



## PROJETO CONSIDERANDO ANÁLISE DINÂMICA DE PASSARELAS DE MATERIAL COMPÓSITO

### DESIGN OF COMPOSITE FOOTBRIDGES CONSIDERING DYNAMIC ANALYSIS

João Pedro de Castro Torres (1); Eliane Maria Lopes Carvalho (2); Janine Domingos Vieira (3)

(1) Aluno Graduação, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, Brasil.

(2) D.Sc., Prof Titular, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, Brasil.

(3) D.Sc., Prof Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, Brasil.

Email para Correspondência: joaopctorres@gmail.com; (P) Apresentador

#### Resumo:

Este trabalho teve como objetivo o projeto de passarelas constituídas de perfis pultrudados, atendendo os níveis mínimos de conforto e segurança. Para isso, foram realizadas análises estática e dinâmica da estrutura, considerando o carregamento de uma multidão caminhando sobre a passarela. As análises estáticas de esforços e deslocamentos e análise de vibrações livres foram extraídas de um modelo numérico tridimensional utilizando um programa comercial baseado no Método dos Elementos Finitos.

Foram idealizadas duas concepções estruturais, uma treliçada e outra associando arco e treliça. Ainda foram testados dois tipos de tabuleiros em cada uma das concepções, uma laje de concreto armado e uma placa de material compósito. Para as passarelas, foram verificados os Estados Limites de Serviço (E.L.S) de deformações excessivas e Estado Limite Último (E.L.U) para as cargas estáticas. Para a verificação dinâmica, foi desenvolvido um programa bidimensional da estrutura no qual os dados de entrada foram retirados do modelo tridimensional, obtendo as respostas das acelerações e deslocamentos no tempo.

Como a estrutura constituída de material compósito é leve, existe uma grande possibilidade de as propriedades dinâmicas da passarela serem afetadas pelas massas dos pedestres alterando as frequências dos modos de vibração e aumento da taxa de amortecimento. Assim, dois estudos foram realizados: um considerando a massa das pessoas e também aumentando a taxa de amortecimento da estrutura; e outra utilizando apenas a massa da estrutura e uma taxa de amortecimento determinada em ensaios de vibrações livres disponíveis na literatura. As análises mostraram que as massas adicionais dos pedestres alteraram significativamente as frequências naturais de vibração da estrutura. Pelo fato das acelerações encontradas nos modelos serem consideradas intoleráveis segundo guias de projetos, estratégias visando diminuir essa grandeza física foram necessárias. Para tornar as passarelas confortáveis quanto às vibrações, foi projetado então um atenuador passivo.

**Palavras chaves:** *Passarelas; Vibração; Perfis pultrudados; Atenuadores.*



**Abstract:** The objective of this study was the design of footbridges constituted of pultruded profiles, respecting the minimum levels of comfort and security. The static and dynamic analysis were made considering the crowd load. One three dimensional numerical model based on Finite Element Method was created to show the value of stresses and displacements in the static case and modal parameters in the free vibration analysis.

Two Structural conceptions were idealized, one made of trusses and the other using arc and trusses together. For each conception, two different types of boards was tested, one constituted of concrete and the other one made of composite material. For the footbridges, the Ultimate Limit State and Serviceability Limit State were verified considering static loads. In order to analyze the dynamic behavior, one two dimensional program was developed, receiving parameters from the three dimensional model, to obtain the time-history in terms of displacements and accelerations.

As structures constituted of composite material are very light, there is a high possibility that the dynamic properties of the footbridge be affected by pedestrian masses, changing the natural frequencies and damping ratio. Two analysis was made then, one considering the pedestrian masses, changing the natural frequencies and damping ratio and another analysis considering the footbridge uninhabited with damping ratio found in free vibration tests in the literature. The analysis showed that the additional mass changed significantly the natural frequencies of vibration of footbridges. After the analysis, the acceleration found in the models were characterized as intolerable according to design guides. To solve this problem, a passive synchronized dynamic attenuator was projected, reducing the vibrations of the structures and making it comfortable for using

**Keywords:** *Footbridge; Vibration; Pultruded profiles; Attenuators.*



## 1 INTRODUÇÃO

A evolução da engenharia vem demandando a criação de novos materiais para substituir o concreto e o aço, buscando soluções mais eficientes, econômicas ou ecológicas. Nessa direção, perfis estruturais de polímero reforçados com fibras surgem como um bom substituto, apresentando alta resistência química e à tração, baixa massa específica e fácil transporte e montagem.

No Brasil, este material é pouco difundido, sendo usado, em sua maioria, pela indústria off-Shore na confecção de grades de piso, guarda-corpos e escadas. Apesar de possuir boas características para ser usado na construção civil, os polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV) possuem baixo módulo de elasticidade, propiciando maiores deformações e diminuindo as frequências naturais de vibração da estrutura, quando comparados com estruturas feitas com materiais convencionais.

O objetivo deste trabalho é a realização de dois projetos de passarelas constituídas de perfis pultrudados de PRFV, algo já realizado em alguns países da Europa e nos Estados Unidos, diferenciando entre si apenas pelo tabuleiro, onde uma possui placas de material compósito e a outra de concreto armado. Para isso, foram verificadas as seções quanto aos esforços de compressão e tração além da verificação de flambagem, as deformações da estrutura e as acelerações relativas ao carregamento dinâmico do caminhar de uma multidão de pedestres. Por fim, para reduzir as acelerações sofridas pela estrutura e adequar a mesma em um nível considerado tolerável de conforto, realizou-se o projeto de um atenuador passivo dinâmico sincronizado.

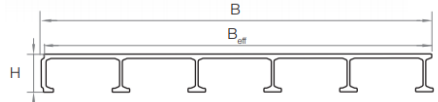
## 2 AS PASSARELAS

As duas passarelas idealizadas para o estudo possuem 28 metros de comprimento e seguem todas as especificações do manual ISF-219 (2015) do DNIT. As passarelas se diferenciam apenas pelo tabuleiro, onde uma utiliza as placas MD da empresa Fiberline Composites (Figura 1) e a outra possui lajes pré-fabricadas de concreto armado com 10 cm de altura da empresa Lajes Anhanguera. Ambas as estruturas possuem o guarda corpo de perfis pultrudados de PRFV da empresa nacional ECO Engenharia de Compósitos. Para cobertura foram utilizadas telhas translúcidas onda 75 – Fibrotex da empresa Brasilit.

### 2.1 Projeto Geométrico

A princípio, pensou-se em utilizar uma concepção estrutural treliçada para as estruturas. No entanto, seguindo as recomendações do EUROCOMP (1996) para o estado limite de serviço de deslocamentos excessivos, verificou-se que as deflexões das passarelas não respeitavam o limite de  $L/250$ , mesmo utilizando os perfis pultrudados mais rígidos disponíveis no catálogo da empresa Bedford Reinforced Plastic, empresa selecionada para as escolhas dos perfis pultrudados. Dessa forma, buscou-se combinar a concepção treliçada com um arco, utilizando a boa resistência à tração e compressão do

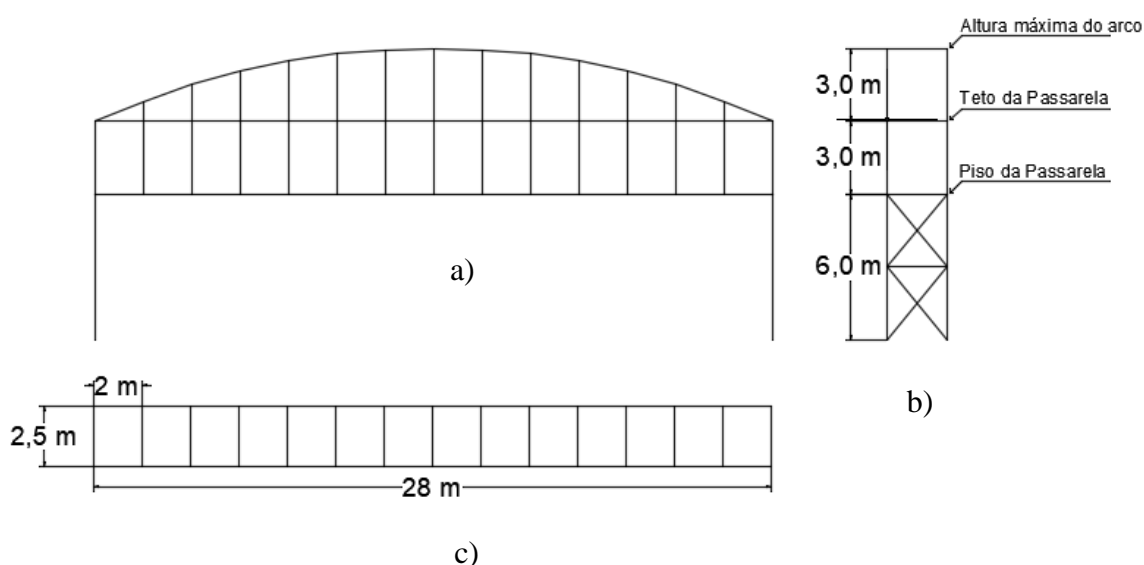
material para aliviar os deslocamentos no meio do vão. A Figura 2 apresenta o esquema geométrico das passarelas.



Profile							
H	B	B <sub>eff</sub>	A	I <sub>x</sub>	Weight	E <sub>0o</sub>	
mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	x 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup>	g/m	x 10 <sup>3</sup> MPa	
40	505	500	3.650	0,7	6.570	23	

**Figura 1. Detalhe da placa MD da Fiberline composites**

Fonte: (<<https://fiberline.com/fiberline-plank-md>>)



**Figura 2. a) Vista lateral das passarelas; b) Vista frontal do meio do vão da passarela; c) Vista superior da passarela.**

Fonte: (Acervo pessoal)

Os modelos numéricos das passarelas, desenvolvidos a partir do projeto geométrico, foram realizados utilizando o software SAP 2000 vr.14. A partir das análises estáticas, foram feitas as verificações para o estado limite último (ELU) e para o estado limite de serviço (ELS). Adicionalmente, para cada passarela foi realizada a análise de vibração livre para a obtenção das frequências naturais de vibração, os autovetores e as massas modais para cada modo vibração.

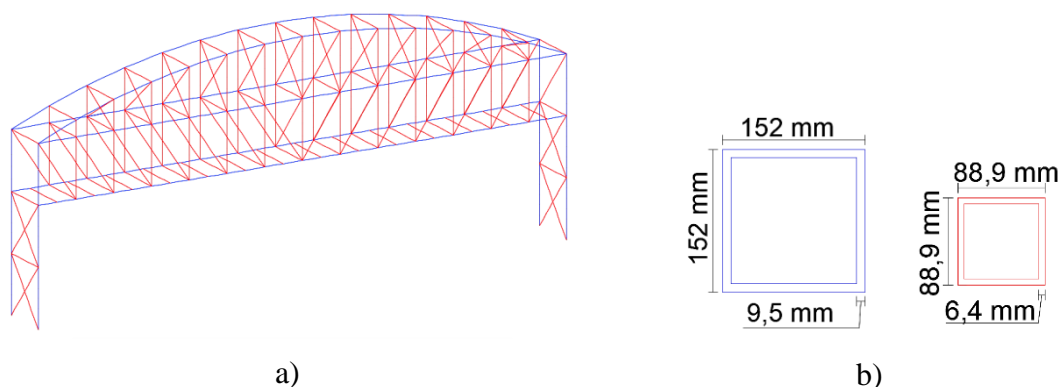
As combinações de carregamentos utilizados para as verificações estáticas foram definidos segundo EUROCOMP (1996) (Tabela 1), em que P.P. é o peso próprio da estrutura, S.C.U. é a sobrecarga acidental de utilização, V<sub>y</sub> é a carga de vento na direção y (perpendicular à face lateral da estrutura).

Para os carregamentos foram considerados: (i) o peso específico do material compósito e do concreto de 18,5 kN/m<sup>3</sup> e 25,0 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente; (ii) sobrecarga acidental, segundo o manual ISF-219 (2015) de 5,0 kN/m<sup>2</sup> e (iii) força do vento na direção y (perpendicular à face lateral da passarela) de 0,75 kN/m<sup>2</sup>.

**Tabela 1. Combinações de carregamento segundo EUROCOMP (1996).**

ELS	ELU
<b>1</b> 1 x P.P. + 1 x S.C.U.	<b>1</b> 1,35 x P.P. + 1,5 x S.C.U.
<b>2</b> 1 x P.P. + 1 x Vy	<b>2</b> 1,35 X P.P +1,5 X Vy
<b>3</b> 1 x P.P. + 0,9 x S.C.U. + 0,9 x Vy	<b>3</b> 1,35 x P.P. + 1,35 x S.C.U. + 1,35 x Vy

Com essas análises estáticas, respeitando a capacidade resistente das seções e dos elementos em si (flambagem), além de satisfazer o limite de deslocamentos de  $L/250$ , foram definidas as seções dos perfis estruturais. Na Figura 3 é possível visualizar os perfis utilizados no modelo assim como suas posições. É importante ressaltar que o espaçamento das transversinas inferiores foi alterado para um metro, uma vez que um vão de dois metros não respeitava o limite de deslocamentos para a placa MD, da Fiberline Composites.



**Figura 3. a) Vista isométrica das passarelas; b) Perfis utilizados em cada barra do modelo.**

Fonte: (Acervo pessoal)

## 2.2 Modelo Numérico

Como o material compósito é um composto considerado ortotrópico, definiu-se as propriedades com base nos valores encontrados por Vieira et al. (2017). Como tanto no caso do fornecedor quanto da pesquisa citada, os módulos de elasticidade nas direções secundárias são iguais, o material utilizado no modelo pôde ser denominado transversalmente isotrópico. As propriedades mecânicas do material utilizadas podem ser vistas na Tabela 2.

**Tabela 2. Propriedades mecânicas do material compósito utilizado no modelo.**

$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$	$\nu_{major}$	$\nu_{minor}$
24,5	9,58	9,58	9,46	2,88	2,88	0,32	0,32



Onde:  $E_x$  é o módulo de elasticidade na direção  $x$  (longitudinal as fibras) [GPa];  $E_y$  e  $E_z$  são os módulos de elasticidade nas direções  $y$  (transversal as fibras) e  $z$  [GPa];  $G_{xy}$  é o módulo de cisalhamento  $xy$  [GPa];  $G_{yz}$  e  $G_{zx}$  são os módulos de cisalhamento nos planos  $yz$  e  $zx$ , respectivamente [GPa];  $\nu_{\text{major}}$  é o coeficiente de Poisson na direção principal e  $\nu_{\text{minor}}$  é o coeficiente de Poisson na direção secundária.

Com as propriedades definidas, testou-se a influência da anisotropia do material comparando dois modelos com apenas elementos de barra, sendo um com propriedades isotrópicas e o outro transversalmente isotrópicas. Esse teste não apresentou diferença no resultado, uma vez que o software utilizado usa o modelo de viga de Timoshenko, no qual apenas o módulo de elasticidade longitudinal é considerado na matriz constitutiva.

As lajes de concreto armado e o tabuleiro de material composto (placa MD) foram modelados como elementos de casca apoiadas somente nas transversinas, representando as condições de contorno de lajes pré-fabricadas. Como a placa MD utilizada não possui uma geometria retangular, sendo composta por uma placa associada a enrijecedores, foi criado um modelo de casca equivalente para representar o tabuleiro. Foi então calculada uma seção retangular no qual sua inércia fosse igual à placa original, sendo feita uma correção do peso específico para manter as massas e pesos próprios da placa original.

Foi também analisado o comportamento da estrutura com nós rotulados (treliçada) e com nós rígidos (aporticada). O teste mostrou que a estrutura treliçada apresentava grandes deslocamentos, podendo ser explicada pela baixa rigidez da estrutura. Já com a estrutura aporticada, foram obtidos resultados mais satisfatórios. Dessa forma, o modelo gerado possui ligações com rigidez à rotação entre os elementos de barra, podendo ser idealizado com o uso de perfis cantoneiras, por exemplo.

O teste de convergência realizado mostrou que uma discretização com cerca de 0,5 metros foi o suficiente para obter um bom resultado.

### 3 ANÁLISE DINÂMICA

Com o modelo numérico realizado e o projeto estrutural da passarela garantindo a satisfação do ELU e ELS para as combinações de carregamentos estáticos definidos pelo EUROCOMP (1996), pode-se realizar a verificação dinâmica da passarela quanto ao carregamento dinâmico do caminhar de uma multidão.

Para a definição do carregamento e verificação do nível de conforto humano quanto ao excesso de vibrações, foi utilizado o guia de projeto Sétra Footbridges (2006), no qual sugere estratégias para análise dinâmica de passarelas, assim como ações para a diminuição das acelerações, tanto ainda em projeto quanto com a estrutura executada. As passarelas aqui estudadas são de Classe 1, ou seja, possuem uma alta densidade de pedestres na ordem de 1 pessoa/m<sup>2</sup>. O guia Sétra Footbridges (2006) então define o carregamento pro primeiro harmônico do caminhar como é explícito na Eq. 1. Já na Eq. 2, é possível ver o carregamento referente ao segundo harmônico do caminhar.

$$F(t) = dx280 \cos(2\pi f_v t) x1,85 \sqrt{\frac{1}{n}} \psi \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (1)$$

$$F(t) = dx70 \cos(2\pi f_v t) x1,85 \sqrt{\frac{1}{n}} \psi \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (2)$$

Onde:

$d$  - é a densidade de pedestres na passarela, que nesse caso, é igual à 1 pedestre/m<sup>2</sup>;

$f_v$  - é a frequência fundamental do caminhar, variando de 1,6 a 2,4 Hz para o primeiro harmônico do caminhar e o dobro destes valores para o segundo harmônico, segundo o guia Sétra Footbridges (2006);

$t$  - é o tempo em segundos;

$n$  - é o número de pedestres presentes na passarela;

$\psi$  - é o fator de minoração levando em conta a probabilidade de ocorrência de ressonância;

280 é o peso de uma pessoa (700 N) multiplicado por 0,4 e 70 é o mesmo multiplicado por 0,1.

Dessa forma, é possível ver na Eq. 3 a equação de equilíbrio da dinâmica.

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - 2\xi\omega m\dot{x} + F(t)] \quad (3)$$

Onde,  $\ddot{x}$  é a aceleração,  $m$  é a massa modal da estrutura,  $k$  é a rigidez modal,  $x$  é o deslocamento,  $\xi$  é a taxa de amortecimento;  $\dot{x}$  é a velocidade;  $\omega$  é a frequência angular e  $F(t)$  é o carregamento dinâmico.

Diversos estudos já comprovaram que as massas e os amortecimentos gerados por pessoas afetam significativamente as propriedades dinâmicas de estruturas leves como foi evidenciado por Pedersen (2008). Este último autor comparou a influência da presença de pessoas com a alteração da frequência de vibração e taxa de amortecimento de uma laje, comparando os resultados experimentais obtidos com sacos de areia com os resultados das pessoas. Como conclusão, ele percebeu que tanto com as pessoas quanto com os sacos de areia, a frequência natural de vibração da laje diminuía. Já em relação à taxa de amortecimento, foi notado que os sacos de areia não afetavam essa propriedade, ao contrário da presença de pessoas, no qual alterou a taxa de amortecimento de cerca de 0,5% para 8%. Já Teixeira (2000) e Costa (2013), dizem que estruturas altamente povoadas podem possuir taxas de amortecimento na faixa de 12%

Notando a importância da interação pessoa-estrutura, foram feitas duas análises dinâmicas para cada estrutura. Uma análise foi realizada utilizando a estrutura desabitada, com as frequências de vibração obtidas sem a consideração da massa dos pedestres e utilizando uma taxa de amortecimento de cerca de 0,84%, valor este encontrado experimentalmente por outros autores ao realizar medições na passarela de Aberfeldy (Pimentel, 1997, apud Costa, 2013), uma estrutura toda composta de material compósito. A outra, por sua vez, levou em consideração a massa dos pedestres na



obtenção das frequências de vibração e foi considerado 10% de taxa de amortecimento, um meio termo entre o que Texeira (2000), Costa (2013) e Pedersen (2008) disseram.

Foi implementado um programa de computador considerando um modelo bidimensional da estrutura com as propriedades dinâmicas obtidas na análise de vibrações livres do modelo tridimensional. A integração da equação do movimento foi feita utilizando o algoritmo de Runge-Kutta, obtendo assim as respostas dos deslocamentos e velocidades no tempo e posteriormente as acelerações no tempo, através de uma derivada numérica.

### 3.1 Análise Dinâmica da Passarela de Compósito e Tabuleiro de Concreto Armado

Realizando a análise de vibração livre no SAP 2000 Vr.14, obteve-se os modos de vibração mostrados na Tabela 3 para a estrutura sem a interação com os pedestres e na Tabela 4 considerando os mesmos. A massa total encontrada da passarela sem considerar a massa dos pedestres foi de 21,7 toneladas.

**Tabela 3. Frequências e modos de vibração para a passarela de laje em concreto armado sem a massa dos pedestres anexada**

	Frequência (Hz)	Modo
1º	1,71	1º Flexão Lateral
2º	2,77	2º Flexão Lateral
3º	2,90	1º Torção
4º	3,47	1º Flexão Vertical
5º	4,53	3º Flexão Lateral

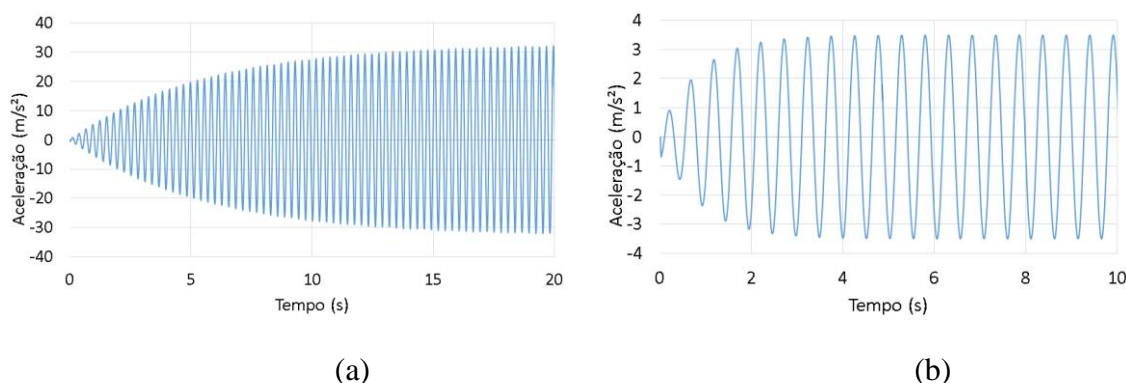
**Tabela 4. Frequências e modos de vibração para a passarela de laje em concreto armado com a massa dos pedestres anexada**

	Frequência (Hz)	Modo
1º	1,18	1º Flexão Lateral
2º	1,93	1º Flexão Vertical
3º	2,09	1º Torção
4º	2,23	2º Flexão Lateral
5º	3,01	2º Flexão Torção
6º	3,05	2º Flexão Vertical



Analisando os dois casos, é possível ver que, segundo o guia Sétra Footbridges (2006), o primeiro modo vertical de vibração de ambas estruturas devem ser verificados, uma vez que suas frequências estão no intervalo de 1,6 a 2,4 Hz para o primeiro harmônico do caminhar e 3,2 a 4,8 Hz para o segundo harmônico do caminhar.

Utilizando então a taxa de amortecimento de 0,84% para a estrutura desabitada e 10% para a estrutura habitada, juntamente com as Eq. 1 e 2, respectivamente, obteve-se as acelerações no tempo para o caso sem multidão (Figura 4a) e com multidão (Figura 4b) através do programa criado para a integração da equação de equilíbrio.



**Figura 4. a) Resposta das acelerações no tempo para a passarela com tabuleiro de concreto armado sem a presença de pedestres; b) Resposta das acelerações no tempo para a passarela com tabuleiro de concreto armado com a presença de pedestres.**

Fonte: (Acervo pessoal)

### 3.2 Análise Dinâmica da Passarela de Compósito e Tabuleiro também de compósito.

Realizando as mesmas análises citadas anteriormente, obtiveram-se as frequências e modos de vibração expressos na Tabela 5 para a estrutura sem a presença de pedestres e na Tabela 6 com a presença de uma multidão. A massa total encontrada da passarela sem considerar a massa dos pedestres foi de 5,2 toneladas.

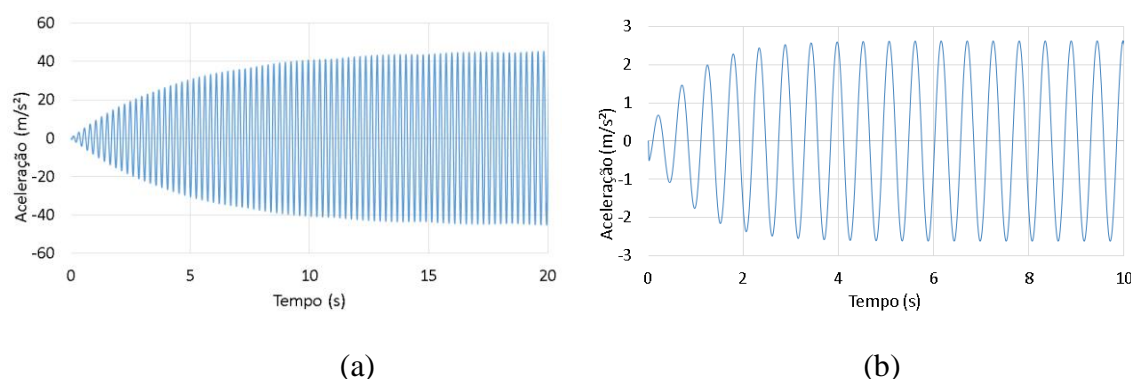
**Tabela 5. Frequências e modos de vibração para a passarela de laje de compósito sem a massa dos pedestres anexada**

	Frequência (Hz)	Modo
1º	1,63	1º Flexão Lateral
2º	2,69	2º Flexão Lateral
3º	3,20	1º Torção
4º	3,83	3º Flexão Lateral
5º	4,15	1º Flexão Vertical

**Tabela 6. Frequências e modos de vibração para a passarela de laje de compósito com a massa dos pedestres anexada**

	Frequência (Hz)	Modo
1º	1,05	1º Flexão Lateral
2º	1,83	1º Flexão Vertical
3º	2,02	1º Torção
4º	2,20	2º Flexão Lateral
5º	2,56	2º Flexão Vertical

Analisando novamente ambos os casos, nota-se que os primeiros modos de vibração verticais devem ser verificados. Utilizando então a taxa de amortecimento de 0,84% para a estrutura desabitada e 10% para a estrutura habitada, juntamente com as Eq. 1 e 2, respectivamente, obteve-se as acelerações no tempo para o caso sem multidão (Figura 5a) e com multidão (Figura 5b) através do programa criado para a integração da equação de equilíbrio.



**Figura 5. a) Resposta das acelerações no tempo para a passarela com tabuleiro compósito sem a presença de pedestres; b) Resposta das acelerações no tempo para a passarela com tabuleiro de compósito com a presença de pedestres.**

Fonte: (Acervo pessoal)

### 3.3 Análise dos Resultados Dinâmicos

Ao realizarem-se as análises dinâmicas das passarelas sem anexar a massa dos pedestres, valores muito elevados para aceleração são encontrados. Esse resultado, contudo, não é confiável uma vez que é quase impossível a estrutura receber esse carregamento de multidão sem ter interação com os pedestres, como a adesão de massa e aumento significativo de amortecimento.

Anexando a massa dos pedestres à massa da estrutura, e aumentando sua taxa de amortecimento, resultados mais plausíveis foram obtidos. Mesmo esses resultados

possuindo uma ordem de grandeza satisfatória, as amplitudes máximas de aceleração, 3,5 m/s<sup>2</sup> para a passarela com laje de concreto e 2,6 m/s<sup>2</sup> para a estrutura com placas de compósito, apresentam valores intoleráveis de aceleração (>2,5 m/s<sup>2</sup>) segundo o guia Sétra Footbridges (2006), sendo necessárias intervenções para tornar a mesma confortável para seus usuários.

### 3.4 Estratégia para Reduzir as Vibrações

A estratégia utilizada para reduzir as acelerações e adequar as passarelas em um nível mínimo de conforto segundo o guia Sétra Footbridges (2006) foi o atenuador passivo dinâmico sincronizado (ADS). Este tipo de dispositivo é ideal para estruturas que sofrem com problemas de vibrações causados predominantemente por um único modo de vibração, sendo de fácil instalação e de baixo custo.

A eficiência de um ADS é definida através da Eq. 4, sendo a relação dos deslocamentos máximos da estrutura atenuada ( $\delta_a^{\max}$ ) com os deslocamentos máximos da estrutura sem ADS ( $\delta_s^{\max}$ ). Fazendo um teste de eficiência (Figura 6), onde  $m_a$  é a massa do atenuador,  $m_s$  é a massa da estrutura e  $\xi$  é a taxa de amortecimento do atenuador, definiu-se a taxa de amortecimento do atenuador em 5%, a massa do mesmo sendo cerca de 5% da massa modal da estrutura e uma frequência de vibração com cerca de 97% do valor da frequência do modo que se deseja atenuar, uma vez que a passarela pode sofrer alguma reforma e aumentar sua massa.

$$Eficiência = 1 - \frac{\delta_a^{\max}}{\delta_s^{\max}} \quad (4)$$

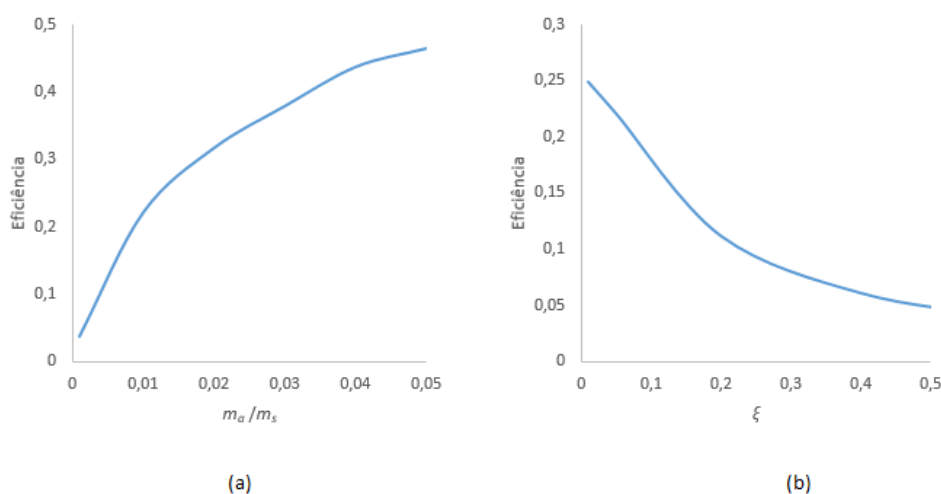


Figura 6. (a) Relação da eficiência e razão entre as massas do atenuador e modal da estrutura; (b) Relação da taxa de amortecimento do atenuador com a eficiência do mesmo.

Fonte: (Acervo pessoal)

As Eq. 5 e Eq. 6 representam respectivamente as equações de equilíbrio da estrutura e do atenuador, nas quais foram utilizadas para a integração numérica através do algoritmo de Runge-Kutta para obter as respostas das acelerações no tempo.

$$\ddot{x}_s = \frac{1}{M_s} [-x_s(K_s + K_a) - \dot{x}_s(C_s + C_a) + C_a\dot{x}_a + K_ax_a] \quad (5)$$

$$\ddot{x}_a = \frac{1}{M_a} [-K_a(x_a - x_s) - C_a(\dot{x}_a - \dot{x}_s)] \quad (6)$$

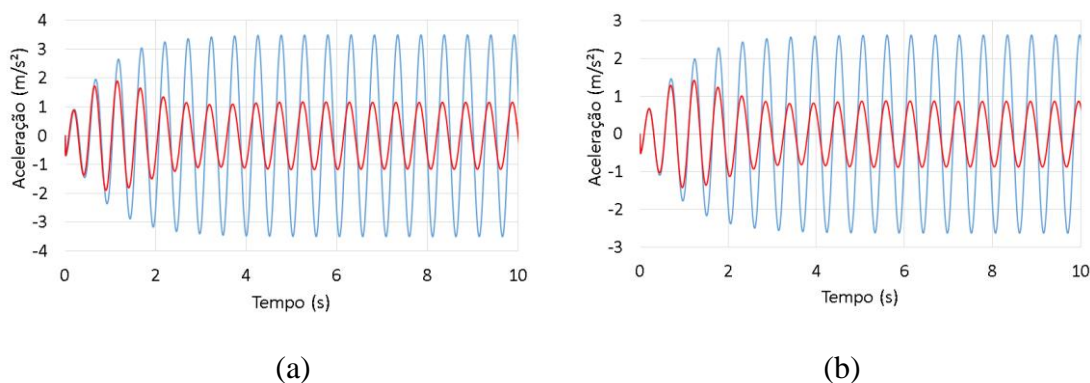
Onde:  $M_s, M_a$ : Massas da estrutura e do atenuador;  $C_s, C_a$ : Coeficientes de amortecimento da estrutura e do atenuador;  $K_s, K_a$ : Rigidezes da estrutura e do atenuador;  $F(t)$ : Força excitadora;  $x_s, x_a$ : Deslocamentos da estrutura e do atenuador.

### 3.5 Resultados dos ADS

Para o ADS da passarela com laje em concreto armado, foi considerada uma massa de 193,0 kg, uma frequência natural de 1,89 Hz (97% de 1,95 Hz) e taxa de amortecimento de 5%, como propriedades do atenuador, obtendo-se o sinal da aceleração no tempo.

Já para o ADS da passarela com tabuleiro de compósito, foi considerada uma massa de 257 kg, uma frequência natural de 1,77 Hz (97% de 1,83 Hz) e taxa de amortecimento de 5%, como propriedades do atenuador, obtendo-se o sinal da aceleração no tempo.

Nas Figuras 7a e 7b, é possível ver o efeito que o atenuador causa na estrutura, onde os sinais azuis são as respostas encontradas anteriormente para as estruturas habitadas e o sinal vermelho são as respostas da aceleração atenuadas.



**Figura 7. a) Comparação dos sinais da passarela com laje de concreto armado habitada (azul) e depois da implantação do ADS (vermelho); b) Comparação dos sinais da passarela com tabuleiro de compósito habitada (azul) e depois da implantação do ADS (vermelho).**

Fonte: (Acervo pessoal)

O atenuador conseguiu reduzir os deslocamentos sofridos pela estrutura de aproximadamente 2,0 cm para 0,6 cm, apresentando uma redução de 69,7 %. Em relação às acelerações, o atenuador reduziu amplitudes de 2,6 m/s<sup>2</sup> para 0,76 m/s<sup>2</sup>, retirando a estrutura de uma zona considerável intolerável de conforto para uma zona considerada mediana, demonstrando a viabilidade de realizar um projeto do ADS.

### 3.6 Projeto do Atenuador para a Passarela com Tabuleiro de Compósito

Calculando-se então as molas do atenuador (Tabela 7) para possuir a rigidez necessária e também a massa dos pesos para que se alcançasse a frequência de vibração necessária, projetou-se o ADS ilustrado na Figura 8 para sua instalação no meio do vão da passarela. É importante ressaltar que foi verificado o deslocamento dinâmico do atenuador e o estático para que a mola não fechasse e para que o sistema de massas não colidisse com a estrutura.

Tabela 7. Propriedades de uma mola para a passarela com tabuleiro de compósito

Diâmetro do fio [mm]	Diâmetro médio [mm]	$N_a$	$N_t$	Passo [mm]	Comprimento [mm]	Rigidez da mola [N/m]
9	70	12	14	16,6	217	15621

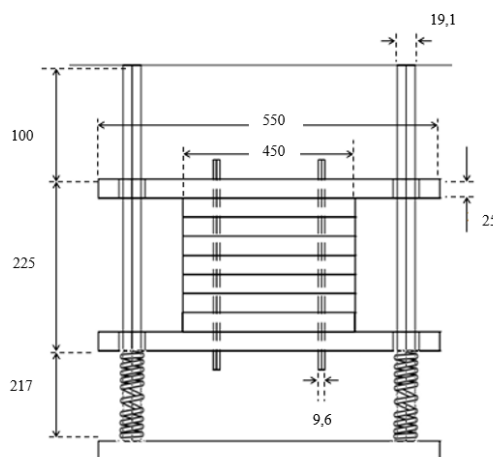


Figura 8. Ilustração do ADS a ser instalado no meio do vão para a passarela com tabuleiro de material compósito.

Fonte: (Acervo pessoal)

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram projetadas duas passarelas com perfis pultrudados de PRFV, diferenciando apenas pelo tabuleiro, onde uma é feita com lajes de concreto armado e a outra de placas de material compósito.

Em relação a verificação estática, foram verificados os ELU e ELS quanto deformações excessivas seguindo normas internacionais. Foram verificados então os esforços axiais de compressão e tração, a flambagem dos elementos e os deslocamentos verticais e horizontais para algumas combinações de carregamentos.



Para a análise dinâmica, foi realizada uma verificação do conforto humano para um carregamento cíclico de uma multidão caminhando. Percebeu-se que, para este tipo de estrutura, a consideração dos efeitos gerados pelo pedestre como aumento da massa da estrutura e taxa de amortecimento são imprescindíveis para um modelo mais correto, uma vez que a massa dos pedestres equivale a cerca de 94% o peso da estrutura desabitada, no caso da estrutura com tabuleiro de compósito.

Mesmo com o aumento da taxa de amortecimento, as acelerações encontradas foram caracterizadas como intoleráveis, segundo guias de projeto. Dessa forma, foi necessário o projeto de um atenuador passivo dinâmico sincronizado, reduzindo as vibrações em cerca de 70%, caracterizando as passarelas como confortável ao uso.

## REFERÊNCIAS

COSTA, Natasha de Paula Amador da; “*Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito*”. Dissertação de Mestrado. UFAM, Amazonas, AM, Brasil, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ISF219: Projeto de Passarela para Pedestres. DNIT, 2015.

PEDERSEN, Lars. An aspect of dynamic human-structure interaction, 2008. *Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference*.

PIMENTEL, R. L., WALDRON, P., “*Guidelines for the vibration serviceability limit state of pedestrian bridges*”. International Seminar on Structural Assessment, London, UK, July, 1996.

SAP2000 v.14, C. S. I. Computers and Structures Inc. Berkeley, CA, USA, 2009.

SÉTRA, Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading. *Technical guide*, Paris, France, 2006.

TEIXEIRA, A. J.; Passarelas Estaiadas de materiais novos e Convencionais sob Ação de Cargas Dinâmicas Humanas. 2000. *Tese de Doutorado*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VIEIRA, J. D.; LIU, Tianqiao; HARRIES, Kent A., 2017; Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*.