

On the dynamic analysis and design of pultruded GFRP I-beams

Anne C. L. Monteiro¹, Kildenberg K. F. Nunes², Hidelbrando J. F. Diógenes², Maximiliano Malite¹

¹*Dept. de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590, São Carlos/São Paulo, Brasil
anneclmonteiro@usp.br, mamalite@sc.usp.br*

²*Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental,
Cidade Universitária, s/n - João Pessoa, PB, Brasil
kildenberg.nunes@academico.com.br, hjfd@academico.ufpb.br*

Abstract. Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer (pGFRP) members are increasingly used in civil engineering applications, such as pedestrian bridges and floor systems. Published research indicates gaps in the analysis and design of pGFRP profiles under dynamic loads. Due to their low modulus of elasticity (about 1/10 that of steel) and lightweight, dynamic behavior is an essential aspect on the structural response of pGFRP members. This paper presents results of numerical and analytical investigations on the structural dynamic behavior of pGFRP I-beams through a parametric analysis that evaluates the influence of the useful height and cross-sections geometry in the natural frequency variation. Numerical analysis has been carried out in the linear elastic field through Finite Element Model to determine the modal shapes and related natural frequencies. For this analysis, the structural elements made of a homogeneous material with elastic properties obtained experimentally are considered. The results were discussed comparing the analytical predictions provided by different design approaches. Finally, the analytical dynamic response of pGFRP I-beams was compared with those obtained for steel elements. Performed investigation shows that pGFRP members are suitable for different human-induced vibrations applications.

Keywords: pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer, numerical analysis, natural frequency.

1 Introdução

Quando fabricado a partir da técnica de pultrusão, o PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) assume a forma de perfis estruturais mais leves e com resistência mecânica igual ou superior à dos perfis metálicos. Além da elevada relação resistência-peso específico, os perfis pultrudados PRFV (pPRFV) apresentam alta resistência à corrosão, baixa condutividade térmica e transparência eletromagnética. Tais características são especialmente vantajosas no projeto de estruturas industriais e de elementos estruturais submetidos à ação contínua de intempéries (e.g. pontes, plataformas *off-shore*, torres de transmissão de energia), onde a elevada durabilidade e o desempenho mecânico são requeridos.

Devido aos baixos módulos de elasticidade (até 10 vezes menores que os do aço) e peso específico, as estruturas pultrudadas são particularmente susceptíveis a problemas de vibração excessiva. Assim, ao contrário das estruturas em aço, cujo dimensionamento é normalmente governado pela verificação do Estado Limite Último (ELU), o Estado Limite de Serviço (ELS) é crítico no projeto de estruturas pultrudadas. Embora os perfis pPRFV venham sendo utilizados há décadas na indústria de construção civil, o número pesquisas sobre o comportamento dinâmico desses elementos estruturais ainda é limitado. Para que estruturas pPRFV sejam projetadas considerando um nível adequado de conforto ao usuário é importante que novos estudos particularmente acerca do Estado Limite de Vibração Excessiva (ELS-VE) sejam desenvolvidos.

Neste estudo, os resultados experimentais, obtidos por Boscato e Russo [1], para a frequência natural de uma viga bi-apoiada pultrudada PRFV com seção I, são analisados: por meio de: (i) modelos numéricos desenvolvidos via Métodos dos Elementos Finitos (MEF) e Teoria Generalizada de Viga (GBT); (ii) modelos analíticos baseados nas teorias da viga de Euler-Bernoulli e de Timoshenko. Validados os modelos teóricos, análises paramétricas permitiram avaliar a influência do comprimento e da geometria do perfil sobre o ELS-VE. Diante das limitações dimensionais das seções transversais dos perfis pPRFV comerciais, um exemplo de cálculo foi elaborado de modo

a analisar a contribuição da rigidez da laje, em um sistema de piso, composto por vigas mistas pPRFV. Por fim, a resposta dinâmica das vigas pPRFV foi comparada com a obtida para seções equivalentes em aço.

2 Análise de vibrações de vigas pPRFV

Devido à elevada relação resistência/rigidez dos compósitos pultrudados PRFV, o Estado Limite de Serviço (ELS) é normalmente condicionante no dimensionamento estrutural de elementos submetidos à flexão. Segundo Russo e Silvestri [2], o baixo peso específico associado ao reduzido coeficiente de amortecimento do material potencializa o estado de vibração excessiva e o aumento da amplificação dinâmica de tensões e deformações.

A frequência natural (f_n) para uma viga bi-apoiada constituída por material isotrópico pode ser prevista por meio da Eq. (1). No caso de vigas feitas de materiais ortotrópicos, as deformações transversais por cisalhamento e a inércia de rotação podem afetar a resposta e, portanto, precisam ser avaliadas. Assim, para o cálculo da frequência natural de uma viga bi-apoiada de material ortotrópico ($f_{n,1}$), Boscato e Russo [1] recomendam que a Eq. (2) seja utilizada.

$$f_n = n^2 \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{gJE_L}{\gamma A}} \quad (1)$$

$$f_{n,1} = n^2 \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{E_L J g}{A \gamma} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \pi^2 \rho^2 \frac{n^2}{L^2} \right) \left(1 + \frac{S_0 A E_L}{J b_0 G_{LT}} \right) \right]} \quad (2)$$

Nas Eqs. (1) e (2), n é o número do modo de vibração; L é o comprimento da viga; E_L é o módulo de elasticidade longitudinal; I é o momento de inércia à flexão; g é a aceleração da gravidade; A é a área da seção transversal da viga; γ é o peso específico do material; ρ é a inércia de rotação; G_{LT} é o módulo de cisalhamento no plano; b_0 é a largura da seção transversal; e S_0 é o momento estático.

Observe que o fator de correção α , associado à inércia rotacional e à deformação por cisalhamento (termo entre colchetes na Eq. (2)), é função da área da seção transversal e do comprimento da viga, bem como do seu grau de ortotropia (E_L/G_{LT}). A Fig. 1 mostra o comportamento de α para vigas com seções nominais 4" × 2" × 5/16" (101,60 × 50,80 × 7,94 mm) e 12" × 6" × 1/2" (304,80 × 152,40 × 12,70 mm) — referidas no gráfico como I1 e I2, respectivamente — para diferentes comprimentos e níveis variados de ortotropia ($E_L/G_{LT} = 6,7$, $E_L/G_{LT} = 13,4$, e $E_L/G_{LT} = 20,0$). As seções I1 e I2 coincidem com a da viga analisada nos ensaios experimentais de Boscato e Russo [1] e com a de maior seção disponibilizada no catálogo da fabricante Strongwell [3].

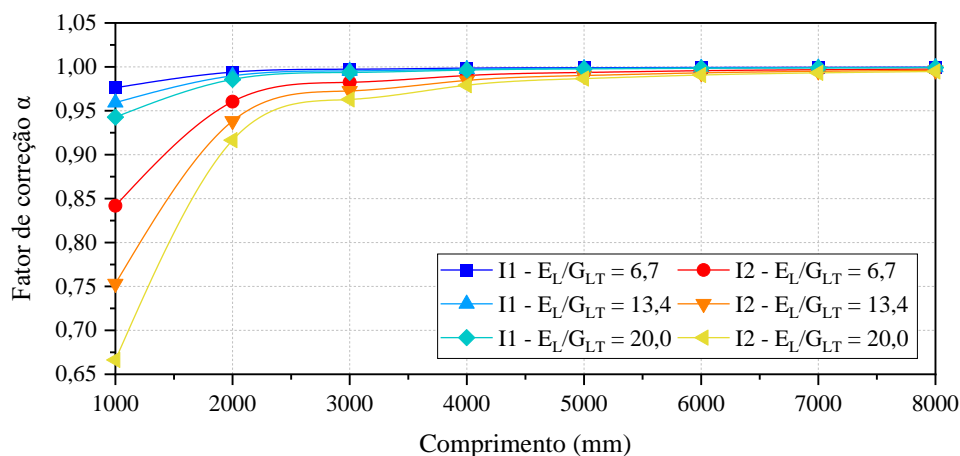


Figura 1. Variação de α em função do comprimento de uma viga pPRFV

Note que α é penalizado com a diminuição do comprimento e com o aumento do nível de ortotropia. Essa variação é suave no perfil I1, cuja seção transversal é reduzida, entretanto pode se tornar significativa para perfis de maior seção transversal, como se observa no caso de I2.

3 Estudo numérico

As frequências naturais (f_n) de vigas pultrudadas PRFV (pPRFV) foram analisadas neste estudo com auxílio dos softwares de simulação numérica ABAQUS® e GBTul. Os modelos numéricos baseados no Método de Elementos Finitos (MEF) e na Teoria Generalizada de Viga (GBT) permitiram confrontar os valores teóricos de f_n com aqueles obtidos experimentalmente por Boscato e Russo [1]. Os autores realizaram ensaios dinâmicos em perfis pPRFV de seções transversais variadas dispostos como vigas simplesmente apoiadas. As principais propriedades mecânicas e geométricas do material analisado são apresentadas na Tabela 1. O perfil de seção I com dimensões nominais $101,60 \times 50,80 \times 7,94$ mm será foco do presente estudo.

Tabela 1. Propriedades do material compósito analisado por Boscato e Russo [1]

Parâmetro	Propriedade	Valor
Propriedades físicas	Massa (kg)	8,65
Propriedades mecânicas	Módulo de elasticidade longitudinal - E_L (GPa)	23,0
	Módulo de elasticidade transversal - E_T (GPa)	8,50
	Módulo de cisalhamento no plano - G_{LT} (GPa)	3,45
	Módulo de cisalhamento fora do plano - G_{LT} e G_{T5} (GPa)	3,00
	Maior coeficiente de Poisson - ν_{LT}	0,23
	Coeficiente de Poisson à tração longitudinal - ν_{TL}	0,09

Após estudos preliminares de convergência, em que se variou o tipo de elemento finito e a razão de aspecto da malha, o modelo numérico via MEF foi modelado como um elemento de casca com integração reduzida S8R5 e malha com razão de 1:1. A diferença entre os resultados fornecidos pelos modelos numéricos avaliados foi discreta, optando-se, desse modo, por uma malha mais simples e de baixo custo computacional. Em conformidade às hipóteses assumidas na proposição das expressões analíticas para cálculo da frequência natural (Eqs. (1) e (2)), foram criados nós de referências sobre o centro geométrico da seção transversal do perfil I. Para definir as condições de contorno, esses nós foram acoplados às extremidades da viga por meio da ferramenta de interação *Coupling*. Em um dos nós de referência, as translações em todas as direções foram restringidas, enquanto na extremidade oposta apenas as translações nas direções x e y (vide Fig. 2a) foram mantidas fixas. Quanto às rotações, apenas a torção (rotação em torno do eixo z) foi restringida em ambas as extremidades. A Fig. 2a mostra o modelo numérico em Elementos Finitos (EF), destacando as condições de contorno e o sistema de coordenadas adotados. Na Fig. 2b, as configurações deformadas referentes ao 1º e 2º modos de vibração são apresentadas. Na análise via GBT, o modelo numérico foi discretizado em 10 elementos ao longo do comprimento e a condição de contorno simplesmente apoiada foi adotada. Na seção transversal, foram considerados 6 nós naturais e 7 nós intermediários. Ademais, todos os modos de deformação disponíveis no *software* GBTul foram considerados na análise.

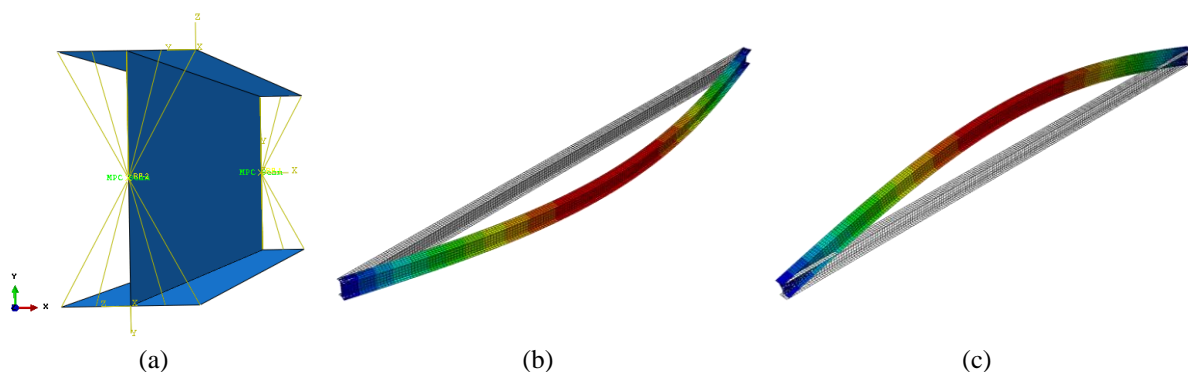


Figura 2. Viga pPRFV em EF: (a) condições de apoio; e configuração deformada referente ao (b) 1º e (c) 2º modos de vibração

4 Resultados e Discussões

4.1 Análise teórica

A Tabela 2 apresenta as frequências naturais (f_n) da viga pPRFV de seção I ($101,60 \times 50,80 \times 7,94$ mm) — referida ao longo do texto como II — associadas aos modos de vibração por flexão obtidas nos ensaios experimentais de Boscato e Russo [1], bem como os valores teóricos de f_n previstos analiticamente por meio das Eq. (1) e Eq. (2) e numericamente via ABAQUS® (MEF) e GBTul (GBT).

Tabela 2. Frequências naturais, em Hz, da viga I pPRFV sob vibração livre

Modo de vibração	Configuração deformada principal	Experimental (Boscato e Russo [1])	Analítico		Numérico	
			Eq. (1)	Eq. (2)	MEF	GBT
1°	Flexão na menor inércia	7,02	6,48	6,48	6,35	6,45
2°	Flexão na maior inércia	24,41	22,81	22,78	22,64	23,23

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram que o erro máximo entre o resultado experimental e a previsão teórica, seja analítica ou numérica, não excedeu 10%, para o 1° modo de vibração, e 7,5%, para o 2° modo de vibração, evidenciando assim que os modelos teóricos conseguiram traduzir de forma satisfatória o comportamento real da viga, sem superestimar o valor de referência. Como delineado na Fig. 1, para o baixo nível de ortotropia e reduzida dimensão da seção transversal avaliada, a variação do fator de correção α é discreta. De fato, com base nos resultados analíticos apresentados na Tabela 2, concluiu-se que α gerou uma diferença irrisória. Quanto à previsão numérica, o modelo em elementos finitos gerou o menor valor teórico de f_n , contudo a diferença em relação ao maior valor previsto (GBT) foi de no máximo 2,54%.

A pré-norma europeia [4] destaca que a frequência natural dos elementos estruturais pultrudados deve ser determinada para os casos de vibração forçada e de vibração livre. Boscato e Russo [1] avaliaram analiticamente a variação de f_n quando esforços solicitantes de 250 kg/m² e 500 kg/m² atuam sobre uma determinada faixa de influência sobre a viga, gerando a flexão em torno do eixo de maior inércia. Os autores compararam os valores obtidos com as frequências de vibração induzidas pelo homem em atividades de caminhada (1,6 a 2,4 Hz), corrida (2,0 a 3,5 Hz) e saltos (1,8 a 3,4 Hz). Para as sobrecargas assumidas na análise, a frequência natural obtida foi da ordem de 2 Hz, o que indica a possível ocorrência de ressonância na estrutura. O gráfico da Fig. 3a mostra a variação de f_n de II, em função do comprimento, quando a viga é solicitada por carregamentos distribuídos iguais a 50 kg/m², 100 kg/m², 150 kg/m², além daqueles já avaliados por Boscato e Russo [1] (250 kg/m² e 500 kg/m²).

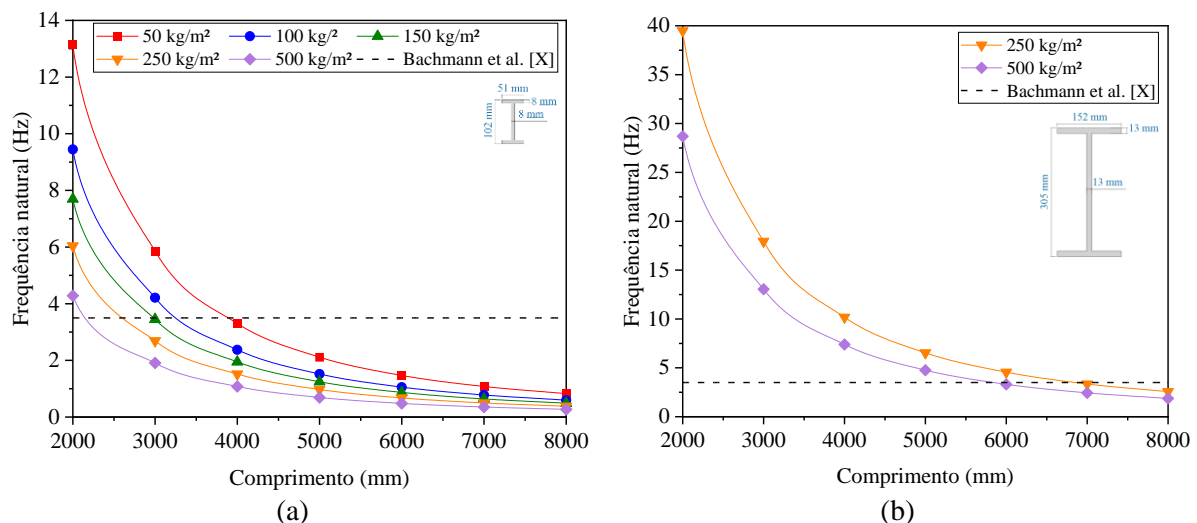


Figura 3. Frequência natural, em função do comprimento, para diferentes níveis de sobrecarga: (a) II; (b) I2

Os resultados obtidos mostram que a máxima sobrecarga admissível para a viga de três metros, de modo que frequências superiores às de ressonância ocorram, é de 100 kg/m². Adicionalmente, é importante destacar que a verificação da deformação excessiva da viga deve complementar a análise de vibrações. Para a sobrecarga de 100 kg/m², o deslocamento a meio vão da viga (ou flecha máxima imediata), calculado conforme a teoria de viga de

Timoshenko, resulta 18,20 mm, excedendo o limite $L/300$ [5], onde L é o comprimento do vão livre. Nota-se, portanto, que a viga avaliada por Boscato e Russo [1] aplica-se apenas a pisos de cobertura.

A Fig. 3b apresenta o parâmetro de f_n de uma viga pPRFV de seção $I\ 304,80 \times 152,40 \times 12,70$ mm (I2) — maior seção comercializada pela Strongwell [3] —, quando as sobrecargas avaliadas por Boscato e Russo [1] (250 kg/m^2 e 500 kg/m^2) são consideradas. Como esperado, a frequência natural aumentou de forma considerável, mantendo-se suficientemente afastada do valor crítico de ressonância. Destaca-se, ainda, que a flecha máxima não excedeu 2,5 mm. De fato, o uso de seções transversais maiores é uma alternativa para solucionar problemas relacionados à verificação do ELS, entretanto deve-se salientar que os perfis pPRFV são comercializados com seções reduzidas (cerca de 2 vezes menores que as de aço) [6], o que pode gerar limitações aos projetos estruturais. Alternativamente, sistemas de conexões podem ser utilizados entre a laje e a viga pPRFV, de modo a aumentar a rigidez da estrutura, constituindo as chamadas vigas mistas.

Conforme Neagoe et al. [7], devido ao baixo custo e à alta eficiência estrutural, as vigas mistas pultrudadas têm sido projetadas combinando perfis de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) ao concreto. Ao aumentar o peso próprio do sistema estrutural, o concreto melhora a estabilidade à flexão, a resistência e rigidez, e por consequência as características dinâmicas da estrutura. O perfil pPRFV e o concreto podem ser conectados por meio de juntas coladas, conectores mecânicos ou ainda uma combinação destes. Testes realizados em vigas mistas pultrudadas com juntas coladas mostram que uma camada adesiva fornece uma alta resistência à ligação e praticamente impede a ocorrência de deslizamento, proporcionando uma interação completa por cisalhamento [8].

Para avaliar a influência da interação laje-viga sobre o ELS-VE de um sistema estrutural de piso com vigas pultrudadas, um exemplo hipotético é proposto. Neste exemplo, a frequência natural de uma viga mista, cuja seção é ilustrada na Fig. 4 é calculada admitindo a interação completa e a ausência de interação entre a viga e a laje de concreto. A viga tem 4 metros de comprimento e foi considerada simplesmente apoiada. A laje de concreto armado tem peso específico e módulo de elasticidade iguais a 2500 kg/m^3 e 30 GPa , respectivamente. O módulo de elasticidade dinâmico do concreto foi assumido como 35% superior ao seu módulo estático. A rigidez da viga mista foi avaliada a partir do Método de Homogeneização da Seção utilizando-se as propriedades elásticas da Tabela 1 para o perfil pPRFV. Quanto aos esforços solicitantes, além do peso próprio dos elementos estruturais, uma sobrecarga de 300 kg/m^2 foi admitida.

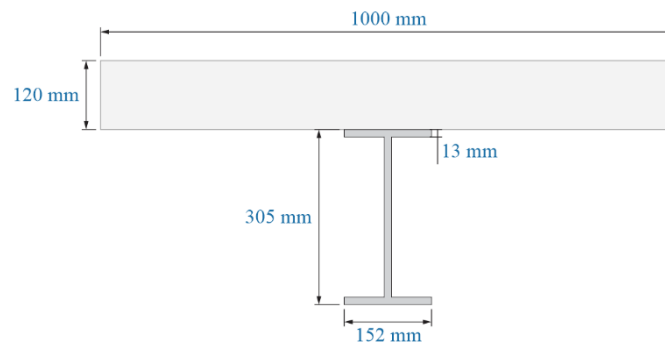


Figura 4. Seção transversal de um sistema de piso composto por laje de concreto e viga pPRFV

Para o caso de interação completa entre viga e laje, a frequência natural do conjunto é de 17,0 Hz. Com a desconsideração da contribuição da rigidez da laje houve uma redução de 69% da f_n , resultando em 5,3 Hz. Quando comparados às frequências naturais referentes às atividades humanas de caminhada, corrida e saltos, os resultados obtidos permitem verificar que a ocorrência do fenômeno de ressonância não será um problema, ainda que a rigidez do concreto não seja considerada na análise de vibração do piso. Quanto às condições mínimas de conforto, a pré-norma americana [9] menciona que, para os vãos típicos de piso de edificações, as vibrações desagradáveis são minimizadas quando as frequências naturais superam 8 Hz. Assim, os valores obtidos indicam que a ausência de interação do sistema de laje e de viga pode comprometer a eficiência da estrutura.

Avaliando o exemplo proposto a partir nos procedimentos normativos brasileiro [10] e americano [11], para o projeto de estruturas de concreto, as seguintes conclusões foram obtidas com base nos valores de f_n apresentados no parágrafo anterior: (i) caso a interação da laje com a viga não venha a ser considerada, a frequência obtida está em conformidade apenas para os espaços de escritórios e salões com cadeiras fixas ($f_n > 4,8\text{ Hz}$), enquanto que com a interação completa é possível atender a frequência mínima de todos os ambientes, quando a norma brasileira é utilizada como referência. O regulamento recomenda que a análise de vibração seja realizada com base no tipo de ocupação do ambiente (e.g. ginásio de esportes, salões de dança sem cadeiras fixas, passarelas de pedestres e ciclistas, escritórios e salões com cadeiras fixas); (ii) de acordo com o guia de projetos americano Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI) [11], para as características do projeto estrutural do exemplo proposto,

frequências maiores que 11,53 Hz devem ser atingidas, de modo que o conforto mínimo em um ambiente de escritório seja garantido.

Por fim, é importante destacar que este estudo teve como objetivo avaliar e discutir a influência de diferentes fatores (e.g. ortotropia do material, métodos de cálculo e interação viga-laje) sobre o ELS-VE das vigas pPRFV, por meio da determinação da frequência natural e da sua comparação com valores de referência. Contudo, uma verificação mais rigorosa requer o estudo da resposta dinâmica dos pisos em termos da análise de suas acelerações máximas.

4.2 Comparativo entre os perfis pultrudados e os de aço

O gráfico da Figura 5a compara qualitativamente algumas das principais propriedades físicas e mecânicas do aço e materiais compósitos. Segundo Brooks e Thrvey [12], embora os perfis estruturais pPRFV apresentem uma rigidez reduzida, quando duas ou mais de suas potencialidades (e.g. não condutividade, baixa densidade, alta resistência à corrosão) podem ser exploradas concomitantemente, o uso de perfis pPRFV é uma solução estrutural alternativa e potencialmente mais econômica que o emprego de perfis metálicos.

Boscato e Russo [1] compararam o comportamento dinâmico da viga I pPRFV sob vibração livre, analisada experimentalmente, com o valor analítico de f_n , obtido através da Eq. 1, para uma viga de aço com desempenho estrutural equivalente em termos de deslocamento transversal máximo. A seção transversal fictícia de aço com dimensão $57,5 \times 29 \times 4,6$ mm foi escolhida. No gráfico da Figura 5b a análise desenvolvida por Boscato e Russo [1] é estendida a comprimentos inferiores e superiores ao analisado (3 metros) no referido estudo.

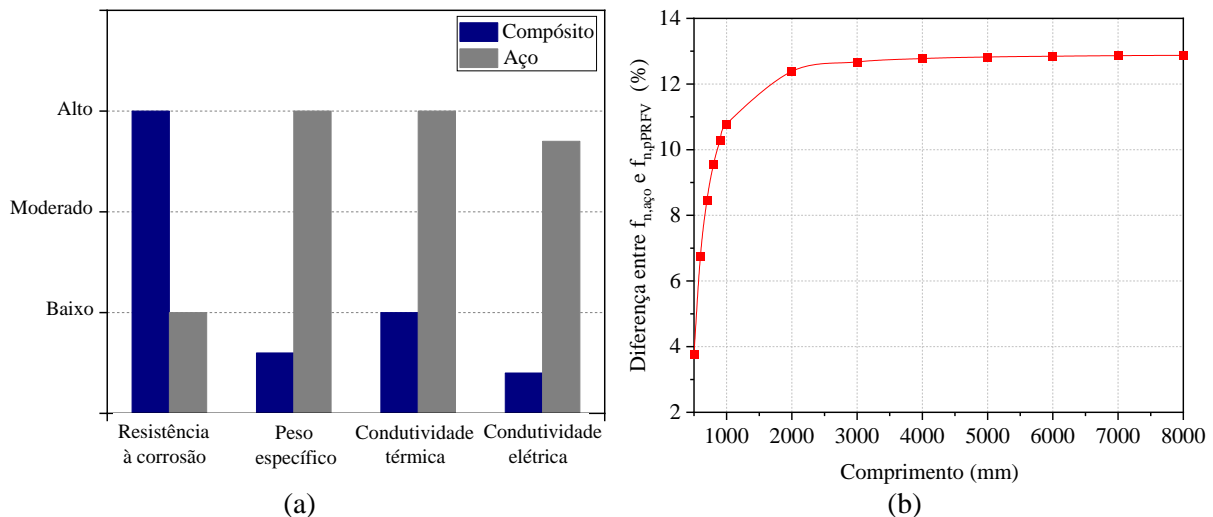


Figura 5. Frequência natural, em função do comprimento, para diferentes níveis de carregamento: (a) I1; (b) I2. Fonte: (a) Adaptado de Deutsch (1978), *apud* Seruti [13]; (b) Autoria própria

Observe que, embora os pultrudados PRFV apresentem uma baixa rigidez, o peso próprio da viga pPRFV, cerca de 35% inferior à de aço, gerou frequências naturais levemente superiores às da viga metálica, para a gama de comprimentos analisados. Para os comprimentos comerciais das vigas pPRFV (vão superior a 1 metro) a diferença entre os valores de f_n manteve-se praticamente constante (da ordem de 13%). Sem fins de projeto, a análise da faixa de comprimentos inferiores a 1 metro permite verificar a influência das deformações cisalhantes no comportamento das vigas pPRFV, comprovada no gráfico da Fig. 5b pela diminuição da diferença entre os valores de f_n .

5 Conclusões

O crescente emprego de perfis pultrudados PRFV (pPRFV), em sistemas de pisos, demanda que maiores investigações sejam realizadas acerca do seu comportamento dinâmico. O presente estudo avaliou a frequência natural da viga I pPRFV analisada experimentalmente por Boscato e Russo [1], por meio de modelos de cálculos analíticos e computacionais. As análises teóricas efetuadas permitiram concluir que:

- i. A ortotropia do material compósito PRFV teve influência limitada sobre o modelo de cálculo corrigido em função das deformações por cisalhamento e inércia rotacional;

- ii. Modelos numéricos em Elementos Finitos e baseados na Teoria Generalizada de Viga são ferramentas de cálculo eficientes e acuradas para a análise de vibrações de perfis pultrudados;
- iii. O uso de conexões que permitam a interação entre a viga pPRFV e a laje em sistemas de piso é uma alternativa interessante para que maiores níveis de conforto dinâmico sejam obtidos;
- iv. Sem a interação entre a viga e a laje, em mais da metade das situações previstas nos códigos normativos avaliados neste estudo, não foi possível atender as critério de frequência. A interação total entre esses elementos supera essa limitação.

Agradecimentos. O presente trabalho foi com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) – nº do Processo 141880/2020-1. Agradecemos ao MIMEE - Grupo de Pesquisa em Modelagem da Informação na Construção e Experimentação e Modelagem de Estruturas pelo suporte à pesquisa.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são as únicas pessoas responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo o material aqui incluído como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referências Bibliográficas

- [1] G. Boscato and S. Russo, “Free vibrations of pultruded FRP elements: mechanical characterization, analysis, and applications,” *J. Compos. Constr.*, vol. 13, no. 6, pp. 565–574, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:6(565).
- [2] S. Russo and M. Silvestri, “Perspectives of employment of pultruded FRP structural elements in seismic engineering field,” in *Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake*, 2008, pp. 1103–1112.
- [3] Strongwell, “Extren Design Guide.” Bristol, 2013.
- [4] EUR27666, *Prospect for new guidance in the design of FRP*. Publications Office of the European Union, 2016.
- [5] A. S. Mosallam, L. Feo, A. Elsadek, S. Pul, and R. Penna, “Structural evaluation of axial and rotational flexibility and strength of web-flange junctions of open-web pultruded composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 66, pp. 311–327, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.05.018.
- [6] L. C. Bank, *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [7] C. A. Neagoe, L. Gil, and M. A. Pérez, “Experimental study of GFRP-concrete hybrid beams with low degree of shear connection,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 141–151, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.024.
- [8] J. R. Correia, F. A. Branco, and J. Ferreira, “GFRP-concrete hybrid cross-sections for floors of buildings,” *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 6, pp. 1331–1343, 2009.
- [9] ASCE, *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures*. 2010, p. 189.
- [10] ABNT, “NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.” Rio de Janeiro, 2014.
- [11] PCI, *PCI Design Handbook*. Technical Documents, 2010.
- [12] R. J. Brooks and G. J. Thrvey, “Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers,” *Compos. Struct.*, vol. 32, no. 1–4, pp. 203–215, 1995, doi: 10.1016/0263-8223(95)00018-6.
- [13] C. A. Seruti, “Caracterização mecânica e desempenho estrutural de elementos pultrudados,” COPPE/UFRJ, 2013.