



Sistemas de Tensegridade Aplicados na Engenharia

Gabriela Penna Bianchin¹, Alexandre Luis Braun²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil /
pbianchingabi@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil /
alexandre.braun@ufrgs.br

Resumo

Estruturas constituídas por sistemas de tensegridade (*tensegrity*) são caracterizadas por serem pré-tensionadas e auto equilibradas, além de serem fabricadas a partir de dois elementos simples: barras rígidas (comprimidas) e cabos (tensionados). Desenvolvidas há mais 75 anos têm capturado o interesse de projetistas devido a suas propriedades peculiares, como: leveza, flexibilidade, resistência, resiliência e estética singular. Nas últimas décadas esses sistemas começaram a ser incorporados com maior frequência na engenharia e, hoje, estão presentes em pontes, passarelas, marquises, decks, coberturas e fachadas. Este trabalho apresenta uma breve revisão a respeito da definição e das aplicações de sistemas de tensegridade na engenharia, mostrando desafios e algumas perspectivas futuras de sua utilização, além do desenvolvimento da simulação numérica de um exemplo de aplicação. Para a simulação computacional utilizou-se a análise matricial de estruturas reticuladas com base no método dos elementos finitos e princípio dos trabalhos virtuais, no que tange à análise não linear de estruturas tridimensionais. Os resultados indicam, quando comparados às referências, que o modelo adotado consegue reproduzir adequadamente a resposta de estruturas em sistemas de tensegridade. De modo geral, as formulações empregadas contribuem para o avanço das simulações numéricas em sistemas *tensegrity*, oferecendo uma base para investigações mais complexas e aplicações práticas dessa tipologia futuramente.

Palavras-chave

Tensegrity; Engenharia; Método dos Elementos Finitos (MEF); Mecânica computacional.

Introdução

1. Definição:

A crescente demanda por soluções estruturais sustentáveis, leves e adaptáveis tem impulsionado o interesse pelos sistemas de tensegridade na engenharia contemporânea. Tensegridade é um princípio estrutural baseado no equilíbrio entre componentes comprimidos (barras rígidas) e tensionados (cabos), de forma que a estrutura como um todo mantenha sua forma e estabilidade (Skelton e Oliveira, 2009). O sistema, de modo geral, é autossustentável e eficaz, possibilitando a redução do peso próprio e, conseqüentemente, o consumo de recursos. As barras são geralmente confeccionadas em madeira, bambu ou metal, já os cabos em aço ou cordas (Gomez-Jauregui *et al.*, 2023). Além disso, a interação entre seus membros pressupõe uma estrutura leve, flexível, resistente e resiliente. Originados a partir dos trabalhos pioneiros de Buckminster Fuller e Kenneth Snelson nas décadas de 1960 e 1970, os sistemas *tensegrity* inicialmente foram explorados em contextos artísticos e experimentais, mas rapidamente despertaram interesse em diversas áreas da engenharia (Motro, 2003). Essas características tornam as estruturas *tensegrity* particularmente adequadas para aplicações que demandam alta performance estrutural com redução de peso próprio, além de possibilitar sistemas com comportamento dinâmico adaptável. A integração de sensores, atuadores e

materiais inteligentes em sistemas de tensegridade amplia ainda mais seu potencial, permitindo a criação de estruturas responsivas capazes de ajustar-se às cargas variáveis, como as provocadas por vento ou sismos (Kabošová *et al.*, 2020).

As estruturas de tensegridade enquadram-se na categoria das tensoestruturas, pois sua estabilidade e existência dependem diretamente da aplicação de um campo equilibrado de tensões entre elementos comprimidos e tensionados. Nesses sistemas, há uma relação intrínseca entre a geometria final assumida e o estado de pretensão aplicado — fator que eleva significativamente a rigidez global. A determinação dessa configuração estável é obtida por meio de um processo conhecido como busca de forma (*form finding*), no qual se identifica a disposição geométrica e o nível de tensões que permitem ao sistema atingir o equilíbrio estático desejado (Skelton e Oliveira, 2009). Esse processo considera simultaneamente aspectos estruturais e geométricos, resultando em uma forma que não é arbitrária, mas consequência direta da interação entre esforços internos e restrições impostas. Sem a aplicação adequada de pretensão, as estruturas de tensegridade tendem a apresentar instabilidade, uma vez que a integridade do conjunto depende do estado inicial de tensões previamente calibrado (Zhang e Ohsaki, 2015).

Na prática, a busca de forma em estruturas *tensegrity* é frequentemente conduzida por métodos computacionais capazes de lidar com a forte não linearidade geométrica inerente ao sistema. Entre os métodos mais utilizados destacam-se: o método de densidade de força (*Force Density Method*), que atribui valores pré-definidos à relação entre força e comprimento de cada elemento, resolvendo o equilíbrio estático por meio de sistemas lineares, e o método das forças de autoequilíbrio (*Self-Stress Method*), o qual determina os estados de tensão admissíveis capazes de manter a forma desejada. Em muitos casos, combina-se a *form finding* com algoritmos de otimização visando obter formas que conciliem requisitos estéticos, eficiência estrutural e restrições construtivas (Motro, 2003).

2. Aplicações:

Diversas áreas do conhecimento utilizam-se deste tipo de estrutura, tais quais: arte, biomecânica, medicina, robótica, engenharia aeroespacial e engenharia estrutural. Conforme Vumiliya *et al.* (2025), apesar de intensas discussões a respeito das definições de estruturas *tensegrity*, poucos trabalhos abordam acerca das aplicações dos princípios estruturais em construções civis. Para os autores, os campos da arte e a arquitetura foram os primeiros a introduzir estruturas *tensegrity*, resultado do esforço de um de seus precursores, o arquiteto Buckminster Fuller.

As primeiras aplicações documentadas do princípio de tensegridade na literatura correspondem às torres compostas por “módulos de Snelson” (Figura 1a), caracterizadas por barras rígidas submetidas à compressão, interligadas por cabos de alta resistência à tração, sem contato direto entre os elementos comprimidos. Com o avanço das pesquisas e o domínio de técnicas construtivas, esses conceitos foram progressivamente incorporados em projetos de maior complexidade, como domos, cúpulas, pontes e coberturas tensionadas, devido à elevada eficiência estrutural e à relação favorável entre resistência e peso próprio. Um exemplo notável é o projeto do Estádio de La Plata, na Argentina (Figura 1d), cuja concepção estrutural baseia-se diretamente no primeiro estádio a adotar o sistema — o *Atlanta Falcons Football Stadium* (Figura 1e), inaugurado em 1992 nos Estados Unidos e construído para sediar os Jogos Olímpicos de 1996. Outra aplicação emblemática é a ponte *Kurilpa* (Figura 1c), na Austrália, inaugurada em 2009, com 470 m de extensão e 6,5 m de largura, cuja estrutura integral segue os princípios da tensegridade, utilizando mastros inclinados e um sistema tridimensional de cabos tensionados para garantir estabilidade e resistência às ações de vento e cargas dinâmicas.

Além das obras de grande porte, investigações recentes têm explorado o emprego dessa tipologia em fachadas adaptativas, associando a leveza e a flexibilidade do sistema a mecanismos de controle ativo.

Nesse contexto, destaca-se a pesquisa de Kabošová *et al.* (2020), que analisou o desempenho de fachadas baseadas em tensegridade (Figura 1b) capazes de modificar a geometria da edificação em resposta à pressão exercida pelo vento incidente, com o objetivo de otimizar o comportamento aerodinâmico, reduzir solicitações estruturais e potencializar a eficiência energética. Além disso, a aplicação desses sistemas em estruturas espaciais, robótica e engenharia biomédica demonstra a versatilidade do conceito e o seu potencial de expansão em múltiplos campos do conhecimento (Gomez-Jauregui *et al.*, 2023).

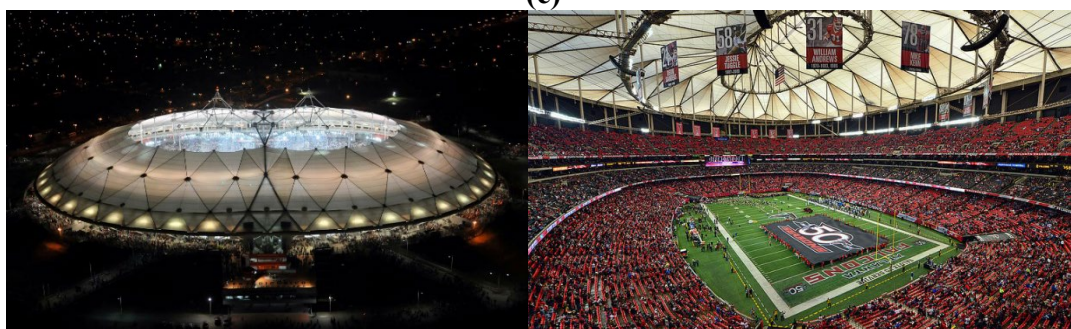
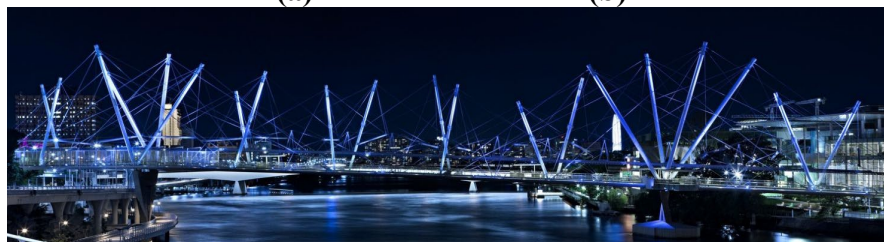
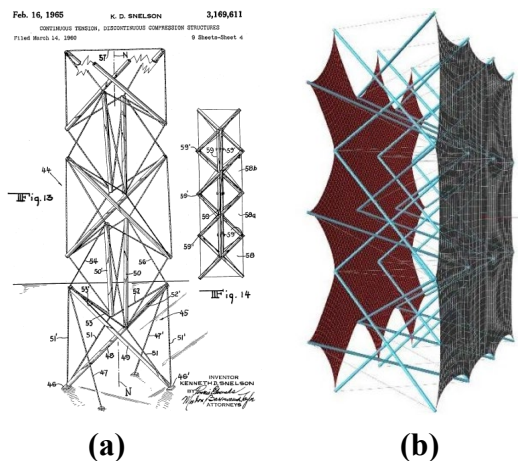


Figura 1 – Exemplos de estruturas *tensegrity*: (a) Módulos de torre patentado por Snelson; (b) Fachada adaptativa - Kabošová *et al.* (2020); (c) Ponte Kurilpa¹; (d) Domo – Estadio Único Ciudad de La Plata²; (e) Domo – Atlanta Falcons Football Stadium³.

¹ Fonte: https://www.coxarchitecture.com.au/wp-content/uploads/2019/08/406081_00_N251_medium-1485x539.jpg. Acesso em 10 de Agosto de 2025.

² Fonte: https://www.archdaily.com.br/br/01-38533/estadio-unico-ciudad-de-la-plata-roberto-ferreira-e-arquitectos-asociados/38533_38544. Acesso em 08 de Agosto de 2025.

³ Fonte: <https://www.stadiumsofprofootball.com/stadiums/georgia-dome/>. Acesso em 08 de Agosto de 2025.

3. Desafios e perspectivas:

Apesar do avanço significativo, principalmente com o surgimento de estruturas de tensegridade espaciais complexas, como cúpulas e pontes, diversos desafios técnicos e científicos ainda limitam a plena aplicação dos sistemas *tensegrity* em larga escala, especialmente no que se refere as análises de comportamento não linear e estabilidade estrutural (Kahla *et al.*, 2020). A ausência de normatização específica para o dimensionamento e a verificação desse tipo de sistema dificulta a adoção em projetos convencionais, além de exigir conhecimento especializado para modelagem, fabricação e montagem. Outro ponto crítico é o controle das deformações e deslocamentos, que, devido à elevada flexibilidade, podem comprometer o desempenho estrutural se não forem monitorados e ajustados adequadamente (Motro, 2003). Além disso, a análise estrutural deve considerar interações dinâmicas e possíveis degradações dos materiais tensionados, como cabos, que influenciam diretamente a durabilidade e segurança da estrutura (Vumiliya *et al.*, 2025). Assim, a integração com sistemas de controle adaptativo e materiais inteligentes, embora promissora, exige pesquisa aprofundada para garantir confiabilidade e viabilidade prática em diferentes ambientes operacionais.

Nesse contexto, as perspectivas futuras são desafiadoras, mas promissoras e apontam para a utilização crescente de materiais avançados nos sistemas *tensegrity*, tais quais ligas com memória de forma e compósitos de alta resistência, e para a incorporação de algoritmos de otimização baseados em inteligência artificial e métodos evolutivos, que possibilitem o desenvolvimento de estruturas *tensegrity* cada vez mais eficientes, leves e responsivas (Zhao *et al.*, 2018). O avanço das técnicas de simulação numérica e de controle ativo permite vislumbrar sistemas de tensegridade capazes de se ajustar dinamicamente às cargas aplicadas, tornando-os candidatos a aplicações inovadoras, como coberturas retráteis, estruturas inteligentes e sistemas aeroespaciais. A tendência de incorporar automação e sensores para monitoramento em tempo real também contribui para superar limitações atuais. Essas inovações devem expandir o uso da tensegridade em aplicações que vão desde a construção civil sustentável até a exploração espacial e robótica avançada, consolidando esse sistema como uma estratégia estrutural fundamental para os desafios da engenharia desse século.

Assim, este trabalho apresentou na seção da introdução uma breve revisão a respeito da definição e das aplicações do sistema de tensegridade na engenharia, refletindo sobre alguns desafios e perspectivas futuras acerca de sua utilização. Com o intuito de contribuir para a aplicação do sistema na engenharia e para o avanço do conhecimento e divulgação dessa tecnologia, o trabalho objetiva, também, o desenvolvimento de uma aplicação numérica, descrita a seguir, a partir de rotinas numéricas implementadas em linguagem *Fortran90*.

Formulação numérica

De modo geral, o comportamento mecânico de estruturas *tensegrity* devem respeitar as seguintes hipóteses: (i) as barras não estão conectadas entre si pelas suas extremidades de nós (articulações), que permitem o giro livre sobre estes; (ii) o peso próprio da estrutura é desprezado, com cargas externas aplicadas diretamente sobre os nós; (iii) os membros têm comportamento elástico, não apresentando plastificação, nem flambagem; (iv) os membros suportam apenas forças axiais, de compressão ou tração. Estruturas de tensegridade podem ser tratadas a partir de elementos de treliças espaciais compostas por elementos tracionados (cabos) e comprimidos (barras), que se estabilizam mutuamente (Kahla *et al.*, 2020).

De acordo com essa formulação a matriz rigidez local (Eq. 1) de um elemento de treliça espacial (com 3 graus de liberdade por nó) é definida a partir de seus nós (i e j), cujos vetores de deslocamento nodal encontram-se no sistema de coordenadas cartesiano (x,y,z) e o eixo do elemento é encontrado paralelo ao x , logo:

$$[k] = [k_e] + [k_g] + [k_{nl}] \quad (1)$$

onde $[k_e]$ representa a matriz elástica, $[k_g]$ a matriz geométrica e $[k_{nl}]$ a matriz rigidez não linear, todas em nível local de elemento. Sendo E_e módulo de elasticidade do material, A_e área da seção transversal da barra, L_e comprimento da barra e F a força axial do elemento, as matrizes locais podem ser definidas como:

$$[k_e] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [k_g] = \frac{F}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para avaliar o comportamento das estruturas de tensegridade é adotado um modelo geometricamente não linear com abordagem lagrangeana atualizada. A equação não linear do movimento, quando submetida a uma carga dinâmica, é expressa no instante t como:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{P\} \quad (3)$$

onde $[M]$ representa a matriz de massa da estrutura, $[C]$ a matriz de amortecimento da estrutura, $[K]$ a matriz rigidez da estrutura, $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$ e $\{X\}$ os vetores de aceleração, velocidade e deslocamentos nodais, respectivamente, e $\{P\}$ o vetor de forças nodais aplicadas.

Do ponto de vista matemático, a equação de equilíbrio obtida pela discretização através do MEF forma um sistema de equações diferenciais de segunda ordem. Para a análise dinâmica não linear e solução das mesmas emprega-se o método α -generalizado (mais informações em Braun, 2007).

Aplicação numérica

O exemplo desta seção objetiva demonstrar a precisão e eficiência do código com a simulação de elementos de tensegridade (*tensegrity*). A aplicação numérica aqui apresentada refere-se à análise dinâmica não linear de uma viga de tensegridade tridimensional, composta por cinco típicos módulos (ou unidades) *quadruplex*, já apresentado na configuração de equilíbrio. Este modelo foi utilizado por Feng *et al.* (2018), que o propuseram com o intuito de evidenciar a capacidade de mitigação da vibração percebida durante a análise dinâmica, utilizando o controle ótimo em cinco cenários diferentes em relação à posição dos atuadores.

A geometria é apresentada na Figura 2. A viga de tensegridade possui 76 elementos (20 barras e 56 cabos) e 28 nós, já apresentados em sua configuração de equilíbrio. As constantes físicas e geométricas empregadas na presente análise são as seguintes: massa específica dos cabos (ρ_c) = $1,50 \times 10^3$ kg/m³; módulo de elasticidade dos cabos (E_c) = $4,00 \times 10^{10}$ N/m²; área da seção transversal dos cabos (A_c) = $1,2566 \times 10^{-5}$ m² massa específica das barras (ρ_b) = $7,85 \times 10^3$ kg/m³; módulo de elasticidade das barras (E_b) = $2,00 \times 10^{11}$ N/m²; área da seção transversal das barras (A_b) = $7,0686 \times 10^{-4}$ m²; passo de tempo (Δt) = 0,02 s. O tempo de simulação são 80 segundos físicos. A pretensão aplicada nas barras é de -385,00 kN, nos cabos internos 192,50 kN e nos cabos periféricos 385,00 kN.

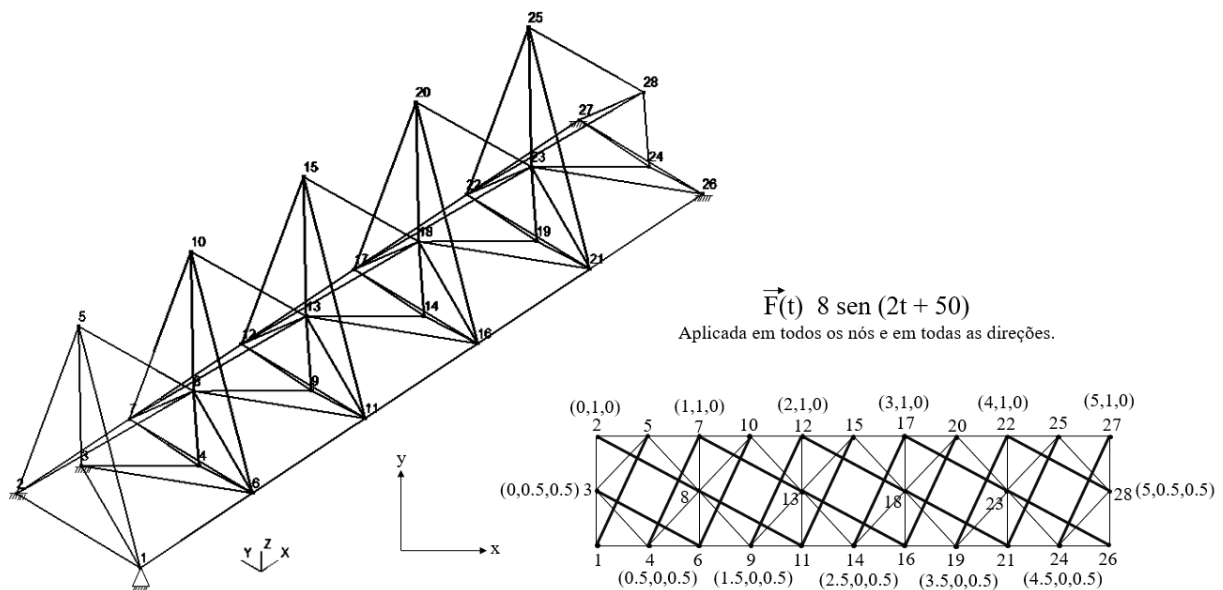
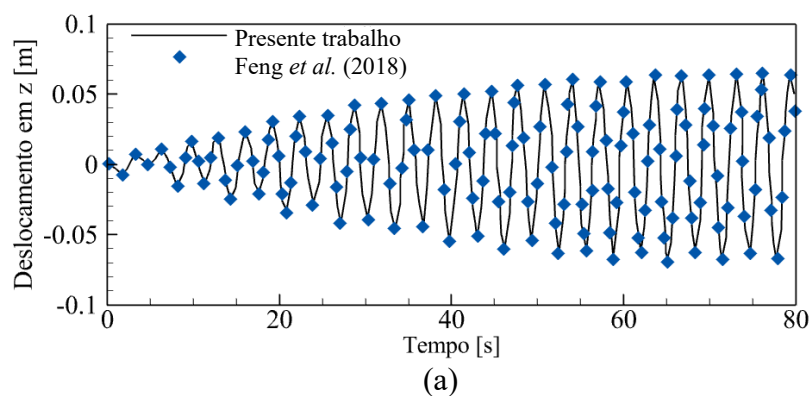


Figura 2 – Geometria da viga *tensegrity* (adaptado de Feng *et al.*, 2018).

Os nós 13 e 16, localizados no centro da viga, foram selecionados para a análise dos deslocamentos verticais. Os resultados obtidos pela simulação proposta neste trabalho foram comparados aos apresentados por Feng *et al.* (2018), em condição livre de controle vibracional. De modo geral, o código implementado demonstrou desempenho satisfatório na reprodução dos resultados de referência, mesmo com a consideração dos efeitos não lineares. O deslocamento máximo verificado para o nó 13 foi de 67 mm, correspondendo a 97 % de similaridade em relação ao estudo de referência; para o nó 16, o valor máximo foi de 23,5 mm, com 91 % de similaridade. O cabo mais solicitado, cuja alteração (alongamento) foi mais significativa, corresponde àquele entre os nós 11 e 16, resultando na força interna máxima de 752,67 kN (em tração). A barra mais solicitada, localizada entre os nós 11 e 15, apresentou valor máximo de compressão interna de -461,336 kN.

A importância de implementar algoritmos de controle, como a referência, reside no fato de ser necessário manter a configuração autoequilibrada da estrutura, uma vez que forças intensas aplicadas sobre elas podem modificar a posição dos nós e os comprimentos dos cabos alterando o comportamento estrutural da tensegridade, levando, inclusive, a instabilidades.



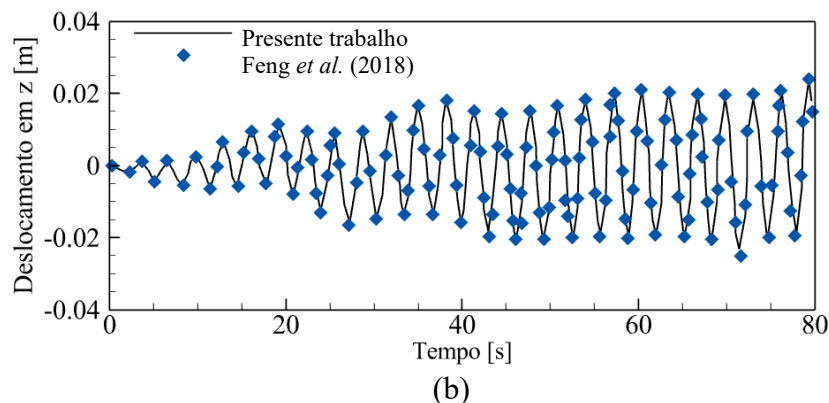


Figura 3 – Deslocamentos verticais: (a) nó 13; (b) nó 16.

Conclusões

Estruturas de tensegridade são sistemas protendidos e autoportantes, compostos por barras submetidas à compressão e cabos tensionados. Suas características conferem grande versatilidade, permitindo que sejam facilmente manipuladas e ajustadas para assumir diferentes geometrias e configurações. Essa capacidade as torna especialmente adequadas para a engenharia de estruturas, sobretudo em aplicações que demandam soluções adaptativas associadas a sistemas de controle. Por serem leves e flexíveis, é imprescindível analisar seu comportamento por meio de simulações computacionais, garantindo a segurança e a estabilidade do conjunto estrutural.

O trabalho desenvolvido evidencia o potencial dos sistemas de tensegridade como solução estrutural leve, eficiente e adaptável, alinhada às demandas contemporâneas da engenharia. Os resultados obtidos na seção de aplicação numérica demonstram que o modelo desenvolvido foi capaz de reproduzir com precisão o comportamento estrutural da viga de tensegridade analisada, verificando a formulação empregada e indicando a capacidade de capturar, até mesmo, efeitos não lineares importantes. De modo geral, as formulações empregadas contribuem para o avanço das simulações numéricas em sistemas *tensegrity*, oferecendo uma base para investigações mais complexas e aplicações práticas dessa tipologia.

Como continuidade de trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de uma formulação acoplada envolvendo elementos de casca e treliça em tensegridade com controle ótimo modal para a análise dinâmica de coberturas idealizadas como estruturas inteligentes, capazes de responder automaticamente à ação do vento.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro a esta pesquisa em andamento.

Referências

- BRAUN, A. L. Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido-estrutura. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 283 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- FENG, X.; MIAH, M.; OU, Y. Dynamic behaviour and vibration mitigation of a spatial tensegrity beam. *Engineering Structures*, v. 171, p. 1007-1016, 2018.



- GOMEZ-JAUREGUI, V.; CARRILLO-RODRIGUEZ, A.; MANCHADO, C.; LASTRA-GONZALEZ, P. Tensegrity applications to architecture, engineering and robotics: a review. *Applied Sciences*, v. 13, p. 8669, 2023.
- KABOŠOVÁ, A.; et al. Adaptive tensegrity façades responding to wind loads. *Journal of Building Engineering*, v. 32, p. 101807, 2020.
- KAHLA, N.; OUNI, M. ALI., N.; KHAN, R. Nonlinear Dynamic Response and Stability Analysis of a Tensegrity Bridge to Select cable rupture. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 17(2), 2020.
- MOTRO, R. *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. London: Kogan Page Science, 2003.
- SKELTON, R. E.; OLIVEIRA, M. C. *Tensegrity Systems*. New York: Springer, 2009.
- VUMILIYA, A.; LUO, A.; LIU, H. Investigation of Static and dynamic responses of tensegrity-based footbridge structures with integrated deck plates subjected to time-independent load, *Mechanics Research Communications*, v. 146, 12p., 2025.
- ZHANG, J. Y.; OHSAKI, M. *Tensegrity Structures : Form, Stability and Symetry*, 6th. ed. Springer, 2015.
- ZHAO, X.; WANG, B.; ZHANG, J. Form-finding and optimization of tensegrity structures based on genetic algorithms. *Engineering Structures*, v. 171, p. 503–513, 2018.