

Projetos de Passarelas de Materiais Compósitos com Diferentes Vãos.

João M. Ribeiro¹, Eliane M. L. Carvalho¹, Janine D. Vieira, Wendell D. Varela^{2,3}

¹*Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense (UFF)
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói/RJ, Brazil
jm_ribeiro@id.uff.br, elianemaria@vm.uff.br, janinedv@id.uff.br*

²*PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Cidade Universitária, 21941-909, Rio de Janeiro/RJ, Brazil
wendell@fau.ufrj.br*

Resumo. A análise dinâmica de passarelas sob a ação do caminhar humano envolve muitas variáveis com influência no comportamento da estrutura. Tendo isto em vista, este trabalho analisou as respostas de passarelas de material compósito com diferentes concepções estruturais submetidas a uma mesma carga dinâmica com intuito de aferir o impacto de cada concepção na resposta dinâmica da estrutura. As análises estáticas e de vibração livre foram feitas por meio de modelos tridimensionais 3D utilizando um programa comercial baseado no Métodos dos Elementos Finitos. As respostas da estrutura no domínio do tempo foram obtidas através de um programa de computador desenvolvido em linguagem de programação Python para integração das equações diferenciais de equilíbrio utilizando as propriedades dinâmicas obtidas do modelo 3D.

Palavras-Chave: carga humana; dinâmica; passarela; material compósito.

1 Introdução

O objetivo deste trabalho foi desenvolver projetos otimizados de passarelas com vãos de 20, 30 e 40 metros feitos de perfis pultrudados de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Análises estáticas e dinâmicas foram realizadas para os diferentes comprimentos com diversas concepções estruturais, utilizando arcos e treliças. Dois tipos de modelos numéricos foram desenvolvidos: um modelo tridimensional usando um programa comercial de computador baseado no Método dos Elementos Finitos e um modelo bidimensional usando um programa desenvolvido na linguagem Python para análise dinâmica no domínio do tempo da estrutura sob a ação de caminhar de pedestres. As análises estática e de vibração livre foram realizadas utilizando os modelos tridimensionais. Para a análise estática, foram verificados os Estados Limite Último (ELU) e de Serviço (ELS) considerando uma sobrecarga de 5kN/m^2 . As propriedades dinâmicas das diferentes estruturas foram obtidas a partir da análise de vibrações livres, posteriormente utilizadas como dados de entrada para análise dinâmica no domínio do tempo. Como os perfis de PRFV apresentam baixo módulo de elasticidade, seu uso em passarelas resulta em baixas frequências naturais da estrutura, ficando sujeitas ao fenômeno de ressonância sob a ação de caminhar humano. A verificação do nível de conforto humano foi realizada verificando os limites recomendados pelos guias internacionais de projeto para as acelerações obtidas por meio do programa bidimensional desenvolvido para integrar a equação do movimento, levando em consideração a carga de pedestres. Como os perfis pultrudados são leves, considerou-se a interação entre pedestres e estrutura, aumentando a taxa de amortecimento, considerando assim o fenômeno de interação entre pessoas e estruturas presentes nesses casos. No final, são apresentados os projetos estruturais para cada comprimento que satisfazem os limites recomendados nas normas técnicas guias de projeto para análises estáticas e dinâmicas de passarelas.

2 Metodologia de Análise

As passarelas foram analisadas de acordo com o Estado Limite de Serviço (ELS) e o Estado Limite Último (ELU). As combinações de cargas utilizadas, bem como os limites de deslocamento, foram extraídas da norma

EUROCOMP (1996) [3]. Para realizar as análises estáticas e de vibrações livres em cada passarela, foram desenvolvidos modelos tridimensionais (3D) utilizando o software comercial SAP2000 vr.14 baseado no Método dos Elementos Finitos.

Já na análise dinâmica de passarelas, o Guia SÉTRA [4] foi o balizador em se tratando dos efeitos do caminhar humano na mesma. Este guia visa mensurar o nível de conforto dos usuários em relação às acelerações da passarela conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Conforto dos usuários em relação as acelerações (adaptado do guia SÉTRA [4])

Aceleração (m/s ²)	0.00	0.50	1.00	2.50
Conforto Máximo				
Conforto Médio				
Conforto Mínimo				
Sem Conforto				

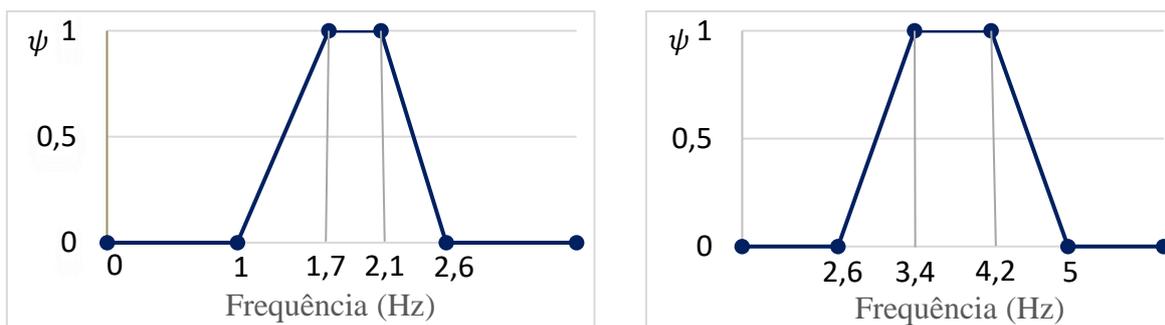
Foi considerada a carga dinâmica de uma multidão caminhando sobre a passarela, uniformemente distribuída e, para fins pragmáticos, com densidades de 1, 0,8 e 0,5 pessoas por metro quadrado, conforme recomendado no guia SÉTRA [4]. Este guia, por meio de análises experimentais e estatísticas, determinou o cálculo da intensidade da carga de multidão. Para multidões muito densas, isto é, densidade igual a 1, utiliza-se a eq. (2). No caso de multidões esparsas, com densidades iguais a 0,8 e 0,5 utiliza-se a eq. (1).

$$F(t) = d \times cte \times \cos(2\pi f \times t) \times 10.80 \times \sqrt{\xi \times (d \times A)^{-1}} \times \psi \quad (1)$$

$$F(t) = cte \times \cos(2\pi f \times t) \times 1.85 \times A^{-0.50} \times \psi \quad (2)$$

Onde *cte* é uma constante relacionada ao harmônico do caminhar humano e ao sentido de vibração; *f* é a frequência do caminhar; *t* é o instante de tempo; ξ é a taxa de amortecimento; *A* é a área do tabuleiro da passarela e ψ é um fator de minoração relacionado à ressonância da passarela submetida à carga de multidão.

A constante *cte* pode assumir diferentes valores dependendo da frequência natural de vibração da passarela e sua relação com o 1º ou 2º harmônico do caminhar humano, bem como do sentido excitado (longitudinal, transversal ou vertical). A passarela pode estar em total ou parcial ressonância com o 1º ou 2º harmônico do caminhar humano. Seu nível de ressonância com o harmônico é representado pelo fator de minoração ψ que varia de 0 a 1 de acordo com os gráficos da Figura 1 adaptado do guia SÉTRA [4].



(a) 1º harmônico da carga humana

(b) 2º harmônico da carga humana

Figura 1 – Valores do parâmetro ψ para os modos de vibração verticais [4]

A equação diferencial de equilíbrio da dinâmica é dada por:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_j} [-kx_j - 2\xi_j \omega_j m_j \dot{x} + F_j(t)] \quad (3)$$

Onde m_j é a massa modal, ω_j é a frequência em rad/s, ξ_j é a taxa de amortecimento modal; \ddot{x} , \dot{x} e x_j são, respectivamente, a aceleração, velocidade e deslocamento associados ao *j*-ésimo modo de vibração da estrutura e $F_j(t)$ é a força modal dada por:

$$F(t) = L \times \int_0^L F_j(t) \times \phi_j(y) dx \quad (4)$$

Onde L é a largura da passarela, $F(t)$ é a carga de multidão dadas pelas equações (1) e (2) e $\phi_j(y)$ é o auto vetor do j -ésimo modo de vibração da estrutura.

A solução da equação diferencial de segunda ordem da dinâmica, Eq (3), foi obtida utilizando o algoritmo de Runge-Kutta. Para isso foi feita a seguinte mudança de variáveis:

$$y_0 = x; y_1 = \frac{dy_0}{dt}; y_2 = \frac{dy_1}{dt} \quad (5)$$

Fazendo a mudança de variáveis da Eq. (5) na Eq. (3) chega-se ao sistema de equações diferenciais:

$$\frac{d\vec{D}(y, t)}{dt} = \begin{bmatrix} y_0 \\ \frac{1}{m} [F(t) - 2m\xi\omega_n y_1 - ky_0] \end{bmatrix} \text{ onde } \vec{D}(y, t) = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

As propriedades dinâmicas (m_j , ω_j e $\phi_j(y)$) foram obtidas por meio dos modelos numéricos tridimensionais e o sistema de equações diferenciais, eq. (6), foi resolvido por meio de um programa desenvolvido na linguagem de programação Python.

3 Modelos 3D em Elementos Finitos

As passarelas foram idealizadas utilizando os perfis pultrudados de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro para os elementos das longarinas, transversinas, treliças, arcos e pilares. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas de perfis pultrudados, de dois fabricantes (Cogumelo e Bedford Reinforced Plastics), que foram utilizados nesse trabalho. As propriedades foram retirados dos estudos desenvolvidos por CARDOSO, TOGASHI (2018) [1] e VIEIRA et al (2017) [2]. A Cogumelo foi priorizada, sempre que possível, por ser uma fabricante nacional.

Tabela 2. Propriedades dos materiais

COGUMELO			BEDFORD		
Propriedade	Valor	Unid.	Propriedade	Valor	Unid.
Peso Específico	18,50	kN/m ³	Peso Específico	18,50	kN/m ³
Módulo de Elasticidade Longitudinal	24,50	GPa	Módulo de Elasticidade Longitudinal	25,48	GPa
Módulo de Elasticidade Transversal	9,58	GPa	Módulo de Elasticidade Transversal	8,87	GPa
Módulo de Cisalhamento	2,88	GPa	Módulo de Cisalhamento	2,88	GPa
Resistência a Tração Longitudinal	312,00	MPa	Resistência a Tração Longitudinal	300,00	MPa

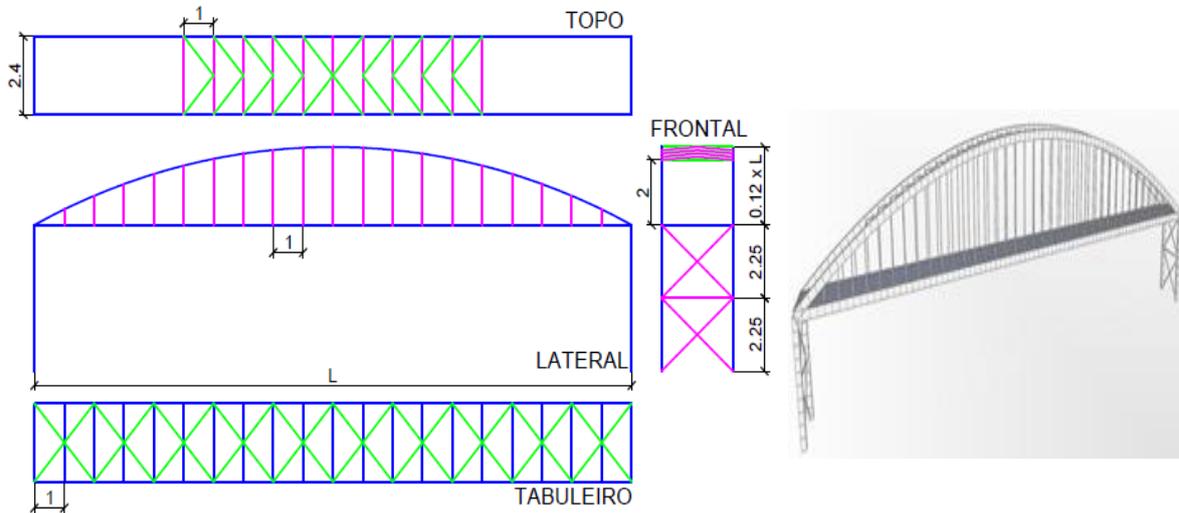
Modelos numéricos tridimensionais foram criados no software comercial SAP2000, baseado no método dos elementos finitos, utilizando elementos de pórtico para os perfis pultrudados, elementos de casca para a grade de tabuleiro e elementos de ligação para considerar a excentricidade entre o tabuleiro e perfis das longarinas. Testes de convergência demonstraram que uma discretização dos elementos próxima de 50 cm apresentava bons resultados. Os elementos estruturais utilizados foram perfis do tipo U conectados de forma a simular uma viga caixão. Como tabuleiro da passarela foi utilizada uma grade de piso, também do mesmo material compósito, GM 50 – 1’’ fabricada pela Cogumelo. Para as duas concepções estruturais foram feitas análises das passarelas com vãos de 20, 30 e 40 metros. Estes modelos foram usados para fazer análises estática e de vibração livre.

Passarela em Arco

Esta concepção estrutural é composta de duas longarinas, transversinas espaçadas a cada 2 metros, dois arcos, tirantes conectando os arcos às longarinas, contraventamentos e pilares, conforme pode ser visto na Figura 2. A altura máxima do arco foi estipulada em 12% do comprimento de vão. O tabuleiro do piso se apoia nas transversinas. A Tabela 3 relaciona as cores do modelo de barras da Figura 2 com as dimensões dos perfis. A legenda (2U) indica que este perfil foi criado a partir de dois outros perfis U soldados de forma a simular uma viga caixão. Os demais são perfis tubulares quadrados.

Tabela 3: Detalhamento de perfis, em milímetros

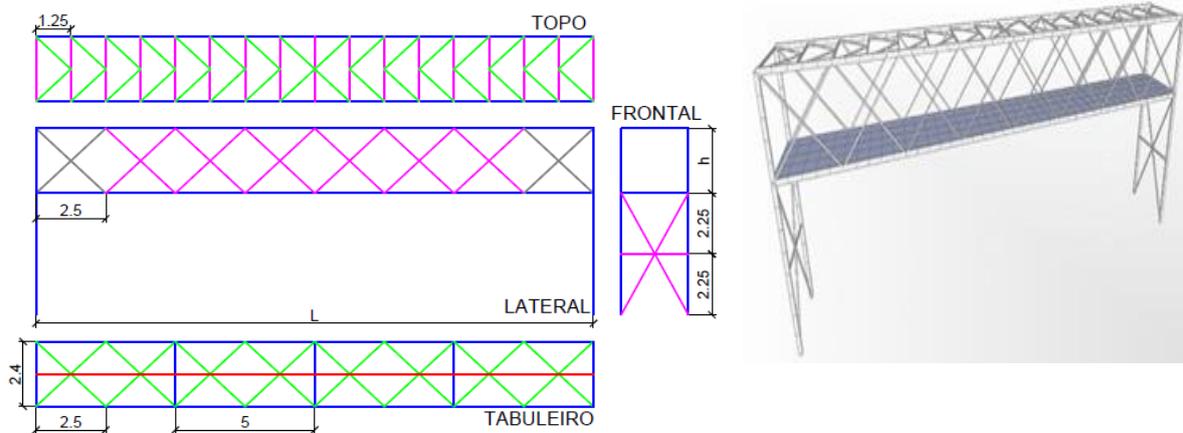
Perfis	20 metros	30 metros	40 metros
Verde	25,40 x 25,40 x 3,20	25,40 x 25,40 x 3,20	25,40 x 25,40 x 3,20
Magenta	38,10 x 38,10 x 6,35	50,80 x 50,80 x 3,20	50,80 x 50,80 x 3,20
Azul	101,60 x 203,20 x 9,52 (2U)	228,60 x 152,40 x 7,94 (2U)	200,00 x 360,00 x 7,00 (2U)



(a) Vistas em planta (nível do teto e nível do piso), lateral e frontal (b) Vista 3D
 Figura 2 – Modelo numérico da passarela em arco

Passarela Treliçada

Existe uma variedade de configurações de treliçados possíveis. O baixo módulo de elasticidade do compósito e a sobrecarga de 5kN/m² recomendada pelas normas técnicas para uso nas análises estáticas, resultaram no descarte de diversas configurações de treliçado por não atenderem aos limites impostos em norma para as verificações de ELS e ELU. Finalmente, foi escolhida a concepção que possui módulos que se assemelham a um “X” com tabuleiro apoiado nas longarinas, como mostrado na Figura 3.



(a) Vistas em planta (nível do teto e nível do piso), lateral e frontal (b) Vista 3D

Figura 3 – Modelo numérico da passarela treliçada

Os módulos mais próximos aos pilares (em cinza na Figura 3a) são mais solicitados dos que os do meio passarela, sendo assim, são mais robustos que os demais. Para a passarela de 20 metros, os 2 módulos mais próximos a cada pilar tiveram os perfis aumentados ao passo que nas demais passarelas foram os 3 mais próximos a cada pilar. A Tabela 4 relaciona as cores do modelo de barras da Figura 3 com as dimensões dos perfis. A legenda (2U) indica que este perfil foi criado a partir de dois outros perfis U soldados de forma a simular uma viga caixão. Os demais são perfis tubulares quadrados.

Tabela 4: Detalhamento de perfis, em milímetros

Perfis	20 metros	30 metros	40 metros
Verde	25,40 x 25,40 x 3,20	25,40 x 25,40 x 3,20	25,40 x 25,40 x 3,20
Magenta	38,10 x 38,10 x 6,35	50,80 x 50,80 x 4,76	50,8 x 50,8 x 4,76
Cinza	50,80 x 50,80 x 6,35	76,2 x 76,2 x 3,18	101,60 x 101,60 x 9,35
Vermelho	101,60 x 101,60 x 9,35	101,60 x 101,60 x 9,35	101,60 x 101,60 x 9,35
Azul	101,60 x 203,2 x 9,52 (2U)	152,4 x 228,6 x 7,94 (2U)	177,8 x 355,6 x 19,05 (2U)

4 Resultados e discussão

Os modelos 3D descritos no item 3 foram usados para fazer as análises estática e de vibração livre das estruturas. Já as respostas dinâmicas no domínio do tempo foram obtidas do programa desenvolvido para integração da equação de equilíbrio considerando um modelo 2D da estrutura usando os dados das propriedades dinâmicas extraídas dos modelos 3D.

Os resultados obtidos nas análises estáticas para todas as combinações de carregamentos recomendadas pelo EUROCOMP (1996) [3] de todas as passarelas analisadas mostraram que os elementos estruturais atendem às recomendações para o ELU. Também os deslocamentos máximos de todas as passarelas foram inferiores a $L/250$, valor limite exigido pelo EUROCOMP (1996) [3] para o ELS.

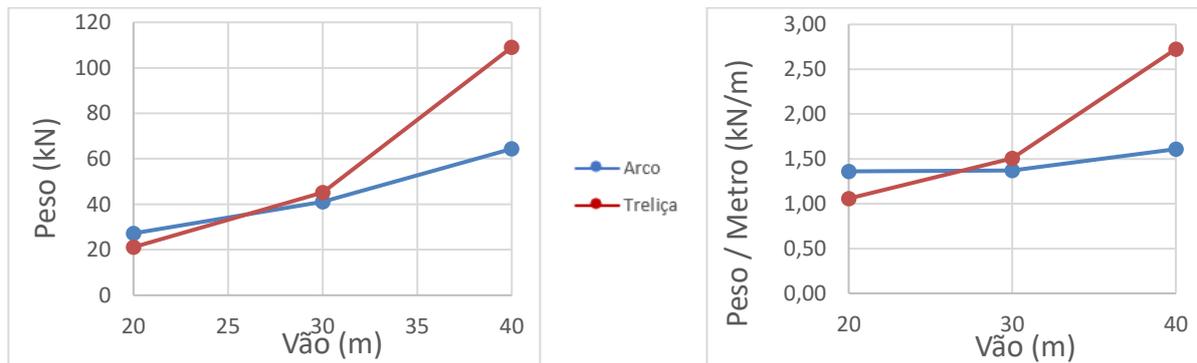


Figura 4: Indicadores de peso

O peso da passarela foi calculado para servir como um parâmetro de estimativa de custo, uma vez que essas peças são compradas por peso. A Figura 4 apresenta gráficos do peso das passarelas em função do vão, onde se observa que para o vão de 20 metros a passarela treliçada apresenta peso menor do que a em arco, já para os maiores vãos as passarelas em arco se mostraram mais econômicas. Outra observação importante é que as passarelas em arco apresentam a relação peso dividido por vão praticamente constante, enquanto que a treliçada houve um aumento expressivo do peso com o aumento do vão.

Na busca da geometria que atenda as prescrições normativas da análise estática, a passarela treliçada resultou em grande rigidez, deixando as passarelas com as suas primeiras frequências naturais altas e, por vezes, fora da zona de ressonância com o caminhar humano, além da rigidez ser um antagonista da oscilação, semelhante ao amortecimento. Seguindo o guia SÉTRA, que não considera a interação pessoa-estrutura, encontra-se as acelerações listadas na Tabela 6.

Nas análises de vibração livre, realizadas para se obter as propriedades dos modos naturais de vibração das passarelas, obteve-se os modos que podem ser excitados pelo caminhar humano (Figura 5):

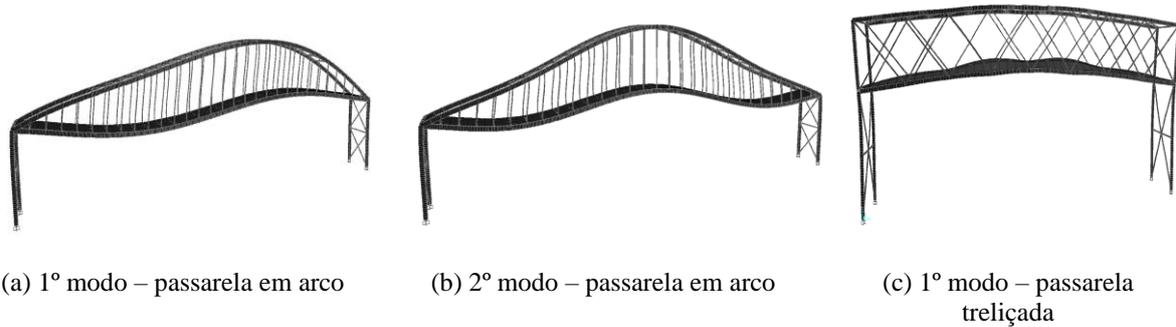


Figura 5 – Modos de vibração verticais com possibilidade de ressonância

Há uma nítida diferença entre o 1º modo de vibração vertical da passarela em arco (uma onda completa) em relação à treliçada (uma semi-onda), Figura 5. Esta característica confere ao modelo em arco uma vantagem, isso porque se trata de um modo antissimétrico que, ocupado por uma multidão, resulta numa força modal nula (vide Eq. (4)), e, por esta razão este modo não será observado neste trabalho. Já o 2º modo da passarela em arco, com três semi-ondas, costuma ter altas frequências e ser excitado apenas pelo 2º harmônico do caminhar humano, que é de menor intensidade, diminuindo as probabilidades de desconforto dos usuários. A Tabela 5 mostra em vermelho as frequências naturais coincidentes com as faixas do 1º ou 2º harmônico do caminhar humano (vide Figura 1). As frequências em verde estão fora da faixa de ressonância com os dois harmônicos da carga de multidão e não necessitam de análise dinâmica.

Tabela 5: Frequência naturais de vibração das passarelas (em Hz)

Passarela	Modo	20 metros	30 metros	40 metros
Arco	2º modo de flexão vertical	5,75	3,42	2,99
Treliçada	1º modo de flexão vertical	7,26	5,10	3,88

Tabela 6: Acelerações da passarela sem considerar interação pessoa estrutura (em m/s²)

Passarela	Modo	20 metros	30 metros	40 metros
Arco	2º Flexão Vertical	-	6,63	3,06
Treliçada	1º Flexão Vertical	-	-	10,54

As acelerações citadas na Tabela 6 além de demonstrarem nenhum conforto ao usuário (Tabela 1) também apresentaram valores extremos de aceleração. Esta última análise desconsidera a interação entre pessoa-estrutura, isto se faz quando a massa das pessoas não é representativa frente à massa da passarela. Todavia, numa análise mais acurada percebe-se que a passarela feita de material compósito é muito leve se comparada a passarelas feitas em concreto armado ou aço. A Tabela 7 mostra a relevância da massa da multidão em relação a massa total, considerando densidade de 1 pessoa por metro quadrado e a massa de cada usuário como 70 kg.

Tabela 7: Proporção da massa dos usuários para a massa total

	20 metros	30 metros	40 metros
Arco	54,77%	54,61%	50,60%
Treliçada	60,91%	52,25%	37,68%

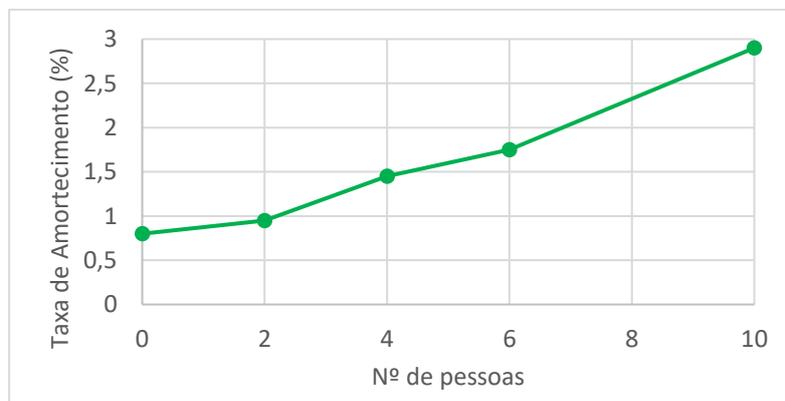
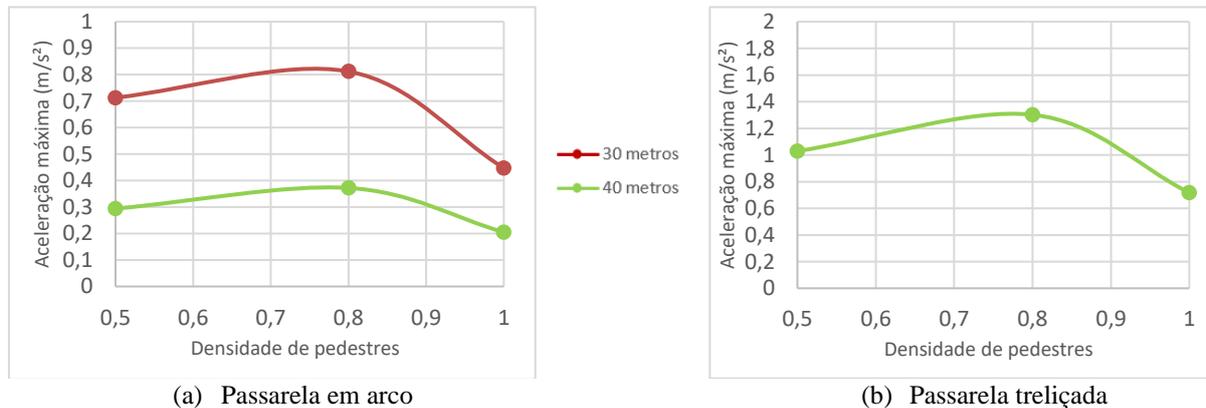


Figura 6: Acréscimo de amortecimento por usuário na forma ativa, adaptado de Zivanovic [6]

Em estudos como o de Pedersen [3], demonstra-se que, no caso de estruturas muito leves, a interação entre os usuários e a estrutura acrescenta amortecimento à passarela. Zivanovic [6] estudou o amortecimento acrescido por pessoas caminhando ao sistema estrutural. O gráfico da Figura 6 foi extrapolado para o número de usuários de cada passarela deste trabalho com limite máximo de amortecimento de 12%, limite de passarelas densamente povoadas segundo Teixeira [7].

Em todos os casos da Tabela 7 a massa das pessoas é muito expressiva, sendo um equívoco ignorar o amortecimento que os usuários acrescentam à estrutura. Sendo assim, a Figura 7 mostra os resultados das acelerações máximas para as passarelas em arco e treliça, considerando esta interação pessoa-estrutura.



(a) Passarela em arco

(b) Passarela treliçada

Figura 7: Acelerações máximas das passarelas considerando a interação pessoa-estrutura

O nível de conforto dos usuários, segundo os parâmetros do guia SÉTRA [4] (Tabela 1), em relação às acelerações listadas na Figura 7 foram conforto médio e máximo para as passarelas de 30 e 40 metros em arco, respectivamente, e sem conforto na passarela treliçada de 40 metros. Os valores obtidos são bem inferiores aqueles obtidos sem considerar a interação pessoa-estrutura, tal qual está prescrito no guia SÉTRA [4].

5 Conclusão

As concepções estruturais obtiveram performances diferentes em relação às cargas dinâmicas. Pelos dados e discussões anteriores a passarela treliçada se mostrou uma melhor opção que o arco para o vão de 20 metros. Ao contrário da passarela de 40 metros em que o arco se mostrou a melhor opção. Para o vão de 30 metros o resultado dinâmico é mais favorável à passarela treliçada ao passo que a passarela em arco é mais leve e, portanto, para os parâmetros deste trabalho, mais barata. Entretanto uma análise econômica mais precisa poderia ser feita para uma decisão mais apurada.

6 Referências

- [1] CARDOSO, Daniel C. T.; TOGASHI, T. S.; Experimental investigation on the flexural-torsional buckling behavior of pultruded GFRP angle columns. *Thin-Walled Structures* 2018; 125: 269 - 80, 2018.
- [2] VIEIRA, J. D., LIU T., HARRIES K. A.. Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections. *Proc Ins Civ Eng – Structural end Building* 2017; 171 (11): 855-66.
- [3] CLARKE, J. L. EUROCOMP design code and handbook: Structural design of polymer composites. E & FN Spon, London, 1996.
- [4] SÉTRA, Footbridges. Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading. Technical guide SETRA, Paris, France, 2006.
- [5] PEDERSEN L., An Aspect of Dynamic Human-Structure Interaction. IMAC-XXVI: Conference & Exposition on Structural Dynamics, 2008.
- [6] ZIVANOVIC, S.; DIAZ, I. M.; PAVIC, A. Influence of walking and standing crowds on structural dynamics properties. *Proceedings of the IMAC-XXVII*, February 2009.
- [7] TEIXEIRA, A. J.; Passarelas Estaiadas de materiais novos e Convencionais sob Ação de Cargas Dinâmicas Humanas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.