50. A posição do elemento 39 pode ser consultada na Figura 29, que representa a enumeração dos elementos da treliça espacial, ou na Figura 30, que apresenta o elemento em destaque no modelo numérico.

Figura 30 - Destaque do elemento 39



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 5 – Quadro resumo de esforços solicitantes do elemento 39 – seção transversal W250x73(H)

Tipo	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
	$N_t$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
Máx.	+ 485,13	30,26	14,42	183,77	30,81
Mín.	-	- 41,61	- 19,29	- 276,67	- 99,98

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

## Dimensionamento analítico do elemento 39

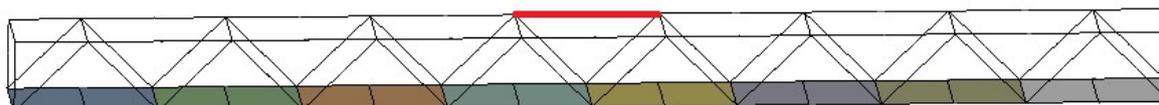
Trata-se do banzo mais solicitado, cujo esforço axial preponderante é a tração, por isso, uma vez aprovado nas verificações permite repetir seus esforços resistentes para todos os elementos dos banzos submetidos à tração, o que ocorre majoritariamente nos banzos inferiores e dos banzos superiores vinculados aos montantes.

O perfil atente às verificações do ELU conforme preconiza a ABNT NBR 8800:2008 com a utilização de 11% do perfil quanto aos esforços combinados de compressão e momentos fletores.

## Esforços solicitantes do elemento 48

O quadro 6 representa um resumo dos esforços solicitantes do elemento 48, que é o elemento das mais solicitado à compressão dos banzos, é composto per perfil laminado Gerdau de seção W 250 x 73, série H, conformado em aço A572 Grau 50. A posição do elemento 48 pode ser consultada na Figura 29, que enumera cada elemento que compõe a o módulo treliçado, ou na Figura 31, que representa o elemento em destaque.

Figura 31 - Destaque do elemento 48



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 6 – Quadro resumo de esforços atuantes no elemento 48 – seção transversal W200x35,9 (H)

Tipo	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
	$N_t$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
Máx.	-	0,37	2,33	96,84	1,26
Mín.	-1.278,00	- 0,38	- 2,07	66,03	0,09

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

### Dimensionamento analítico do elemento 48

Trata-se do banzo mais solicitado, cujo esforço axial preponderante é a compressão, por isso, uma vez aprovado nas verificações permite repetir seus esforços resistentes para todos os elementos dos banzos submetidos à compressão, o que ocorre majoritariamente nos banzos superiores, com a única exceção dos banzos próximos aos montantes – que estão solicitados à tração – e ao banzo inferior próximo ao apoio fixo.

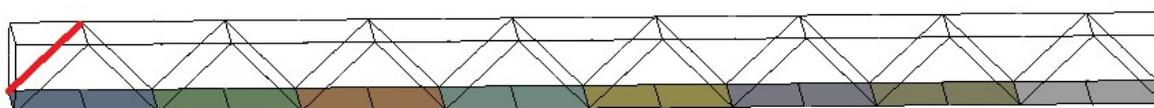
Algo a se destacar é que apesar do banzo inferior submetido à compressão possuir comprimento de esbeltez para o eixo x diferente dos banzos superiores, ainda assim se beneficia deste dimensionamento, uma vez que a força axial de flambagem a ser considerada é a menor atuante, e isto ocorrerá para no eixo y, que possui o mesmo comprimento de flambagem que os demais elementos dos banzos superiores que funcionam como bielas.

O perfil atende às verificações do ELU conforme preconiza a ABNT NBR 8800:2008 com a utilização de 68% do perfil quanto aos esforços combinados de compressão e momentos fletores.

### Esforços solicitantes do elemento 53

O quadro 7 representa um resumo dos esforços solicitantes do elemento 53, que é o elemento da diagonal mais solicitado à compressão, é composto por perfil laminado Gerdau de seção W 200 x 35,9, série H, conformado em aço A572 Grau 50. A posição do elemento 53 pode ser consultada na Figura 29, que representa a posição dos elementos de maneira global, ou na Figura 32, que apresenta o elemento dimensionado em destaque.

Figura 32 - Elemento 53 em destaque



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 2 - Quadro resumo de esforços solicitantes no elemento 53 - seção transversal W200x35,9 (H)

Tipo	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
	$N_c$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
Máx.	-	0,29	17,21	101,94	4,79
Mín.	- 494,38	- 0,58	- 2,96	- 346,02	- 7,35

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

### Dimensionamento analítico do elemento 53

Trata-se da diagonal mais solicitada, cujo esforço axial preponderante é a compressão, por isso, uma vez aprovado nas verificações permite repetir seus esforços resistentes para todos os elementos das diagonais submetidos à compressão o que ocorre

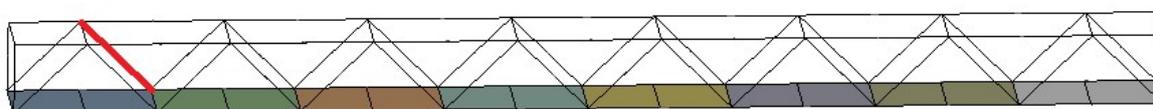
alternadamente nas diagonais que compõem o modelo, comportamento comum em treliças.

O perfil atende às verificações do ELU conforme preconiza a ABNT NBR 8800:2008 com a utilização de 72% do perfil quanto aos esforços combinados de compressão e momentos fletores.

### Esforços solicitantes do elemento 54

O quadro 8 representa um resumo dos esforços solicitantes do elemento 54, que é o elemento mais solicitado à tração, é composto por perfil laminado Gerdau de seção W 200 x 35, 9, série H, conformado em aço A572 Grau 50. A posição do elemento 54 pode ser consultada na Figura 29 que apresenta a enumeração dos elementos que compõe o módulo reticulado, ou ainda na Figura 33, que representa o modelo numérico criado.

Figura 33 - Destaque do elemento 54



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 8– Quadro resumo de esforços atuantes no elemento 54 – seção transversal W200x35,9(H)

Tipo	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
	$N_t$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
Máx.	+ 485,13	0,29	10,68	143,72	143,69
Mín.	-	- 0,32	- 6,03	- 128,32	- 128,32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

### Dimensionamento analítico do elemento 54

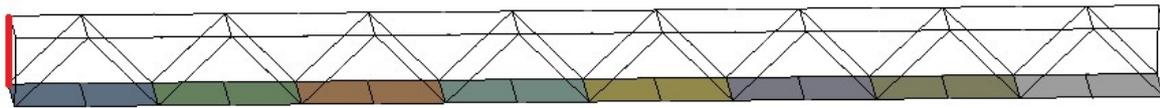
Trata-se da diagonal mais solicitada, cujo esforço axial preponderante é a tração, por isso, uma vez aprovado nas verificações permite repetir seus esforços resistentes para todos os elementos das diagonais submetidos à tração, o que ocorre alternadamente nas diagonais que compõem o modelo, comportamento comum em treliças.

O perfil atende às verificações do ELU conforme preconiza a ABNT NBR 8800:2008 com a utilização de 37% do perfil quanto aos esforços combinados de tração e momentos fletores.

### Esforços solicitantes do elemento 70

O quadro 9 representa um resumo dos esforços solicitantes do elemento 70, que dentre os travamentos, seja superior, seja inferior e montantes figura como o elemento mais solicitado à tração. Este elemento é composto por perfil laminado Gerdau de seção W 200 x 35,9, série H, conformado em aço A572 Grau 50. A posição do elemento 70 enumera os elementos que compõem a treliça espacial, ou na Figura 34, em que há o destaque do elemento dimensionado.

Figura 34 - Destaque do elemento 70



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Quadro 9 – Quadro resumo de esforços atuantes no elemento 70– seção transversal W 200 x 35,9 H

Tipo	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
	$N_t$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
Máx.	93,33	- 0,21	17,21	84,18	7,13
Mín.	-	- 0,58	11,76	- 346,02	- 7,35

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

## Dimensionamento analítico do elemento 70

Trata-se do montante mais solicitado, cujo esforço axial preponderante é a tração. O dimensionamento deste elemento permite repetir seus esforços resistentes para todos os elementos dos montantes e travamentos superiores e inferiores, uma vez que todos trabalham à tração e possuem o mesmo comprimento de flambagem.

O perfil atende às verificações do ELU conforme preconiza a ABNT NBR 8800:2008 com a utilização de 11% do perfil quanto aos esforços combinados de tração e momentos fletores.

## Quadro comparativo dos esforços solicitantes e resistentes

O Quadro 10 faz um compilado dos esforços solicitantes e resistentes calculados para os elementos 39 e 48 dos banzos.

Quadro 10 – Resumo dos esforços solicitantes e resistentes para os elementos 39 e 48

Elemento	Esforço	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
		N (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
39	Solicitante	+ 485,12	- 41,61	- 19,29	- 276,67	- 99,98
	Resistente	2.907,41	409,48	1.357,54	14.372,38	14.524,50
D% = sol. / Res.		<b>16,69</b>	10,16	1,42	1,92	0,69
48	Solicitante	- 1.277,70	- 0,04	2,33	96,84	1,26
	Resistente	1.889,82	409,48	1.357,54	14.372,38	14.524,50
D% = sol. / Res.		<b>67,61</b>	0,00	0,17	0,67	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O Quadro 11 faz um compilado dos esforços solicitantes e resistentes calculados para os elementos 53 e 54, elementos diagonais.

Quadro 11 - Resumo dos esforços solicitantes e resistentes para os elementos 53 e 54

Elemento	Esforço	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
		N (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x$ (kN)	$M_y$ (kNcm)	$M_x$ (kNcm)
53	Solicitante	- 494,25	- 0,58	17,21	- 346,02	- 7,35
	Resistente	759,66	234,47	633,42	4.422,27	4.356,41
D% = sol. / Res.		<b>65,06</b>	0,25	2,72	7,82	0,17
54	Solicitante	+ 485,12	- 0,32	10,68	143,69	- 6,72
	Resistente	1.433,32	234,47	633,42	4.422,27	4.356,41

D% = sol. / Res.	<b>33,85</b>	0,14	0,56	1,69	0,15
------------------	--------------	------	------	------	------

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O Quadro 12 faz um compilado dos esforços solicitantes e resistentes calculados para o elemento 70 – montante.

Quadro 12 - Resumo dos esforços solicitantes e resistentes para o elemento 70

Elemento	Esforço	Esforço Axial	Esforços Cortantes		Momentos Fletores	
		N (kN)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>x</sub> (kN)	M <sub>y</sub> (kNcm)	M <sub>x</sub> (kNcm)
70	Solicitante	+ 93,37	- 0,58	17,21	- 346,02	- 7,35
	Resistente	1.433,32	234,47	633,42	4.422,27	4.356,41
D% = sol. / Res.		6,51	0,25	2,72	<b>7,82</b>	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

## Verificação relativa ao ELS

Conforme preconiza o Anexo C da ABNT 8800:2008, o deslocamento vertical máximo deve ser verificado como uma das vertentes do Estado Limite de Serviço. Segundo a tabela C.1 da Norma, para a treliça como um todo adota-se o critério para viga de piso.

$$\delta_{m\acute{a}x} \leq \frac{L}{350} \rightarrow 68,644 \text{ mm} \leq \frac{40000}{350} = 114,28 \text{ mm}$$

Como 68,644 mm << 114,28 mm, o módulo reticulado atende ao deslocamento vertical máximo.

## CONCLUSÃO

A análise estrutural elaborada neste trabalho permite que sejam desenvolvidas etapas mais avançadas de projeto, como por exemplo as verificações de ligações e detalhamentos seguido do projeto de montagem. A viabilidade técnica se mostrou satisfatória ao vencer o vão de 80 metros da avenida Presidente Vargas com os módulos espelhados de 40 metros da superestrutura, atendendo tanto ao Estado-Limite Último, com a combinação de esforços solicitantes máxima de 58% do perfil, como ao Estado-limite de Serviço, mostrando que vão maiores podem facilmente ser vencidos com estruturas simples, como treliças. Contudo a análise de vibração forçada pode causar o fenômeno do desconforto humano associado aos grandes deslocamentos e em alguns casos a ressonância estrutural. Este projeto de pesquisa não apresenta a análise dos modos de vibração e o seu impacto na rigidez estrutural.

Quanto ao módulo analisado, se verificou que a solicitação pelos carregamentos externos provocou o aparecimento de esforços internos, cujos valores expressivos se limitavam aos esforços axiais de tração e compressão, corroborando o mecanismo de trabalho de treliças. Nas análises verificou-se que o esforço axial absoluto ocorreu nos banzos superiores de ambas as treliças planas em virtude das cargas verticais gerarem a deflexão vertical da estrutura, que por sua vez sofreu tração nos banzos inferiores, culminando na compressão dos banzos superiores.

De maneira secundária, o maior esforço cortante ocorre na diagonal 60 da treliça plana 02 e se dá por estar localizado no meio do vão e, portando, submetido aos esforços que a deflexão do conjunto gera, tendo como agravante a aplicação pontual da carga de vento. O maior momento fletor ocorreu no banzo inferior 36 da treliça plana 02 e se deu

pela proximidade do elemento com o apoio do segundo gênero, diminuindo a capacidade daquele de sofrer os efeitos do momento.

O material escolhido, aço A572 Gr. 50 foi de grande valia ao permitir que a passarela de pedestres fosse composta por estruturas de seção transversal menores, atendendo à esbeltez característica das obras de arte especiais. Em contrapartida, quanto menores as seções transversais, menor o peso próprio da estrutura e com isso, maior a probabilidade da ocorrência de ressonância já que o menor peso próprio está relacionado a menor capacidade de resistência.

Para dirimir este inconveniente, sugere-se que os próximos trabalhos verifiquem se a superestrutura da passarela em questão atende ao estado-limite de vibrações excessivas quanto a ação dinâmica dos ventos e ação dinâmica do caminhar humano e de corrida. A análise frente a corrida se faz necessária uma vez que a locação da passarela de pedestres se encontra próximo a uma escola municipal e sujeita às ações dinâmicas de corrida durante uma eventual brincadeira entre as crianças e também pela proximidade com o “Terreirão do Samba” e o Sambódromo, locais de realização de eventos, podendo gerar um caminhar apressado/ corrida das pessoas.

Ainda em relação às vibrações excessivas, deve-se verificar se a frequência natural da estrutura é superior a frequência crítica de 5,4 Hz em virtude da vibração gerada por pessoas. Caso não seja, sugere-se verificar a viabilidade econômica de aumentar a rigidez da estrutura através de seções transversais maiores para aumentar a resistência à vibração ou verificar a viabilidade de implementar amortecedores para diminuir a suscetibilidade da estrutura às vibrações. Afastar a frequência natural da estrutura da frequência que a solicita diminui o desconforto humano e diminui a probabilidade da ocorrência de ressonância. Nesta mesma linha, deve-se verificar se a estrutura atende aos estado-limite último de fadiga, uma vez que o ponto de locação da passarela está circundado por pontos que podem gerar alta demanda.

Sugere-se ainda que os próximos trabalhos realizem o dimensionamento da mesoestrutura e escadas para acesso, bem como que verifiquem a viabilidade de adequar elevadores como uma forma alternativa de promover a acessibilidade aos pedestres que padecem com a mobilidade limitada, seja por possuírem idade avançada, seja por deficiência física.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAWADHI, E. M. **Finite Element Simulation Using ANSYS**. 2ª ed. New York: CRC Press, 2016.

ALTABEY, W. A.; NOORI, M.; WANG, LIBIN. **Using ANSYS for Finite Element analysis: a tutorial for engineers**. EUA: Momentum Press, 2018. v.1.

Ansys Inc., **Ansys 2020 R2**, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS. A primeira ponte em aço do brasil: atravessando séculos. 09 de abr. de 2019. Disponível em: <<https://www.abcem.org.br/site/noticias/primeira-ponte-em-aco-do-brasil-atravesando-seculos>>. Acessado em: 05 de out. de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15980**: Perfis Laminados de Aço para Uso Estrutural – Dimensões e Tolerâncias. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaço e equipamentos urbanos Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9077**: Saída de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 1993.

AULETE, C. **Minidicionário contemporâneo da Língua Portuguesa**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Lexikon, 2009.

Autodesk, **AutoCAD 2019**, 2020.

BAREIRO, W. G. **Estudo e Modelagem de Estruturas Treliçadas utilizadas em Galpões Industriais Considerando Imperfeições Iniciais e Efeitos de Segunda Ordem**. 2016. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: < <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=26671@1>>. Acesso em 07 de abr. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 535, de 17 de junho de 2015. Estabelece a obrigatoriedade da adoção de freios antitravamento de rodas. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/resolucao5352015.pdf>>. Acesso em 20 de mar. de 2021.

BRASIL. Lei nº 10.098, de 19 de dezembro de 2000. Estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 dez. 2000. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L10098.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L10098.htm)>. Acesso em 30 de mar. de 2021.

BRASIL. Lei Nº 11.705, de 19 de junho de 2008. Altera o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 jun. 2008. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2008/Lei/L11705.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Lei/L11705.htm)>. Acesso em 20 de mar. de 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Programa 9989**. Brasília, 2010. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/Sistematicas/2010/Sistematica2010Programas9989e1078.pdf>>. Acesso em: 20 de mar. 2021.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHEN, X.; LIU, Y. **Modeling and simulation with ansys workbench**. New York: CRC Press, 2015.

CISMASIU, C. **Método dos elementos finitos**, Lisboa, 2014-2015, 183 slides. Disponível em: <[http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S\\_Estruturas/Elementos\\_finitos/MEF.pdf](http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Elementos_finitos/MEF.pdf)>. Acesso em: 01 de abr. 2021.

DEBONA, G. L. **Modelagem do comportamento dinâmico de passarelas tubulares em aço e mistas (aço-concreto)**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/nova/files/dissertacoes/46.pdf>>. Acesso em 08 de abr. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **Guia de Redução de Acidentes com Base em medidas de Engenharia de Baixo Custo**. Brasil, 1998. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/703\\_guia\\_de\\_reducao\\_de\\_acidentes.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/703_guia_de_reducao_de_acidentes.pdf). Acesso em: 20 de mar de 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **Manual de Projeto de Obras de Arte Especiais**. Brasil, 1996. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/698\\_manual\\_de\\_projeto\\_de\\_obras\\_de\\_arte\\_especiais.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/698_manual_de_projeto_de_obras_de_arte_especiais.pdf). Acesso em: 20 de mar. de 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **IPR-735**: Equipamentos redutores de velocidade e seus efeitos sobre os acidentes nas rodovias federais. Brasil, 2010. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/735\\_redutores\\_velocidade.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/735_redutores_velocidade.pdf). Acessado em: 31 de mar. de 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **IPR-740**: Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. Brasil, 2010. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/740\\_manual\\_projetos\\_geometricos\\_travessias\\_urbanas.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/740_manual_projetos_geometricos_travessias_urbanas.pdf). Acessado em: 19 de mar. de 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **IPR-748**: Álbum de projetos-tipo de passarelas para pedestres: memória de cálculo. Brasil, 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/outros-documentos/748\\_album-de-projetos-tipo-de-passerelas-para-pedestres\\_vol\\_2.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/outros-documentos/748_album-de-projetos-tipo-de-passerelas-para-pedestres_vol_2.pdf). Acesso em: 05 de abr. de 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **ISF-219**: Projeto de passarela para pedestres. Brasil, 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-219-projeto-de-passerela-para-pedestres.pdf>>. Acesso em: 02 de jan. de 2021.

DIAS, F. T. *et al.* **Método dos Elementos Finitos**: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia. Lisboa: ETEP, 2007.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço**: conceitos, técnicas e linguagem. São Paulo: Zigurate editora, 2008.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Person, 2016.

FIALHO, A. P. F. **Passarelas Urbanas em Estruturas de Aço**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6242>>. Acesso em: 23 out. 2020.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos**: a base da tecnologia CAE. São Paulo: Érica, 2000.

FRANCO, Y. V. **Análise de uma modelagem para passarelas de pedestres sobre rodovias**. 2015. 98 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6118/1/PB\\_COECI\\_2015\\_2\\_32.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6118/1/PB_COECI_2015_2_32.pdf)>. Acesso em: 20 de mar. 2021.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Gerdau – Disponível em <<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>> Acesso em: 01 de abr. de 2021.

GOMES, M. I. S. **Estudo e análise de treliças**. Lisboa, 2016. (Notas de aula do curso de estática do Instituto Politécnico de Lisboa). Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Idalia\\_Gomes/publication/301298120\\_Estudo\\_e\\_Analise\\_de\\_Trelicas/links/5710e65608ae846f4ef05472/Estudo-e-Analise-de-Trelicas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Idalia_Gomes/publication/301298120_Estudo_e_Analise_de_Trelicas/links/5710e65608ae846f4ef05472/Estudo-e-Analise-de-Trelicas.pdf)>. Acesso em: 05 out. 2020.

GOOGLE EARTH. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-22.90628267,-43.19509579,3.88791733a,153.66955815d,35y,-102.47640262h,49.55762814t,-0r>>. Acesso em 29 de out. de 2020.

GOOGLE MAPS. **Rio de Janeiro – RJ**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9065214,-43.1953544,19z>>. Acesso em: 29 de out. de 2020.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/000738379>>. Acesso em: 30 de mar. de 2021.

INSTITUTO DE SEGURANÇA PÚBLICA. **Dossiê Trânsito**, 3ª ed. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <[http://arquivos.proderj.rj.gov.br/isp\\_imagens/Uploads/DossieTransito2019.pdf](http://arquivos.proderj.rj.gov.br/isp_imagens/Uploads/DossieTransito2019.pdf)>. Acesso em: 18 de mar. 2021.

KEIL, A. **Pedestrian Bridges**: Ramps, walkways, structures. Munique: Detail, 2013.

LEBET, J. P., HIRT, M. A. **Steel bridges**: Conceptual and Structural Design of Steel and Steel-Concrete Composite Bridges. Lausanne: EPFL, 2013.

LEET, M. K. *et al.* **Fundamentals of Structural Analysis**. New York: McGraw-Hill, 2018.

LIMA, L. R. O. **Treliças**. Rio de Janeiro, 2020?. (Notas de aula do curso de Resistência dos Materiais IV da Universidade Estadual do Rio de Janeiro). Disponível em: <<http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/trelicas.pdf>>. Acesso em: 01 de abr. de 2021.

MADENCI, E; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®**. 2ª ed. New York: Springer, 2015.

MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas**: Conceitos e métodos básicos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

McCORMAC, J. C.; CSERNAK, S. F. **Structural Steel Design**. 5ª ed. England: Person, 2012.

MELO, H. G. **Corrosão em frestas**, São Paulo, [2020?], 21 slides. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5346409/mod\\_resource/content/1/CORROSAO%20EM%20FRESTAS\\_2020.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5346409/mod_resource/content/1/CORROSAO%20EM%20FRESTAS_2020.pdf)>. Acesso em 30 de mar. de 2021.

MERIAN, J. L.; KRAIGE, L. G. **Mecânica para a engenharia**: estática. 6ª ed. LTC, 2011.

MORAES, V. M. **Ponte mista de madeira-concreto em vigas treliçadas de madeira**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91472/moraes\\_vm\\_me\\_ilha\\_prot.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91472/moraes_vm_me_ilha_prot.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 06 de out. de 2020.

WHO. World Health Organization. **Global Status Report on Road Safety**: 2018. Disponível em <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>>. Acesso em: 20 de mar. de 2021.

PANNONI, F. D. **Princípio da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 6ª ed. [s.l.]: Gerdau, 2015. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais>>. Acesso em: 30 de mar de 2021.

PANNONI, F. D. **Projeto e durabilidade**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CBCA; IAB, 2017.

PEREIRA, R. S. **Ligações em estruturas de aço utilizando emendas com parafusos de alta resistência solicitadas na flexão simples**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Goiás, Goiânia, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3997>>. Acesso em: 18 abr. 2021.

Perfilor – Disponível em <<https://perfilor.com.br/downloads>> Acesso em: 04 de maio de 2021.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço**: Dimensionamento Prático. 8º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHO, F. O.; BELLEI, I. H. **Pontes e Viadutos em Vigas Mistas**. Rio de Janeiro: CBCA, 2008.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL: banco de dados. Disponível em: <<https://www.gov.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-acidentes>> Acesso em: 05 de abr. 2021.

RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering**. 6º ed. EUA: Elsevier, 2018.

REBELLO, Y. C. P. **A concepção estrutura e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate, 2000.

RIO DE JANEIRO (Município). Companhia de Engenharia de Tráfego. Diretoria de Desenvolvimento. Gerência de Informações de Tráfego. **Volume Diário de Veículos das Principais Vias do Município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/859227/4103802/Volumediariodeveiculosnasprincipaisviasdacidade.pdf>>. Acesso em: 02 de abr. 2021.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. **Steel structures desing and behavior**: emphasizing load and resistance factor desing. 5º ed. EUA: Pearson, 2009.

SANTOS, F. V., CARNEIRO, J. R. G. Avaliação das propriedades mecânicas e da resistência à corrosão eletroquímica do aço A572 e de juntas soldadas. **Revista perspectiva online: exatas e engenharia**, Campo dos Goytacazes, v. 09, N. 25, p. 20-48, 2019. Disponível em [https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas\\_e\\_engenharia/issue/view/112](https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/issue/view/112). Acesso em: 18 abr. 2021.

SANTOS, J. S. **Desconstruindo projeto estrutura de edifícios- concreto armado e protendido**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SHACKELFORD, J. F. **Ciências dos materiais**. 6ª ed. São Paulo: Pearson, 2008.

- SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2 ed. São Paulo: Eletrometal, 1988.
- SILVA, T. B.; LIMA JR, E. T. Confiabilidade estrutural aplicada a modelos numéricos de treliça plana em regime elastoplástico. **Revista Eletrônica Ciência & Engenharia**, Uberlândia, v. 25. N. 2, p. 87-93, 2016. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/36312/20132>>. Acesso em: 24 out. 2020.
- SIMMONS, D. A. Confusion Of a Truss Type. **Historic Bridge Bulletin**, Texas, v. 4, n. 3, p. 2-5, mar. 2017. Disponível em: <<https://historicbridgefoundation.com/features/bulletin/hbfbulletin1117.pdf>>. Acesso em: 07 de abr. 2021.
- SORIANO, L. H. **Estática das estruturas**. São Paulo: Ciência Moderna, 2013.
- SOUZA, A. S. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.
- SOUZA, M. F. S. M.; RODRIGUES, R. B. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Campinas, 2008. (Apostila do curso de Sistemas Estruturais da Universidade Estadual de Campinas). Disponível em: <[http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/sistemas\\_estruturais\\_grad.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/sistemas_estruturais_grad.pdf)>. Acesso em: 24 out. de 2020.
- STANDERSKI, R. **Ação Estática do vento em tabuleiros de pontes**: caracterização aerodinâmica em túnel de vento. 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75907/000891604.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 23 out. 2020.
- SUSSEKIND, J. C. **Curso de análise estrutural**: estruturas isostáticas. 11º ed. Rio de Janeiro: Globo, 1991. v. 1.
- TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**. Rio de Janeiro: LTC, 1983. v. 1.
- VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- REIS, A. J.; PEDRO, J.J.O. **Bridge design**: Concepts and Analysis. England: Wiley, 2019.