

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Proposta de consideração das parcelas inerciais e de arrasto em catenárias suspensas

AUTORES:

Milton Mateus Guimarães dos Santos, César Anderson de Melo Rodrigues, Fábio Martins Gonçalves Ferreira, Eduardo Nobre Lages

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas

PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DAS PARCELAS INERCIAIS E DE ARRASTO EM CATENÁRIAS SUSPENSAS

Abstract

Due to the growth of the deepwater oil exploration area, it was necessary to refine the tools used in the numerical simulations of the behavior of submerged and floating structures. For the analysis of the performance of these floating units, numerical simulation systems, such as DYNASIM, provide three ways of modeling the lines linked to floating units, being these methods: characteristic curve, catenary and finite elements. The characteristic curve and catenary methods, because they do not consider the inertial and drag force portions to which a deepwater system is subjected, allow a quick and not so accurate analysis of the dynamics of the line integrated with the floating unit. Namely, the catenary method evaluates a catenary equation that respects the spatial condition of the floating unit in a temporal situation. In the finite element method there is a spatial and time discretization of the line to assimilate the effects of inertial and drag forces to the equations of motion of the analyzed element. This method gives greater fidelity to the physical problem, however it demands high computational cost. Due to this problem, we seek a method which the computational cost is lower and maintains greater accuracy to simulate the physical behavior that the line integrated to the floating unit will have. The present work proposes, after reviewing the catenary and finite element methods, to combine the positive aspects of each modeling mode to develop a new method that is more competitive with respect to computational cost. With this, by introducing the inertial and drag force portions obtained by the Morison formulation, it will be possible to provide data about the line integrated to the floating unit more true to the physical problem, such as its geometry and fairlead traction.

Introdução

Este trabalho trata-se de uma análise do comportamento mecânico estrutural das linhas de ancoragem de unidades flutuantes empregadas em sistemas de exploração de petróleo *offshore*, as quais estão vinculadas a um elemento de fundação no piso marinho e ao *fairlead* instalado na unidade flutuante. As linhas de ancoragem de estruturas *offshore* possuem configurações complexas devido ao comportamento dinâmico e sua geometria não linear, apresentando, de modo geral, a forma de uma catenária (Figura 1).

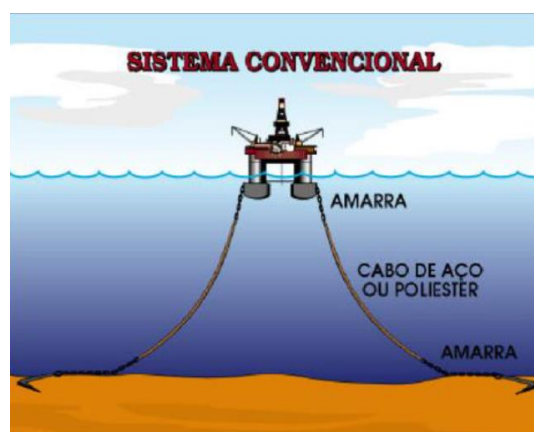


Figura 1: Sistema em catenária de linhas de ancoragem (Fonte: LOUREIRO, 2007).

Os sistemas computacionais de cálculo de estruturas *offshore*, em sua maior parte, utilizam métodos numéricos para uma análise dinâmica destas estruturas. O DOOLINES (SILVEIRA et al., 2012) permite a modelagem de linhas integradas às unidades flutuantes via método dos elementos finitos, enquanto o DYNASIM (FUCATU, 1998; NISHIMOTO; FUCATU; MASETTI, 2002), sistema computacional da

PETROBRAS, disponibiliza três métodos de modelagem, a saber: curva característica, catenária e elementos finitos. O método dos elementos finitos realiza uma discretização espacial e temporal da linha, considerando os efeitos das ações ambientais, para a integração das equações associadas ao problema, gerando resultados mais fiéis ao problema físico em troca de um custo computacional significativo. Assim, Silveira (2016) propôs uma metodologia para utilização de cabos de aproximação, que possibilita uma análise com menor número de nós, resultando em menor custo computacional. Para a análise dos esforços a qual linha estará submetida, esta é obtida pela adição da tensão da linha devido à sua estaticidade e por forças provenientes de ações ambientais, como ondas, correntezas, etc. Morison (1950) desenvolveu uma formulação para a obtenção da força horizontal atuante em um cilindro vertical fixo desde o piso marinho até a superfície livre. Esta força horizontal é dada pela composição de forças inerciais e de arrasto provenientes das ações das ondas e correntezas ocorrentes em sistemas estruturais *offshore*.

Neste trabalho, retoma-se o processo de modelagem de linhas de ancoragem em configuração de catenária, considerando os aspectos positivos implementados nos métodos de elementos finitos e catenária presentes no DYNASIM, visando a redução do custo computacional, considerando as parcelas de forças de arrasto e inerciais na linha, para obtenção de uma modelagem mais completa que a formulação atualmente disponível no DOOLINES.

Metodologia

A catenária é uma configuração geométrica obtida pela distribuição uniforme de carga ao longo do comprimento de uma linha que está apoiada em duas extremidades (NAZÁRIO, 2015). Para linhas de ancoragem, essas são consideradas como cabos, cuja rigidez à flexão é desprezível (LOUREIRO, 2007).

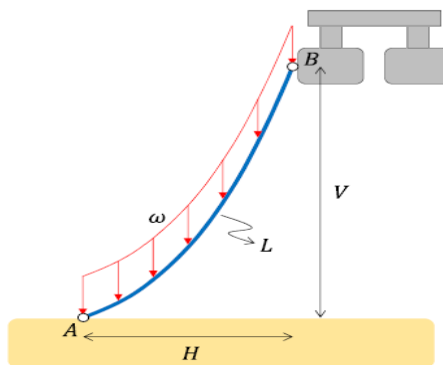


Figura 2: Esquemática de uma catenária suspensa (Fonte: MARTINS e LAGES, 2017).

A configuração estática da catenária dependerá de parâmetros como peso linear da linha, comprimento L , projeção horizontal H e vertical V . Após a fixação destes parâmetros iniciais, tomam-se as equações de equilíbrio da linha para obtenção de parâmetros como ângulo inicial da linha e o componente horizontal da tração via métodos numéricos. Assim, obtêm-se os dados necessários para uma prescrição e discretização espacial da catenária, além de outras propriedades desta ao longo de sua extensão. Porém, as estruturas flutuantes apresentam grandes deslocamentos devido à ação das cargas ambientais de forma oscilatória (LACERDA, 2005), e, portanto, o mesmo ocorre à linha de ancoragem. Assim, faz-se necessário considerar as taxas de variação temporal de primeira e segunda ordem (velocidade e aceleração, respectivamente) para a prescrição dos movimentos da catenária e determinação das acelerações de cada nó da discretização da linha, de modo a computar a parcela inercial e de arrasto da formulação de Morison.

A formulação de Morison, que consiste em descrever a força horizontal atuante em um cilindro vertical fixo ao piso marinho estendendo-se até a superfície livre (Figura 3), é resultante de dois componentes: inercial e arrasto. Segundo Albuquerque (2008), a parcela inercial deve-se à transferência de quantidade de movimento de uma partícula fluida à estrutura cilíndrica, enquanto a parcela de arrasto deve-se à diferença de pressão ocasionado pelo escoamento do fluido viscoso.

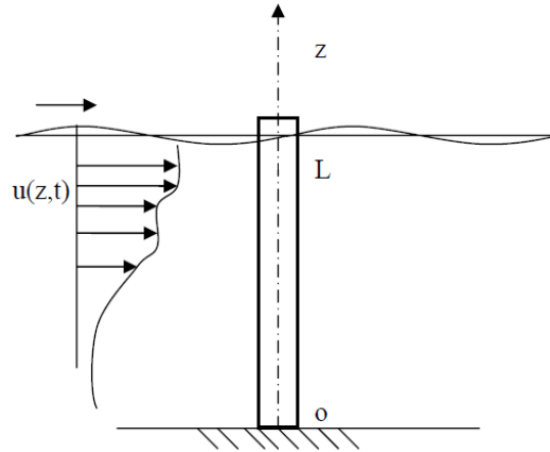


Figura 3: Modelo de teste realizado por Morison (Fonte: adaptado TECHET, 2004).

Com as parcelas de força inercial e de arrasto obtidas pela formulação de Morison e da força inercial da própria linha, contabilizam-se os efeitos das ações ambientais em cada elemento de discretização da linha. A estratégia iterativa proposta neste trabalho consiste na construção de um código que possa, inicialmente, prescrever e discretizar as linhas de ancoragem em configuração catenária. Posteriormente, prescrever o movimento harmônico da linha e de cada um de seus elementos de discretização. Com as taxas de variação temporal que estes elementos possuem, obtêm-se suas contribuições de forças em termos de inércia da própria linha, e de inércia e arrasto da formulação de Morison, em cada passo de integração. Ao contabilizar as ações ambientais e seus efeitos, a linha de ancoragem gera uma nova configuração para manter-se estática e, através desta, tomam-se as equações de equilíbrio da catenária para o cálculo da força que a linha impõe no *fairlead* em cada instante. Por fim, disponibiliza-se o histórico da tração no *fairlead* a partir da consideração das parcelas de forças consideradas ao problema.

Resultados e Discussão

A estratégia desenvolvida é testada na simulação de uma linha de ancoragem em configuração catenária com movimentos prescritos na Tabela 1 e parâmetros da Tabela 2.

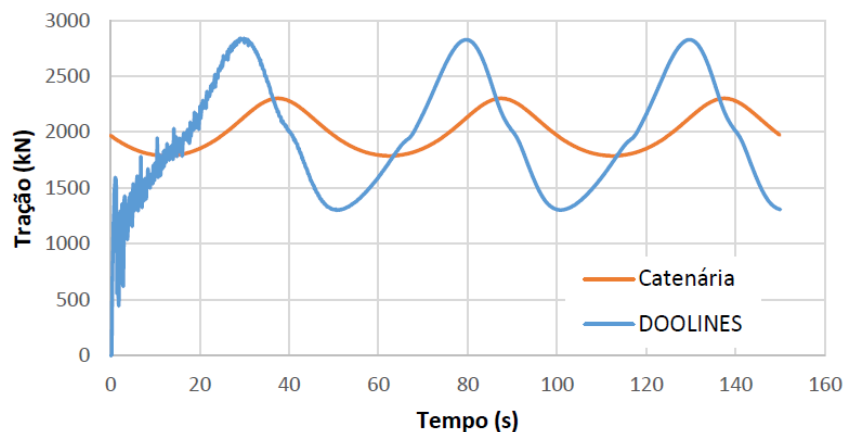
Prescrições de movimento	
$V(t) = \Delta V \sin\left(\frac{2\pi t}{TV}\right) + V0$	$H(t) = \Delta H \sin\left(\frac{2\pi t}{TH}\right) + H0$
$\frac{dV}{dt} = \cos\left(\frac{2\pi t}{TV}\right) 2\pi \frac{\Delta V}{TV}$	$\frac{dH}{dt} = \cos\left(\frac{2\pi t}{TH}\right) 2\pi \frac{\Delta H}{TH}$
$\frac{d^2V}{dt^2} = -\Delta V \sin\left(\frac{2\pi t}{TV}\right) 4\pi^2 \left(\frac{1}{TV}\right)^2$	$\frac{d^2H}{dt^2} = -\Delta H \sin\left(\frac{2\pi t}{TH}\right) 4\pi^2 \left(\frac{1}{TH}\right)^2$

Tabela 1: Prescrições dos movimentos (Fonte: RODRIGUES, 2018).

Geometria da linha	
Lâmina d'água (LDA)	1000 [m]
Comprimento da linha (L)	1300 [m]
Projeção vertical da linha (V0)	900 [m]
Projeção horizontal da linha (H0)	900 [m]
Diâmetro (D)	0,15 [m]
Massa específica linear (ρ_c)	0,1265 [ton/m]
Peso submerso linear (w)	1,0629 [kN/m]
Propriedade do Fluido	
Massa específica da água (ρ_w)	1,025 [ton/m ³]
Coeficientes de Morison	
C. arrasto longitudinal (Cdl)	0,085
C. Arrasto transversal (Cdt)	1,700
C. massa adicional longitudinal (Cml)	0,000
C. massa adicional transversal (Cmt)	1,000
Outros dados	
Aceleração da gravidade	9,80665 [m/s ²]
Período	50 [s]
Tempo de simulação	150 [s]
Passo para gerar valores	0,1 [s]
Rigidez axial (EA)	10 ⁸ [kN]

Tabela 2: Parâmetros dos movimentos (Fonte: RODRIGUES, 2018).

Para a análise do código desenvolvido, realiza-se uma comparação do histórico da tração no *fairlead* em relação ao obtido pelo *framework* DOOLINES, considerando três casos: apenas peso submerso, em seguida considera-se a parcela de arrasto, e, posteriormente, adicionando estes e a parcela inercial. Estes históricos serão demonstrados em gráficos, comparando cada caso do código em relação ao obtido pelo DOOLINES, nas Figuras 4, 5 e 6 a seguir.

Figura 4: Tração no *fairlead* considerando apenas peso submerso (Fonte: RODRIGUES, 2018).

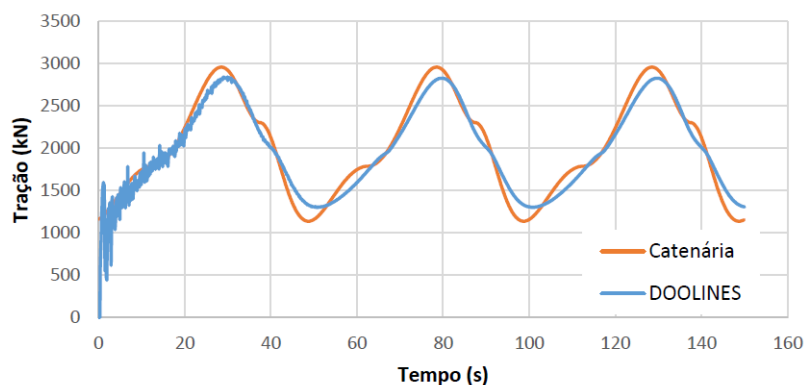


Figura 5: Tração no *fairlead* considerando peso submerso e a parcela de arrasto (Fonte: RODRIGUES, 2018).

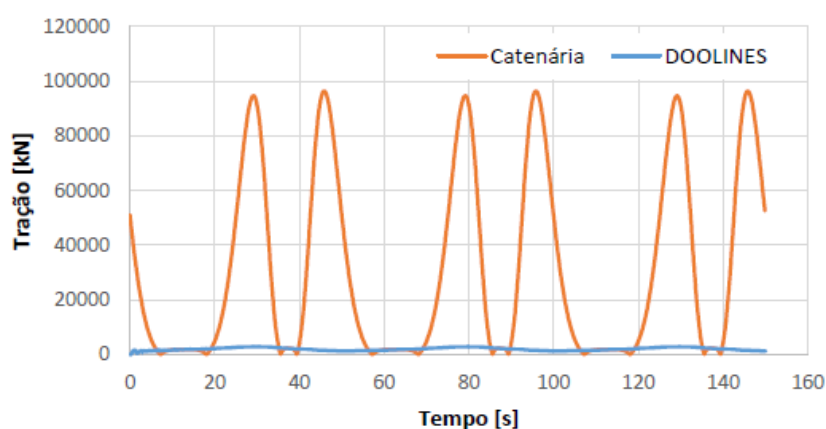


Figura 6: Tração no *fairlead* considerando peso submerso e parcelas de inércia e arrasto (Fonte: RODRIGUES, 2018).

A alta variação de valores iniciais do gráfico de tração obtido pelo *framework* ocorre devido à fase transiente, vindo a estabilizar após determinado tempo. Como esperado, os valores de tração no DOOLINES foram maiores que os obtidos pelo código no qual a catenária está submetida apenas ao peso próprio (Figura 4). Ao introduzir a parcela de arrasto (Figura 5), os valores de tração obtidos entram em fase e aproximam-se bastante do gráfico de trações do DOOLINES. Entretanto, ao adicionar as parcelas de inércia no código, observa-se a diferença entre os valores de tração entre os programas, que chega a valores de ordem de 10^5 (RODRIGUES, 2018).

Conclusões

Neste trabalho foi analisado o desempenho de um novo método de simulação de linhas de ancoragem, mesclando pontos positivos entre o método da catenária e dos elementos finitos. O novo método teve seu *script* desenvolvido em MATLAB® e, de acordo com os resultados obtidos em comparação ao DOOLINES, este é uma alternativa equivalente à análise estática. A formulação proposta também é válida para análises dinâmicas com movimentos prescritos e com adição das parcelas advindas da formulação de Morison. Entretanto, a adição das parcelas inerciais à formulação leva à incompatibilidade com os dados obtidos via DOOLINES. Portanto, a formulação proposta demonstra uma possibilidade de substituição competitiva em relação ao MEF para algumas condições de contorno, sendo possível ampliar a metodologia para linhas extensíveis e não homogêneas.

Agradecimentos

À Petrobras e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

BAI, Y. *Pipelines and Risers*. 1.ed. London: Elsevier, 2001. 498 p. Vol. 3. (Elsevier Ocean Engineering Book Series).

BEZERRA NETO, H. P. **Desempenho de elementos finitos de viga com formulação completa e simplificada na análise dinâmica de risers**. 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, 2014.

BICO, V. M. P. **Amarração de plataformas offshore flutuantes com cabos de poliéster**. 2013. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

CORRÊA, F. N. **Aplicação de metodologias híbridas em estudos paramétricos sobre o comportamento de sistemas offshore**. 2003. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

FERREIRA, F. M. G. **Desenvolvimento e aplicações de um *framework* orientado a objetos para análise dinâmica de linhas de ancoragem e de risers**. 2005. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2005.

FERREIRA, F. M. G. **Otimização de sistema de ancoragem equivalente em profundidade truncada**. 2016. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE, Recife, 2016.

FUCATU, C. H. **Desenvolvimento de um simulador dinâmico para análise de navios amarrados**. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

KAWASAKI, P. Y. **Análise de linhas de ancoragem de plataformas oceânicas considerando diversos tramos e o trecho enterrado da linha**. 2010. 73 p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

KESHAVARZ, L. **Analysis of mooring system for a floating production system**. Dissertação (Mestrado) — Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, 2011.

LACERDA, T. A. G. **Análise de sistemas de ancoragem de plataformas**. 2005. 67 p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LOUREIRO, R. R. **Análise numérico-experimental de anomalia de sistema de ancoragem em catenária devido a falha de manilhas de linhas de poliéster**. 2007. 171 p. dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

MARTINS, M. A. L; LAGES, E. N. **Análise estrutural de sistemas marítimos: A catenária**. 37f. Maceió 2017. Notas de Aula.

NAZÁRIO, V. C. **Modelagem de sistemas de ancoragem utilizando catenária inelástica**. 2015. 75 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Naval) – Universidade de Santa Catarina - UFSC, Joinville, Santa Catarina, 2015.

NISHIMOTO, K.; FUCATU, C. H.; MASETTI, I. Q. Dynasim—A time domain simulator of anchored FPSO. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 124, n. 4, p. 203–211, 2002.

PERDIGÃO, D. R. **Avaliação numérica do comportamento do dispositivo CECO – conversor da energia cinética das ondas**. 155 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2015.

PEREIRA, I. A. B. B. **Escoamento turbulento em torno de um cilindro a baixo número de Reynolds**. 2010. 75 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto Portugal, 2010.

PICCININI, F. C. (2008). **Carregamento hidrodinâmico sobre uma estrutura cilíndrica esbelta proveniente de ondas e correntes oceânicas**. Revista de Engenharia de Instalações no Mar. Brasil.

REIS, L. A.; PALERMO JÚNIOR, L. **Análise elástica linear de elementos planos enrijecidos com fibras através de um acoplamento MEC-MEF**. 2014. 14 p. Artigo - XI Simpósio de Mecânica Computacional, Juiz De Fora, Minas Gerais, 2014.

RODRIGUES, C. A. M. **Uma proposta para consideração das parcelas inercial e de amortecimento em catenárias suspensas**. 2018. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2018.

SENRA, S. F. **Metodologias de análise e projeto integrado de sistemas flutuantes para exploração de petróleo offshore**. 2004. 328 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

SILVEIRA, E. S. S. **Análise dinâmica de linhas de ancoragem com adaptação no tempo e subciclagem**. 2001. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

SILVEIRA, E. S. S.; LAGES, E. N.; FERREIRA, F. M. G. **DOOLINES: an object-oriented framework for non-linear static and dynamic analyses of offshore lines** *Engineering with Computers*, Springer-Verlag, v. 28, p. 149–159, 2012.

SILVEIRA, P. H. R. **Desenvolvimento de um elemento finito de cabo para análise dinâmica de linhas de ancoragem**. 2016. 44 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2016.

TECHET, A. H. **Morrison's Equation**. 2004. 8 p. Artigo (Engenharia Mecânica e oceânica) – Massachusetts Institute of Technology, [S.I.], 2004.

TSUKADA, R. I. **Comportamento dinâmico de riser rígido em catenária devido à vibração induzida por vórtices em águas profundas**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 111 p. Dissertação (Mestrado).