

IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS NA MODELAGEM DINÂMICA DE CABOS

IDENTIFICATION OF PARAMETERS IN DYNAMIC CABLE MODELING

Guilherme Moraes de Menezes¹
Sebastião C. P. Gomes²
Vitor Gervini³

Resumo: O presente artigo aborda a identificação paramétrica em modelos dinâmicos de estruturas flexíveis do tipo cabo. A modelagem dinâmica é feita a partir de um formalismo discreto, no qual se considera a flexibilidade contínua do cabo como aproximada por uma equivalente discreta, considerando-se elos rígidos conectados por articulações fictícias elásticas. Considera-se o cabo se movimentando no plano vertical. Foram desenvolvidos algoritmos para gerar o modelo dinâmico do cabo de forma automática, para um número qualquer de elos rígidos considerados na aproximação discreta. Como ainda não se dispõe de resultados experimentais, considerou-se um modelo dinâmico com sessenta elos como alvo, representando o resultado experimental. Um outro modelo com doze elos deveria ter os parâmetros identificados de forma a que os resultados de simulação tenham erros mínimos com relação aos resultados com o modelo de sessenta elos. Utilizou-se o método Nelder–Mead Simplex para a minimização dos erros e a consequente identificação dos parâmetros das matrizes de rigidez e de atrito uma vez que os demais parâmetros referentes às massas e ao comprimento dos elos são facilmente mensuráveis. Os resultados foram considerados bons, de forma que a estrutura proposta de identificação de parâmetros foi validada e está pronta para ser utilizada experimentalmente.

Palavras-chave: Modelagem dinâmica. Cabos. Identificação paramétrica. Simulações.

Abstract: The present article deals with the parametric identification in dynamic models of flexible structures of the cable type. The dynamic modeling is developed from a discrete formalism, in which the continuous flexibility of the cable is considered as approximated by a discrete equivalent, considering the rigid links connected by fictitious elastic joints. The cable is considered moving in the vertical plane. Algorithms were developed to generate the dynamic cable model automatically for any number of rigid links considered in the discrete approximation. Since no experimental results are yet available, a dynamic model with sixty links was considered as the target, representing the experimental result. Another model with twelve links should have the parameters identified so that the simulation results have minimal errors with respect to the results with the sixty-link model. The Nelder-Mead Simplex method was used for the minimization of errors and the consequent identification of the parameters of the stiffness and friction matrices since the other parameters concerning the masses and the length of the links are easily measurable. The results were considered good, so that the proposed parameter identification structure was validated and ready to be used experimentally.

Keywords: Dynamic modeling. Cables. Parametric identification. Simulations.

¹ Aluno do PPGMC-FURG, IMEF-FURG, av. Itália, km8, Rio Grande, RS, guih.mat@gmail.com.

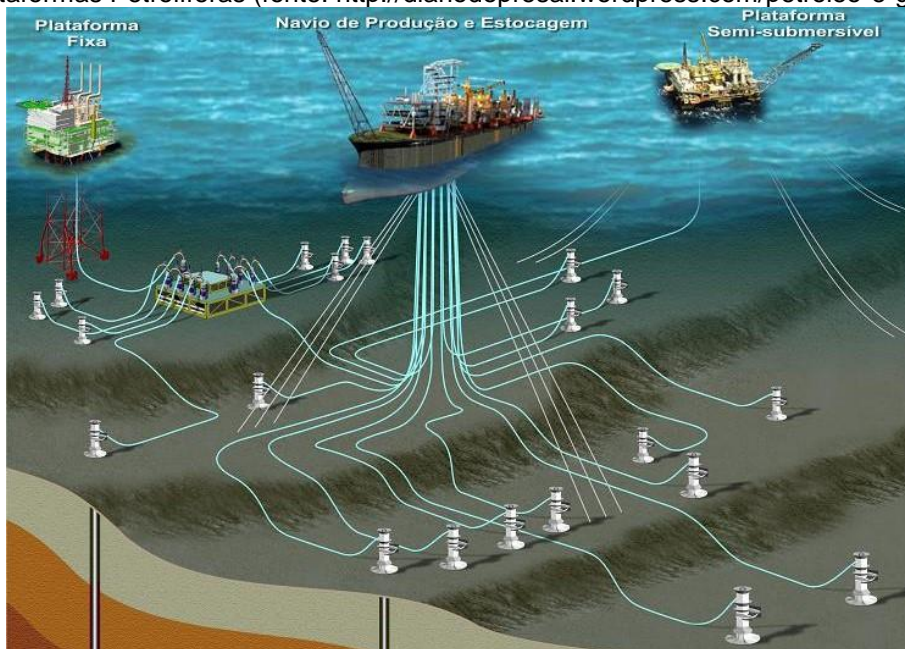
² Dr., IMEF-FURG, sebastiaogomes@furg.br

³ Dr. Centro de Ciências da Computação, FURG, gervini@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Estruturas flexíveis do tipo cabo são amplamente utilizadas em aplicações tecnológicas, principalmente correlatas à indústria de extração de petróleo e gás, em ambiente subaquático (Fig. 1). É, portanto, de interesse crescente o desenvolvimento de modelos dinâmicos que possam representar tais estruturas flexíveis, permitindo o estudo dos seus comportamentos dinâmicos a partir de simulações.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.1. Plataformas Petrolíferas (fonte: <http://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>).



Elementos finitos são amplamente usados na modelagem de cabos, principalmente para análises de equilíbrio estático. Escalante *et al.* (2011) utiliza o Método dos Elementos Finitos aplicado a cabos para a obtenção de um modelo de ordem reduzida, a partir de decomposições ortogonais. Fange *et al.* (2012) representa a flexão e efeitos de torção para cabos de reboque, também usando o Método dos Elementos Finitos. Bamdad (2013) propôs uma solução analítica para a dinâmica de manipuladores suspensos por cabos. Bi *et al.* (2013) aplica o Método dos Elementos Finitos para estudar as tensões presentes em cabos umbilicais submarinos. Alguns autores utilizam outros

métodos para o estudo da dinâmica de cabos. Pereira (2010) investiga a interação fluido-estrutura de um cabo submerso, a partir do acoplamento da dinâmica do cabo com o movimento do fluido, utilizando uma aproximação discreta e o formalismo Lagrangeano para a dinâmica do cabo. Masciola *et al.* (2012) estudam um método de solução para a configuração estática de um cabo, a partir de uma aproximação discreta. Liu *et al.* (2013) estudam características dinâmicas de cabos em linhas de transmissão, com base na formulação Lagrangeana. Wolfschluckner e Jodin (2013) comparam o Método dos Elementos Finitos com métodos numéricos e analíticos, para descrever o comportamento dinâmico de um cabo.

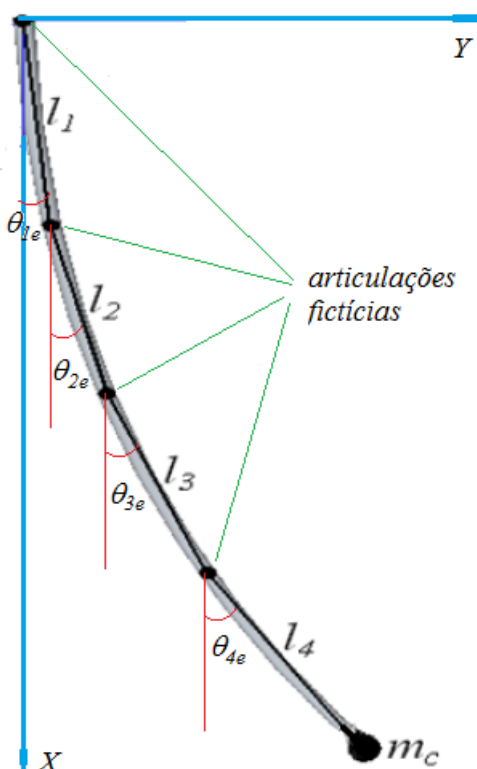
A técnica de modelagem utilizada no presente trabalho baseia-se em um formalismo discreto, proposto em Gomes *et al.* (2016), para o caso mais geral, considerando o movimento do cabo no espaço tridimensional. Aqui esta técnica é adaptada para o estudo do cabo em movimento contido no plano vertical. O formalismo de Euler-Lagrange é utilizado e algoritmos genéricos são desenvolvidos para gerar de forma automática o modelo dinâmico do cabo, para um número qualquer de elos utilizados na representação discreta da flexibilidade contínua. Em seguida, um modelo com 60 elos é considerado como sendo o alvo, representando o resultado experimental que não se dispõe ainda. Um modelo com 12 elos é desenvolvido e simulações realizadas a fim de que sejam comparados erros relativos à simulação com 60 elos. A minimização destes erros é feita utilizando-se método de Nelder–Mead Simplex (ver Lagarias *et al.* (2008) para maiores detalhes sobre este método de otimização), possibilitando assim a estimação dos parâmetros do modelo de doze elos, consistindo no principal objetivo do presente trabalho. Todos os resultados aqui apresentados foram desenvolvidos em ambiente de programação MATLAB, sendo que o método Nelder–Mead Simplex está programado neste ambiente, na função “fminsearch.m”.

2 A MODELAGEM NO PLANO VERTICAL

Assume-se que o cabo tem movimento contido no plano vertical e que sua extremidade superior está articulada a uma superfície fixa, na origem do

sistema inercial XY , conforme indicado na Fig. 2. A outra extremidade é livre e nela há uma carga terminal de massa m_c . Os elos $l_i, i = 1, \dots, n$, possuem massas m_i concentradas nos seus respectivos centros de massa e formam ângulos de elevação θ_{ie} com a direção vertical.

Figura 2. Quatro elos rígidos representando a flexibilidade contínua do cabo.



Utilizando o formalismo de Euler-Lagrange, foram desenvolvidos modelos dinâmicos considerando-se 2, 3 e 4 elos e, posteriormente, foram identificados padrões de crescimento dos vetores e matrizes dos modelos. A equação geral da dinâmica com n elos pode ser posta na forma:

$$I_e \ddot{\vec{\theta}}_e + C_e \dot{\vec{\theta}}_e + K_e \vec{\theta}_e + \vec{F}(\vec{\theta}_e, \dot{\vec{\theta}}_e) + \vec{G}(\vec{\theta}_e) = \vec{\tau} \quad (1)$$

$\vec{\theta}_e = [\theta_{1e} \theta_{2e} \dots \theta_{ne}]^T$ é o vetor com os ângulos de elevação dos elos, I_e é a matriz de inércia de ordem n , C_e a matriz de coeficientes de atrito, K_e a matriz de constantes elásticas, $\vec{F}(\vec{\theta}_e, \dot{\vec{\theta}}_e)$ o vetor de torque Coriolis-centrífugos, $\vec{G}(\vec{\theta}_e)$ o vetor de torques gravitacionais e $\vec{\tau}$ o vetor de torques externos.

end,

$$f_i = l_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ \beta l_j \left(\frac{m_{\max(i,j)}}{2} + m_c + \sum_{g=\max(i,j)+1}^n m_g \right) \left[-\frac{1}{2} \text{sign}(\beta) \cos(\theta_{ie}) \sin(\theta_{je}) + \frac{1}{\beta} \sin(\theta_{ie}) \cos(\theta_{je}) \right] \dot{\theta}_{je}^2 \right\} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 2 & \text{para } i > j \\ -2 & \text{para } i \leq j \end{cases} \quad (5)$$

$$g_i = l_i \left(\frac{m_i}{2} \sum_{k=i+1}^n m_k \right) g \sin \theta_{ie} \quad (6)$$

3 IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA

Os parâmetros relativos a massas e comprimentos dos elos são facilmente mensuráveis e, portanto, são assumidos como conhecidos. O foco passa a ser a identificação dos parâmetros relativos às matrizes de constantes elásticas e de atritos. Conforme dito anteriormente, as matrizes de constantes elásticas e de atrito têm a mesma forma. A equação seguinte mostra a matriz de constantes elásticas considerando-se quatro elos (para a de atrito, troca-se k por c):

$$K_e = \begin{bmatrix} k_{e1} + k_{e2} & -k_{e2} & 0 & 0 \\ -k_{e2} & k_{e2} + k_{e3} & -k_{e3} & 0 \\ 0 & -k_{e3} & k_{e3} + k_{e4} & -k_{e4} \\ 0 & 0 & -k_{e4} & k_{e4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para a geração da simulação com o modelo considerando-se 60 elos, os parâmetros adotados foram os expostos na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros adotados para a o modelo.

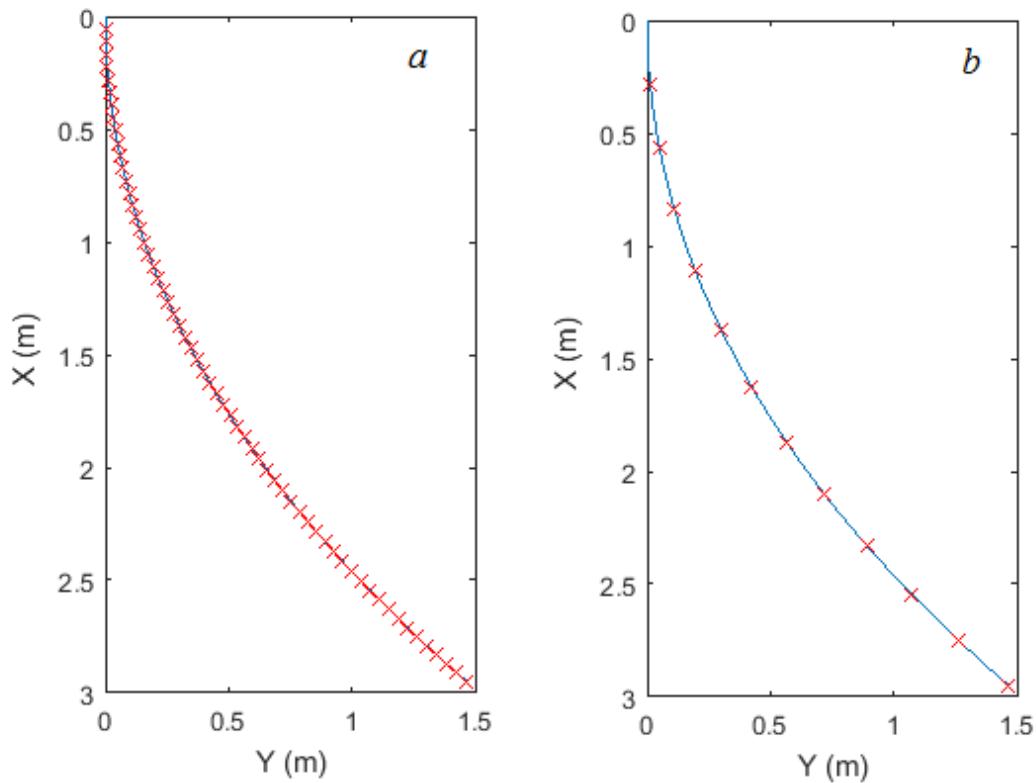
Parâmetro	Valor
Massa específica do cabo (kg/m)	$\rho = 0.1424$
Comprimento do cabo (m)	$L = 3.39$
Número de elos (aproximação contínua)	$n = 60$
Número de elos (modelo para a identificação)	$n = 12$
Comprimento l_i de cada elo (m)	$l_i = L/n$
Massa da carga terminal (kg)	$m_c = 1.47$
Massa de cada elo (kg)	$m_i = \rho l_i$
Momento de inércia rotacional de cada elo (kgm^2)	$I_{ri} = (m_i/12)l_i^2$
Coef. de atrito de cada articulação para 60 elos (Nms/rd)	$c_{ei} = 0.0336$
Const. elástica de cada articulação para 60 elos (Nm/rd)	$k_{ei} = 237.2412$
Coefficiente de arrasto atmosférico ($Nm\ rd^2/s^2$)	$c_v = 0.2$

Para a realização das simulações, o cabo foi posto numa configuração espacial inicial em equilíbrio estático, obedecendo à uma curva catenária, conforme visto nas figuras 3a (para 60 elos) e 3b para doze elos. As posições das articulações fictícias estão marcadas com um “x” em vermelho. As posições cartesianas das articulações fictícias, nos dois casos, são facilmente obtidas em razão de serem conhecidos, das simulações, os ângulos $\theta_{ie}, i = 1, \dots, n$. Os erros são calculados da seguinte forma:

$$Er = \sum_{i=1}^{12} \sqrt{(\tilde{x}_{5i} - x_i)^2 + (\tilde{y}_{5i} - y_i)^2} \quad (8)$$

sendo $(\tilde{x}_{5i}, \tilde{y}_{5i})$ as coordenadas cartesianas das articulações para 60 elos, enquanto que (x_i, y_i) as coordenadas cartesianas para 12 elos, com $i = 1, \dots, 12$.

Figura 3. Catenária inicial: a) para 60 elos; b) para 12 elos.



Os erros calculados com a equação (8) são utilizados no processo de minimização a partir do método de Nelder–Mead Simplex. Como os parâmetros relativos às constantes elásticas e aos coeficientes de atrito são iguais para todas as articulações, a princípio, apenas dois coeficientes deveriam ser identificados: $c_e = c_{ei}$ e $k_e = k_{ei}, i = 1, \dots, 12$. Porém, é lógico supor que a primeira articulação (extremidade fixa do cabo) pode ter parâmetros diferentes dos das demais articulações. Portanto foram identificados os parâmetros $c_{e1}, k_{e1}, c_e = c_{ei}$ e $k_e = k_{ei}, i = 2, \dots, 12$. Estes parâmetros são desconhecidos, mas há a necessidade de se adotar valores iniciais para o processo de minimização, adotados conforme especificado na Tab. 2. A simulação com 60 elos demanda um tempo de processamento de quatro horas, mas só precisa ser feita uma vez. Já a simulação com 12 elos é repetida a cada novo passo no processo de minimização do erro. O tempo total de simulação adotado foi 3s, tempo este que se mostrou suficiente para a minimização dos erros. Após o processo de minimização, os parâmetros identificados convergiram para os valores

mostrados na Tabela 2. O erro calculado pela equação (8), após o processo de minimização, foi equivalente a 0.0012, indicativo de que a minimização atingiu o seu objetivo.

Tabela 2. Valores iniciais e estimados dos parâmetros do modelo 12 elos.

Parâmetro	Valor inicial	Valor estimado
c_{e1}	$2.688e - 4$	$1.0080e - 5$
$c_{ei}, i = 2, \dots, 12$	$1.344e - 4$	$4.0320e - 6$
k_{e1}	47.448	87.7312
$k_{ei}, i = 2, \dots, 12$	47.448	48.122

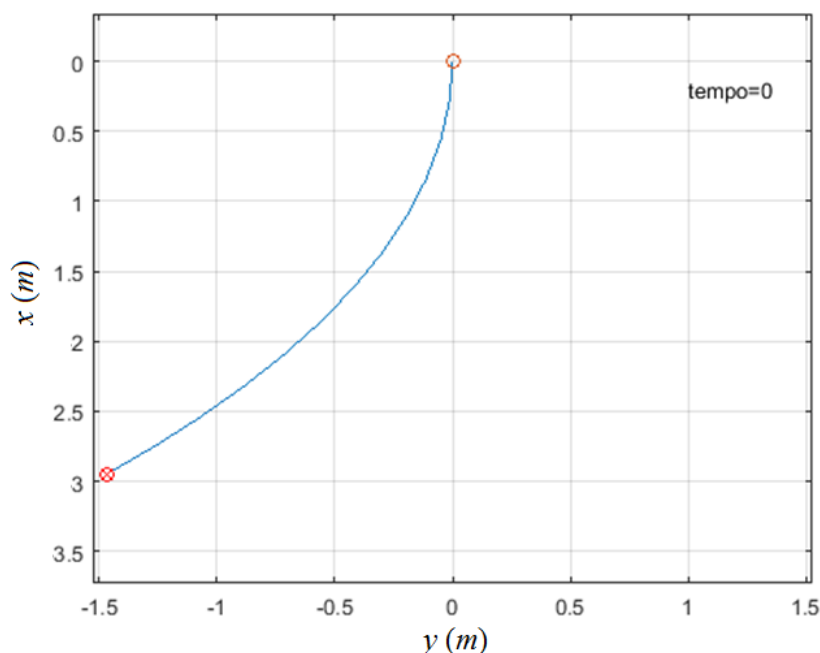
Tabela 3. Valores dos parâmetros do modelo 60 elos.

Parâmetro	Valor
c_{e1}	0.0672
$c_{ei}, i = 2, \dots, 60$	0.0336
k_{e1}	237.2412
$k_{ei}, i = 2, \dots, 12$	237.2412

4 SIMULAÇÕES

As simulações apresentadas a seguir foram feitas com os modelos 60 elos e 12 elos, este último com os parâmetros estimados no processo de minimização do erro visto na seção anterior. O cabo parte do repouso, do equilíbrio estático inicial, com configuração espacial gerada a partir de uma curva catenária, idêntica à mostrada na Fig. 4. A extremidade superior do cabo está articulada a uma estrutura fixa, enquanto que a inferior está livre. A partir desta configuração inicial no tempo zero, a dinâmica evolui sob o efeito dos torques gravitacionais.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.4.
Configuração espacial inicial do cabo, obtida a partir de uma curva catenária (escalas em m).



A Fig. 5 mostra a posição cartesiana do ponto médio do cabo, ou seja, posição das articulações 6 (modelo 12 elos) e 30 (modelo 60 elos). A Fig. 6 mostra a posição cartesiana da carga terminal, também obtida com os modelos 12 e 60 elos. Em ambos os casos, observa-se uma boa concordância entre os resultados com os dois modelos, indicando que os parâmetros identificados no modelo 12 elos foram de fato ótimos do ponto de vista do processo de minimização utilizado.

Foi desenvolvido um software no MATLAB que permite visualizar uma animação a partir de frames com configurações espaciais do cabo. A Fig. 7 mostra uma sequência de doze frames, coletados a cada 0.25 s, do tempo 0 até 2.75 s, significando aproximadamente um período completo do movimento espacial do cabo. Na Fig. 8 são mostradas configurações espaciais sobrepostas na mesma janela gráfica, do tempo 0 ao tempo 1.75 s, a cada 0.02 s.

Figura 5. Posições das articulações 6 (modelo 12 elos) e 30 (modelo 60 elos).

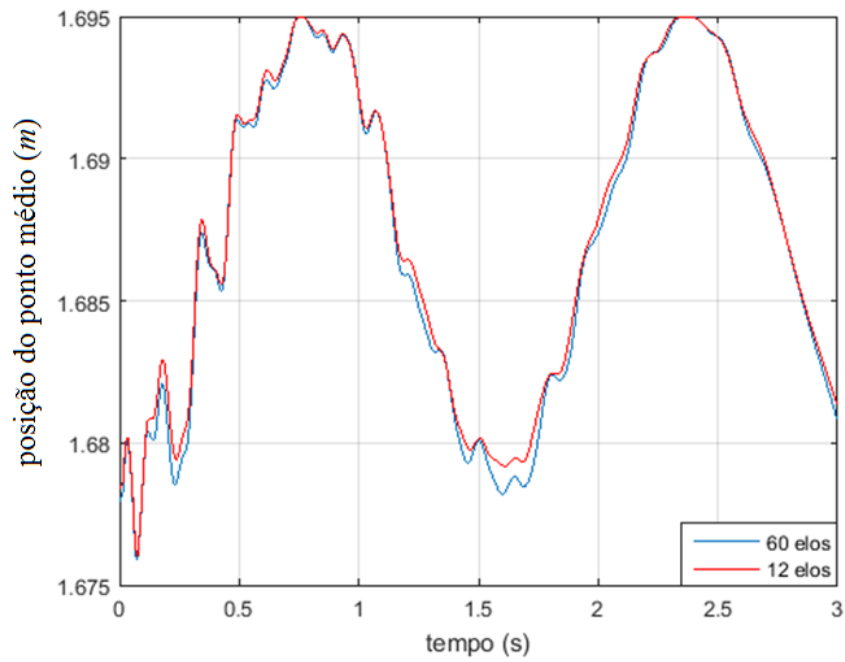


Figura 6. Posição da carga terminal, considerando-se os modelos de 12 e 60 elos.

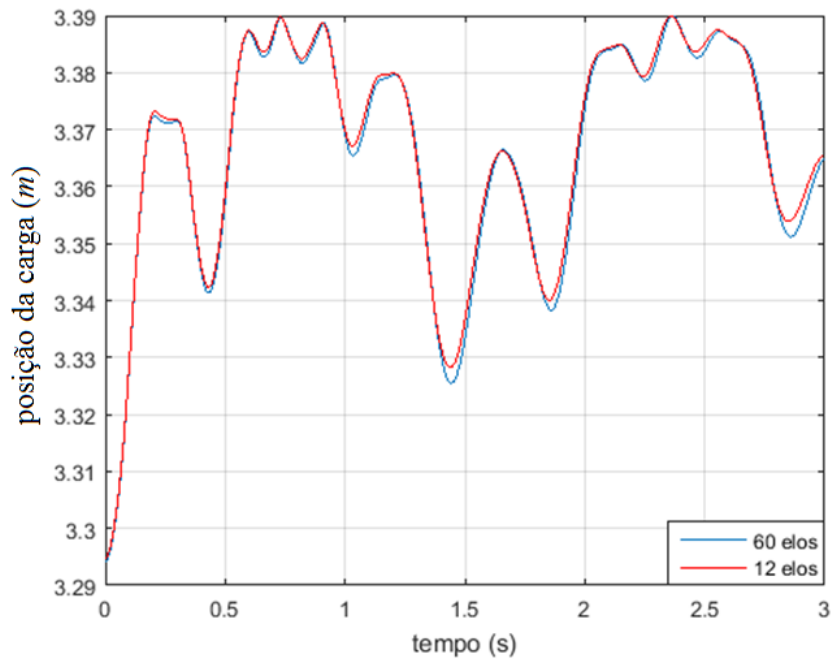


Figura 7. Animação com frames a cada 0.25 s, com o modelo 12 elos.

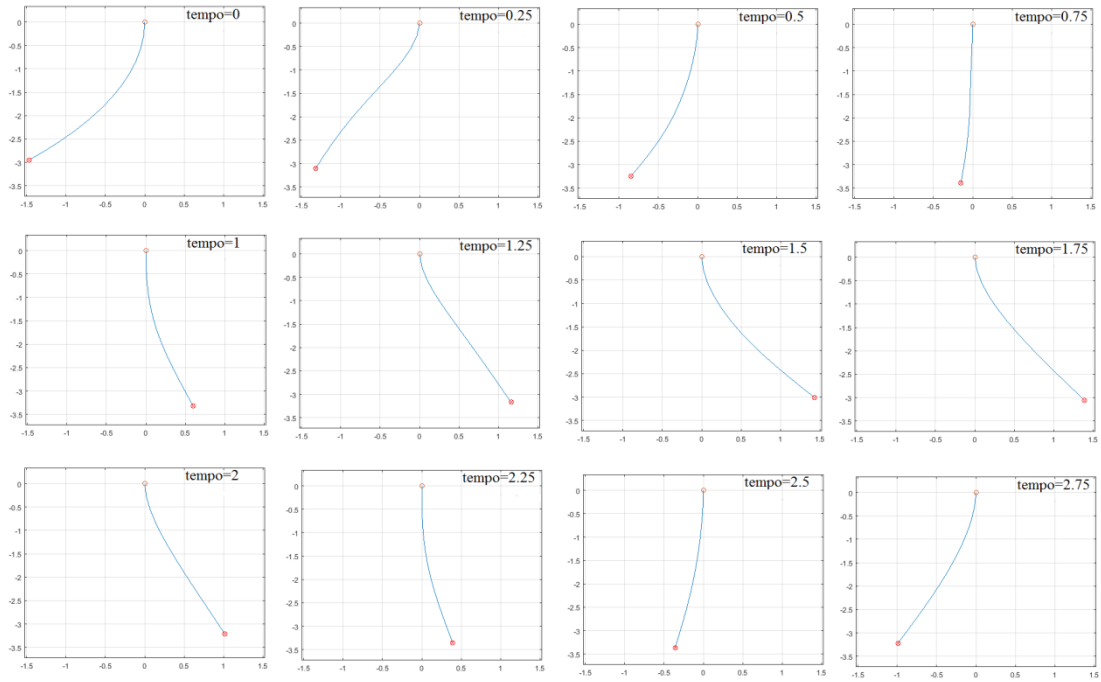
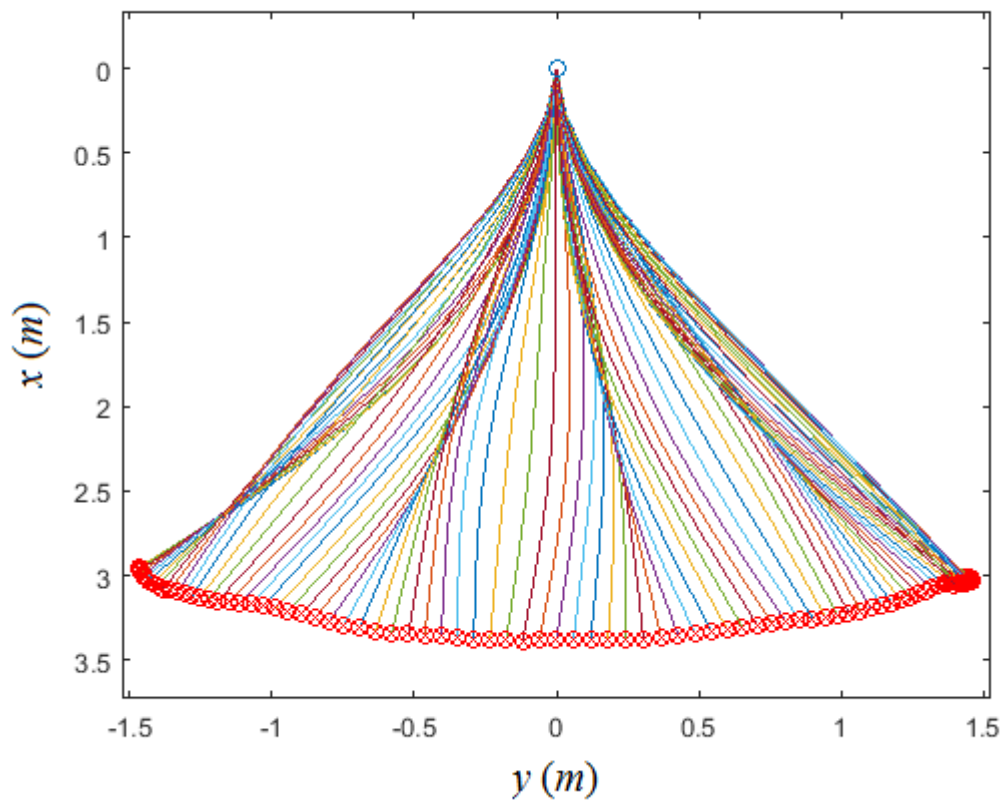


Figura 8. Configurações espaciais do cabo, de 0 a 1.75s (meio período), a cada 0.02s.



Os resultados mostrados nas figuras 7 e 8 foram obtidos com o modelo 12 elos. Resultados semelhantes com o modelo 60 elos foram omitidos por serem praticamente idênticos aos do modelo 12 elos. Estes resultados, obtidos a partir do software de animação, permitiram observar uma forte sensação de realidade física, indicando que a modelagem dinâmica e o processo de identificação paramétrica podem conferir bons resultados na representação do fenômeno físico.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma técnica de modelagem dinâmica de cabos já desenvolvida anteriormente, mas adaptada para o caso de movimento no plano vertical. A técnica inclui algoritmos genéricos para a geração do modelo considerando-se um número qualquer de elos escolhidos para representar, de forma discreta, a flexibilidade contínua. Este fator é essencial, pois o desenvolvimento manual do modelo para um número grande de elos é inviável, tal a complexidade e dimensão das equações. O presente trabalho também propôs e testou com sucesso um método de estimação de parâmetros baseado na minimização de erros em posição, relativos a resultados no caso contínuo (aqui representado por um modelo com 60 elos). Foi realizada a estimação de parâmetros aplicada a um modelo com 12 elos e este modelo conseguiu reproduzir resultados praticamente idênticos aos obtidos com o modelo 60 elos, indicando que o processo de minimização atingiu o seu objetivo. Trabalhos futuros incluirão resultados experimentais em substituição ao modelo 60 elos, obtidos a partir de câmeras de vídeo usadas na identificação de posições marcadas em um cabo, de forma a permitir que o mesmo processo de minimização de erro possa identificar os parâmetros do modelo dinâmico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES por financiar parte da pesquisa que gerou os resultados abordados no artigo.

Referências

- Bamdad, M. (2013). Analytical dynamic solution of a flexible cable-suspended manipulator. *Front Mech Eng*, 8(4), 350–359.
- Bi, G., Zhu, S., Liu, J., Fang, X., Wang, L. (2013). Dynamic simulation and tension compensation research on subsea umbilical cable laying system. *J Marine Sci Appl*, 12, 452–458.
- Chang, S., Park, J., Lee, K. (2008). Nonlinear dynamic analysis of spatially suspended elastic catenary cable with finite element method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(2), 121–128.
- Escalante, M. R., Sampaio, R., Rosales, M. B., Ritto, T. (2011). A reduced order model of a 3d cable using proper orthogonal decomposition. *Mecánica Computacional*, XXX, 1143–1158.
- Fang, Z., He, Q., Xiang, B., Xiao, H., He, K., Du, Y. (2012). A finite element cable model and its applications based on the cubic spline curve. *China Ocean Eng*, 27(5), 683–692.
- Gomes, S. C. P., Zanela, E. B. and Pereira, A. E. L. (2016). Automatic generation of dynamic models of cables. *Ocean Engineering*, pgs. 559–571.
- Lagarias, J.C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9 Number 1, pp. 112-147, 1998.
- Liu, Y., Qian, Z., Xia, K. (2013). Mechanical response of transmission lines based on sliding cable element. *J Cent South Univ*, 21, 3370–3377.
- Masciola, M. D., Nahon, M., Driscoll, F. R. (2012). Static analysis of the lumped mass cable model using a shooting algorithm. *J Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng*, 138(2), 164–171.
- Pereira, A. E. L. (2010). O método da decomposição de adomian aplicado à interação fluido-estrutura de um cabo. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Edição especial - 8º MCSul - Conferência Sul em Modelagem Computacional e VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

Enviado em: 01 fev. 2019

Aceito em: 04 fev. 2019

Editores responsáveis: João Paulo Silva Lima / Liércio André Isoldi / Mateus das Neves Gomes