



PROJETO DE POSTES EM MATERIAL COMPOSTO USANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Plínio Ricardo dos Santos

Carlos Alberto Cimini Jr

plinioricardosantos@hotmail.com

cimini@ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, departamento de Engenharia de Estruturas

Av. Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumo. Tanto o Método dos Elementos Finitos como o Método das Diferenças Finitas são abordagens adequadas para resolver problemas estruturais, principalmente de geometrias complexas. Os postes têm um importante uso na distribuição de energia elétrica, telefonia e conexão à internet. Atualmente, os postes são feitos de madeira, concreto armado e aço. No entanto, estes materiais estão submetidos a problemas como a rápida degradação, peso, transporte, difícil instalação e corrosão. Os materiais compostos, como os Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV), apresentam grandes vantagens, como rigidez e resistência específicas, durabilidade, fácil logística para transporte e instalação e isolamento elétrico. Estruturas monocoque e semi-monocoque, comumente usadas em fuselagens de aeronaves, permitem redução de peso para a mesma resistência e rigidez, que combinada com o uso de materiais compostos, geram estruturas ainda mais leves. Neste trabalho, as configurações de estruturas monocoque e semi-monocoque são analisadas para aplicações em postes, usando reforçadores longitudinais e anéis transversais, em diferentes combinações. Um código em Matlab® baseado no Método das Diferenças Finitas foi desenvolvido para o cálculo da deflexão máxima do poste com o objetivo de combinar a resistência e a rigidez requeridas. Usou-se a plataforma comercial Abaqus™, via Método dos Elementos Finitos, para verificar a flambagem global e local.

Palavras chave: Postes; Método dos Elementos Finitos; Método das Diferenças Finitas; materiais compostos; monocoque; semi-monocoque

INTRODUÇÃO

Os postes de transmissão de energia elétrica, telefonia e iluminação são constituídos tradicionalmente de madeira, aço ou concreto reforçado com aço. No entanto existem algumas desvantagens quanto ao uso destes materiais. O uso da madeira, por exemplo, gera limitação na altura final, além sofrer decomposição pelo ataque de fungos e bactérias. Os postes fabricados em concretos são mais pesados, acarretando problemas de transporte e posicionamento. O aço também oferece maior peso, e, além disso, possuem problemas de corrosão. Esses são alguns dos problemas que têm feito fabricantes e pesquisadores buscarem outras alternativas para o projeto e construção dos postes, (Metiche e Masmoudi, 2012). Existem algumas alternativas que buscam solucionar esses problemas, como o tratamento químico feito na madeira e o uso de galvanização ou tintas na superfície do aço. Outra alternativa é a busca por novos materiais que atendem as condições impostas nas redes elétricas.

Para se obter estruturas leves, busca-se algumas alternativas. Estruturas de cascas finas onde a superfície externa é usualmente suportada por elementos enrijecedores longitudinais e estruturas transversais são chamadas de estruturas *semi-monocoque*. Isso permite resistir melhor às cargas de compressão, flexão e torção, evitando principalmente a flambagem. Já as estruturas que dependem apenas da própria casca para resistir aos esforços são chamadas estruturas *monocoques*, (Megson, 1999).

Atualmente o uso de fibras reforçadas tem sido a solução não só na indústria aeroespacial, onde estes materiais mais se destacam, mas também nas indústrias automotivas e de construções civis. Alguns autores como Birchall *et al.* (2001) e Alípio (2014) estudaram o uso da fibra de vidro na matriz polimérica (ou polímero reforçado por fibras de vidro - PRFV) para aplicações em postes utilizando uma disposição construtiva em material composto polimérico, utilizando a configuração *semi-monocoque*, apenas com enrijecedores longitudinais.

Atualmente são fabricados alguns tipos de postes em PRFV na configuração *monocoque*. Segundo a empresa Petrofisa (2008), os postes *monocoque* fabricados possuem maiores custos quando comparados com os postes de concreto. No entanto, quando analisados em um contexto global, levando em conta os custos com transporte, instalação e manutenção, o custo final é menor. Além disso, é possível reparar o poste em caso de impacto por veículos, não havendo a necessidade da troca completa do produto, fato que não ocorre em postes de concreto (Petrofisa, 2008).

Em se tratando de dimensionamento estrutural, quando a geometria do problema não favorece a solução analítica, recorre-se aos métodos numéricos, como por exemplo o Método dos Elementos Finitos (MEF). Um outro método existente é o Método das Diferenças Finitas, que nada mais é do que uma maneira numérica de aproximar a solução de equações diferenciais usando-se a série de Taylor. Soares (2010), avaliou a convergência deste método aplicado à teoria de vigas de Bernoulli-Euler, obtendo resultados com grande precisão. Segundo Cunha (2000), para aplicar o método, primeiramente deve-se discretizar a região onde procura-se a solução. Este é um procedimento comum quando métodos numéricos são utilizados na solução de equações diferenciais.

Neste trabalho, serão analisados postes nas configurações *monocoque* e *semi-monocoque* utilizando material PRFV. Sabendo que uma das principais imposições das concessionárias de energia elétrica é máxima flecha na extremidade do poste, implementou-se em Matlab®, o

Método das Diferenças Finitas para determinar a máxima flecha. Assim, em seguida, utilizou-se o software comercial Abaqus®, baseado em elementos finitos para analisar a estabilidade estrutural, um dos principais meios de falha de estruturas esbeltas.

1 CARACTERÍSTICAS DO POSTE

A Figura 1 ilustra o poste e seus componentes principais a serem estudados. O revestimento externo é uma casca formada por várias camadas de material composto (PRFV), com determinada orientação das fibras. Este elemento resiste principalmente ao cisalhamento e pode ser fabricado pelo método *filament winding* (Gay, 2015). Os reforçadores longitudinais são colados no revestimento com resina e terão função de resistir aos momentos fletores gerados pelas cargas transversais, além de enrijecer a estrutura, evitando flechas excessivas. Estes reforçadores poderão ser fabricados pelo processo de pultrusão (Gay, 2015). Já os anéis, que também são colados, terão o principal objetivo de resistir à flambagem local, podendo ser fabricados em madeira.

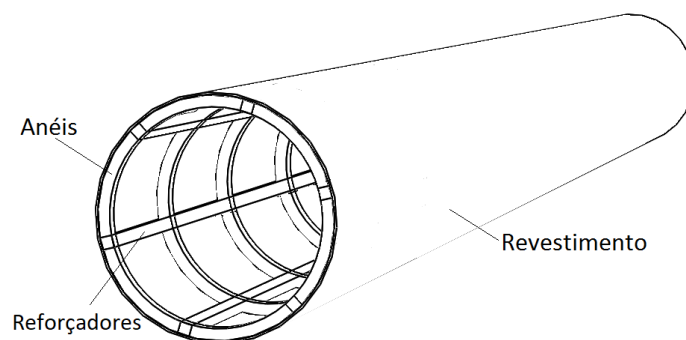


Figura 1: Elementos do poste.

Para os anéis, utilizaram-se as propriedades típicas de madeiras usadas em postes, apresentadas na Tabela 1. Já para o revestimento e os reforçadores, utilizaram-se PRFV, mais especificamente fibras de vidro na matriz de resina poliéster, orientadas longitudinalmente a 45° no revestimento e 0° nos reforçadores. As propriedades são apresentadas na Tabela 2. Este tipo de material possui um menor custo, quando comparados com outros materiais compostos laminados, como, por exemplo, carbono/epóxi e Kevlar®/epóxi.

Tabela 1: Propriedades típicas da madeira para uso em postes (Pfeil, 2013).

ρ (kg/m ³)	f_c (Mpa)	f_t (Mpa)	f_m (Mpa)	f_v (Mpa)	E_c (Mpa)
999,00	62,00	123,00	3,90	10,70	18421,00

Tabela 2: Propriedades da fibra de vidro/poliéster (Fam, Kim e Son, 2010).

ρ (kg/m ³)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	F_{1t} (MPa)	F_{1c} (MPa)	F_{2t} (MPa)	F_{2c} (MPa)	F_{12} (MPa)
2540	43300	11900	0,24	4600	1020	-620	40	-140	60

Para fins de comparação, foram analisadas três configurações de poste: *monocoque*, *semi-monocoque* com apenas reforçadores e *semi-monocoque* com reforçadores e anéis. Os diâmetros da base e do topo do poste são respectivamente 500 mm e 250 mm, enquanto o comprimento total é de 12 m, sendo 1,8 m o comprimento engastado abaixo do nível do solo CEMIG (2010). Para a seção transversal dos enrijecedores, como mostra a Figura 2 (a), usou-se dimensões de 27 mm x 27 mm, enquanto para os anéis, como mostra a Figura 2 (b), utilizou-se uma seção transversal de 50 mm (base) x 25 mm (altura). Usou-se 10 anéis ao longo do comprimento não engastado e concentrou-se uma maior quantidade de anéis próxima a base, onde a flambagem local é mais propícia de acontecer. A distância entre os anéis vizinhos foram aumentadas em progressão geométrica à medida que estes se aproximavam do topo do poste. A Tabela 3 apresenta os detalhes das configurações. As cargas horizontais e verticais usadas foram, respectivamente, de $R_h = 10000,00$ N e $R_v = 3825,90$ N, (CEMIG, 2010).

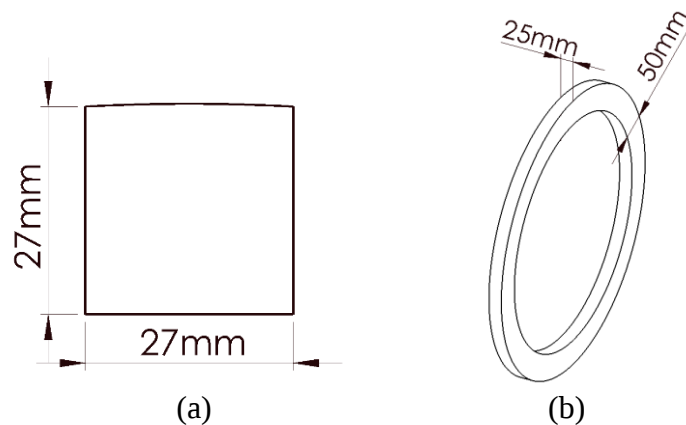


Figura 2: (a) seção transversal do reforçador, (b) geometria dos anéis.

Tabela 3: Condições avaliadas.

Condição	Quantidade de Reforçadores	Quantidade de anéis
A	Sem	Sem
B	8	Sem
C	8	10

2 MODELO NUMÉRICO

A rigidez do poste é um dos principais parâmetros do projeto. Segundo CEMIG (2010) e Copel (2015), as flechas máximas não devem ultrapassar cinco por cento do comprimento máximo do poste. Assim, para facilitar o modelamento em elementos finitos, utilizou-se primeiramente o método das diferenças finitas.

2.1 Método das diferenças finitas

O Método das Diferenças Finitas é uma maneira numérica de aproximar a solução de equações diferenciais usando-se a série de Taylor. Soares (2010), avaliou a convergência deste método aplicado à teoria de vigas de Bernoulli-Euler, obtendo resultados com grande

precisão. Segundo Cunha (2000), para aplicar o método, primeiramente deve-se discretizar a região onde procura-se a solução. Este é um procedimento comum quando métodos numéricos são utilizados na solução de equações diferenciais. Em seguida, as derivadas que aparecem na equação diferencial são discretizadas. As derivadas serão aproximadas por diferenças entre valores da solução discretizada. As Equações 1 e 2 apresentam a solução para os deslocamentos nodais usando o método das diferenças finitas, onde M_i , h , E_i , I_i são, respectivamente, o momento atuante, distância entre dois pontos vizinhos, módulo de elasticidade do material e inércia da seção.

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ \vdots \\ w_{n-3} \\ w_{n-2} \\ w_{n-1} \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ & & \vdots & & \ddots & \\ & & & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ \vdots \\ C_{n-3} \\ C_{n-2} \\ C_{n-1} \\ C_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

onde:

$$C_i = \frac{h^2 M_i}{E_i I_i} \quad (2)$$

2.2 Método dos elementos finitos

Os métodos dos elementos finitos apresentam uma maneira numérica de resolver vários problemas da engenharia, principalmente estruturais, por permitir a solução de problemas com geometrias complexas. Para analisar a estabilidade estrutural, ou flambagem, utilizou-se o software comercial Abaqus®, baseado no método dos elementos finitos. Assim, resolve-se o problema de autovalores, mostrado pela Equação 3, que estima a carga crítica de flambagem (bifurcação) da estrutura (Dassault Systèmes, 2010).

$$(K_0^{NM} + \lambda_i K_{\Delta}^{NM}) v_i^M = 0 \quad (3)$$

onde:

K_0^{NM} é a matriz de rigidez correspondente ao estado base, que incluem os efeitos do pré-carregamento;

K_{Δ}^{NM} é a matriz de tensão inicial;

λ_i são as cargas críticas ou os autovalores;

v_i^M são os modos de flambagem ou os autovetores e representam os deslocamentos normalizados;

M e N referem-se aos graus de liberdade;

i refere-se ao i -ésimo modo de flambagem.

Os anéis e reforçadores foram modelados utilizando-se os elementos de viga B31, que possui dois nós, mostrado na Figura 3 (a). Já o revestimento foi modelado com elementos de casca quadrilateral S4R, constituído de quatro nós, com o número de integrações reduzido, como mostrado na Figura 3 (b).

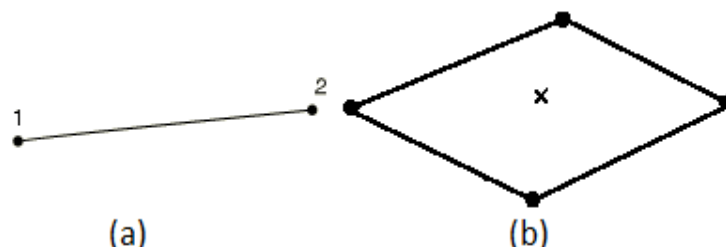


Figura 3: (a) elemento B31, (b) elemento S4R, (Dassault Systèmes, 2010).

3 RESULTADOS

Após a definição da geometria externa e das cargas, calcularam-se as flechas máximas utilizando o método das diferenças finitas, implementado no software comercial Matlab®, para que, a seguir, pudesse iniciar-se o modelamento em elementos finitos. Assim, variando-se a espessura do revestimento, adotou-se flechas máximas menores que o máximo permitido, de 5 % do comprimento máximo do poste. A Tabela 4 apresenta as máximas flechas encontradas para cada configuração, em percentagem do comprimento máximo do poste. A seguir, as configurações foram modeladas na plataforma comercial Abaqus®, onde foram obtidas as massas e as cargas críticas, referentes aos primeiros autovalores. O tamanho da malha foi variado a fim de testar a convergência dos resultados, e, assim, analisado o tamanho adequado para a malha. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados obtidos para as flechas, espessuras, massas e cargas críticas.

Condição	Flecha máxima – método das diferenças finitas (%)	Espessura do revestimento (mm)	Massa (kg)	Carga Crítica (kN)
A	4,80	19,80	673,45	195,12
B	4,67	5,10	358,41	44,58
C	4,67	5,10	373,53	50,56

O primeiro modo de flambagem da configuração do poste A é apresentado na Figura 4. Verifica-se que ocorre flambagem global, cuja carga crítica é de 195,12 kN, ou seja, neste caso, há um grande deslocamento (notar que o resultado da simulação está normalizado) da parte superior do poste. Para este modelo, a massa calculada foi de 673,45 kg, sendo a maior de todas dentre as três configurações.

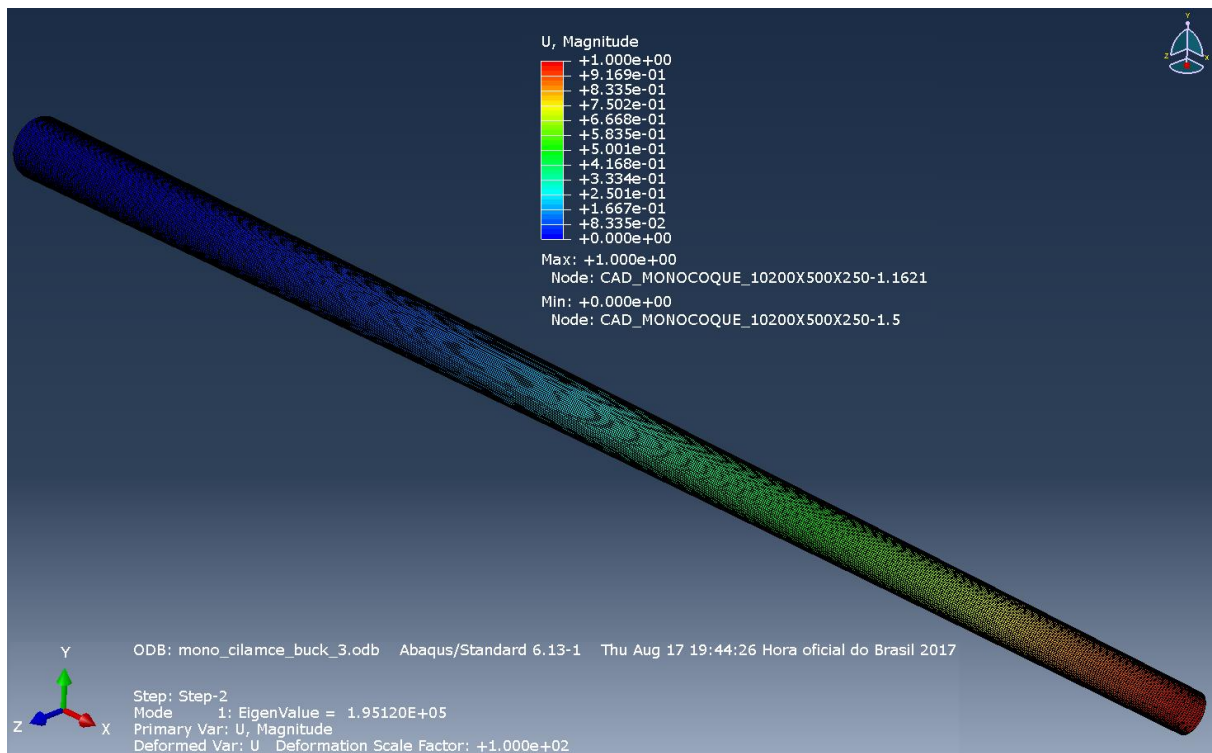


Figura 4: Resultado para o primeiro modo de flambagem para a configuração A

A Figura 5 apresenta o primeiro modo de flambagem para a configuração B, cuja carga crítica é de 44,58 kN. Percebe-se para este caso que houve flambagem local próximo a base. Neste caso, os máximos deslocamentos acontecem nos reforçadores, que por sua vez, é acompanhado do revestimento. A massa calculada desta configuração foi de 358,41 kg.

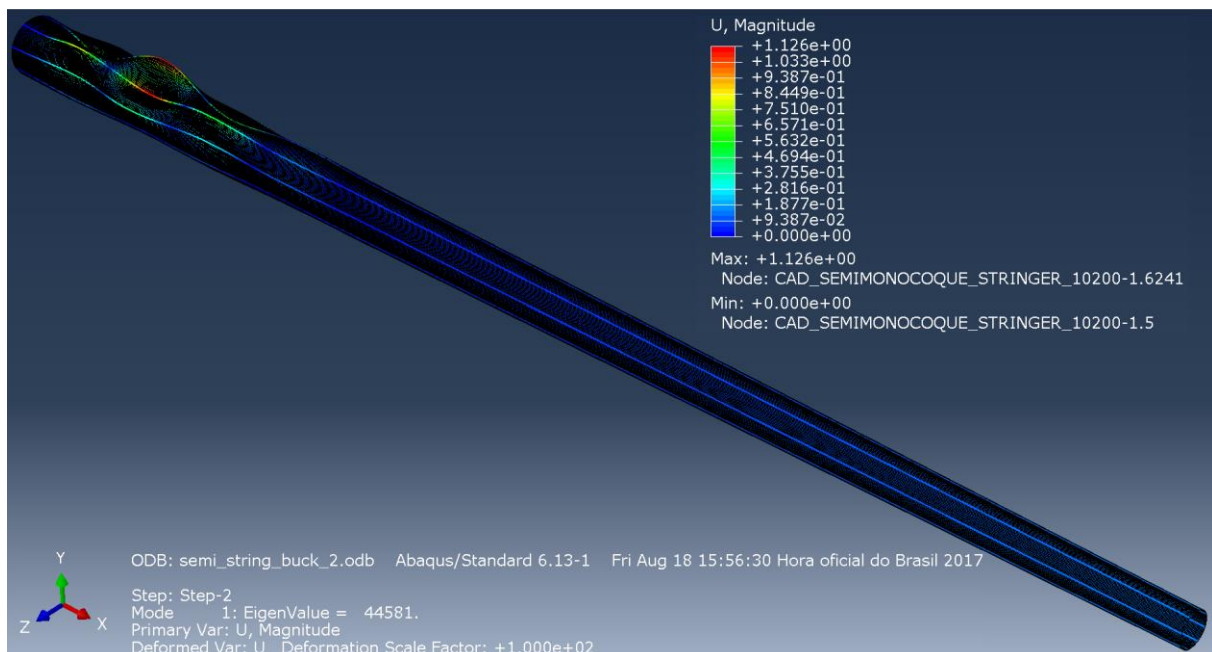


Figura 5: Resultado para o primeiro modo de flambagem para a configuração B

Analisando a configuração C, percebe-se que a adição de anéis restringiu os deslocamentos do revestimento e dos reforçadores nas regiões dos anéis, o que gerou uma maior carga crítica de flambagem, de 50,56 kN. A massa gerada foi de 373,53 kg, valor maior em relação à configuração B. A Figura 6 ilustra o comportamento para o primeiro modo de flambagem.

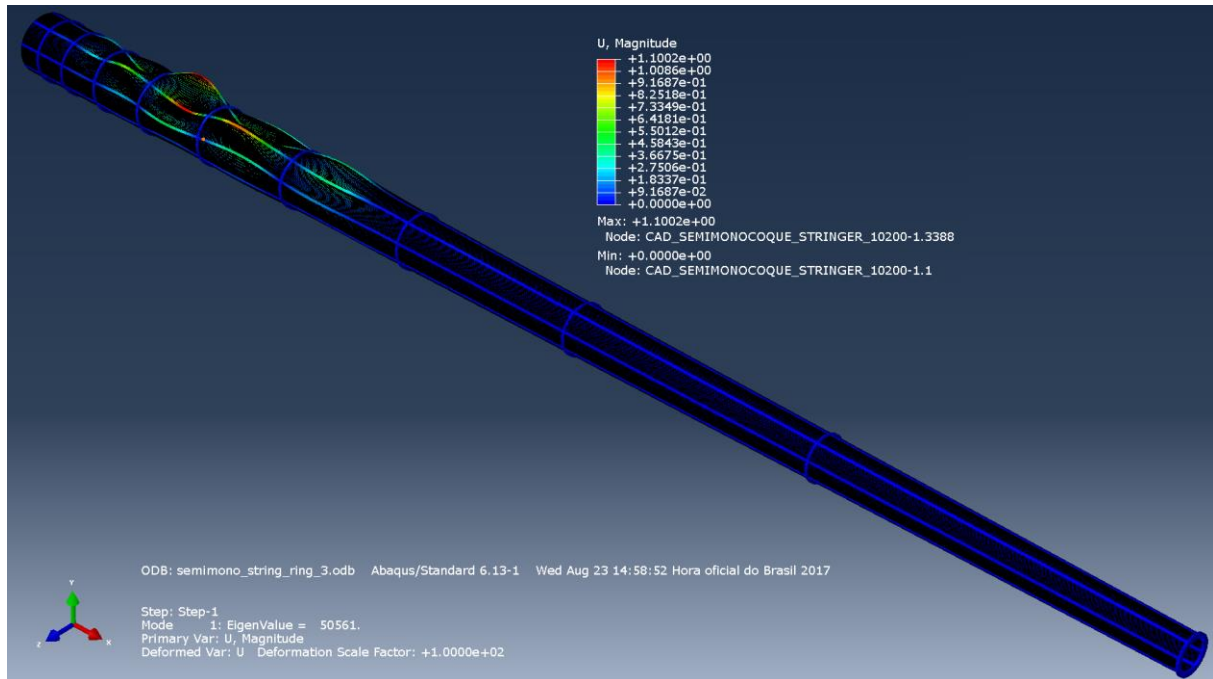


Figura 6: Resultado para o primeiro modo de flambagem para a configuração C

4 CONCLUSÕES

Foram analisados três tipos de configurações de postes, quanto a adição de enrijecedores e anéis internos. O método das diferenças foi usado para pré-selecionar e facilitar a análise dos postes estudados neste trabalho e também de futuros projetos. Assim, o processo de análise usando o método dos elementos finitos é facilitado, já que o limite de flechas é uma das principais limitações.

As flechas para as configurações A, B e C ficaram próximas, porém abaixo, por segurança, do máximo permitido. O poste da configuração A apresentou a maior carga crítica de flambagem, no entanto apresentou também a maior massa. Já a configuração B foi a que apresentou a menor massa. A configuração C, apesar de apresentar uma massa um pouco maior em relação a B, também obteve uma carga crítica de flambagem maior devido a adição de anéis.

O uso de postes mais leves possuem vantagens, tais como menor gasto com transporte, fácil deslocamento e posicionamento, principalmente em áreas de difícil acesso. O material composto PRFV tem boas características isolantes para que seja aplicado em redes de sistemas elétricos, além de ser resistente a ambientes corrosivos. Outra característica

importante é a capacidade de absorção de impactos e a manutenibilidade. Esses são alguns dos fatores que demonstram a importância do presente estudo.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o importante apoio da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) para a realização e apresentação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALÍPIO, L.G.S., 2014. Projeto e análise de postes de estrutura semi-monocoque fabricados com materiais compósitos. 64p. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Birchal, G.A., Las Casas, E.B., Cimini Jr., C.A. and Tsai, S.W., 2001. An Alternative Fiber-Reinforced Plastic Pole Design. *Proceedings of the 13th International Conference on Composite Materials, ICCM-13*, Beijing, CD-ROM.
- Birchal, G.A., 2001. *Postes autoportantes em materiais compostos poliméricos*. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 144p.
- Companhia Energética de Minas Gerais, 2010. “Especificação Técnica – Poste em Compósito (poste de poliéster reforçado com fibra de vidro – PRFV)”.
- Companhia Paranaense de Energia, 2015. Poste de Fibra de Vidro (PRV – Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro).
- Cunha, M.C., 2000. Métodos Numéricos, 2ª edição, Editora da Unicamp, Campinas, p.174
- Dassault Systèmes, 2010. Abaqus Analysis User’s Manual.
- Fam, A.; Kim Y.J.; Son, J.K., 2010. A numerical investigation into the response of free end tubular composite poles subjected to axial and lateral loads, *Thin-Walled Structures*, p.651-659
- Gay, D. Composite Materials, Design and Application 3.ed. Boca Raton: CCR Press, 2015. p. 17-27.
- Megson, T.H.G., 1999. Aircraft structures for engineering students. 3.ed. Oxford: Butterworth Heinemann, p.223.
- Metiche, L., 2012. Masmoudi, R.; Analysis and design procedures for the flexural behavior of glass fiber-reinforced polymer composite poles. *Journal of Composite Materials*. 21, fevereiro, pp. 207-208.
- Petrofisa, 2008. Postes em Compósitos, Catálogo do Produto. 26p.
- Pfeil, W., Pfeil, M., 2013. *Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte americana NDS e europeia EUROCODE 5*, 6ª ed. Editora LTC, Rio de Janeiro. p.192.
- Soares, A.A.B., 2010. O método das diferenças aplicado à teoria de vigas. Trabalho de conclusão e curso, Universidade da Amazônia. Belém, Pará. 126p.