

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA O TRANSPORTE DE DUTOS FLEXÍVEIS LANÇADOS ENTRE DUAS EMBARCAÇÕES.

B. L. R. Andrade* ; M. R. Martins** ; A. Weiss

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

*beluroan@usp.br **mrmartin@usp.br

RESUMO

O transporte e a instalação tradicional de dutos flexíveis (risers) em lâminas d'água acima de 200m exige o emprego de embarcações específicas de elevado custo diário. Neste trabalho apresenta-se um estudo preliminar de viabilidade técnica para o transporte de dutos flexíveis suspensos em catenária entre duas embarcações do tipo AHTS, cujo custo diário pode reduzir-se até a 50% do custo atual. Existem duas alternativas para o transporte do duto em catenária apoiado nas duas embarcações: com as embarcações navegando em linha (tandem) ou lado a lado. Neste trabalho apresenta-se a análise para as embarcações em tandem. Por se tratar de um estudo preliminar considerou-se apenas os efeitos do peso submerso dos risers e do arrasto provocado pelo deslocamento das embarcações em diferentes velocidades. Considerou-se com fatores limitantes para a operação a capacidade de reboque das embarcações, a flecha máxima apresentada pela catenária e as trações máximas nos dutos. Para realização do estudo desenvolveu-se um modelo analítico simplificado que permite a rápida determinação da velocidade limite de reboque para diferentes diâmetros e comprimentos dos risers e diferentes distâncias entre as embarcações. Resultados obtidos a partir do tratamento do problema pelo método de elementos finitos são utilizados para verificar as soluções obtidas pelo modelo analítico. O modelo desenvolvido apresenta resultados bastante satisfatórios nas condições de operação estudadas.

INTRODUÇÃO

O transporte e instalação de dutos flexíveis (risers) empregados na produção de petróleo no mar requer, de modo geral, o emprego de embarcações especiais de elevado custo diário, que representam parcela significativa do custo destas operações. Tais custos tornam-se ainda mais relevantes quando as operações envolvem apenas trechos limitados de dutos. Nestas situações, uma alternativa para se tentar reduzir os custos desta operação é a realização do transporte do duto suspenso entre duas embarcações do tipo AHTS. A viabilização deste tipo de alternativa pode significar reduções de até 50% nos custos deste transporte. Neste trabalho apresenta-se os resultados de um estudo preliminar para verificação da viabilidade técnica do transporte de dutos flexíveis suspensos entre duas embarcações do tipo AHTS navegando em linha (tandem), conforme mostrado na figura 1. Por se tratar de uma fase preliminar de avaliação, o estudo teve por objetivo estabelecer um procedimento rápido e confiável para se determinar as configurações viáveis para o transporte dos dutos segundo determinados critérios de avaliação. Para este estudo, uma configuração qualquer de transporte de um duto com diâmetro externo D está definida quando se determina a distância L entre as embarcações, o ângulo estático θ_0 entre as extremidades do duto e o eixo horizontal e a velocidade V de reboque (ver figura 1). Tendo em vista o caráter preliminar do estudo, as seguintes hipóteses foram adotadas:

- os esforços atuantes nos dutos se devem apenas aos carregamentos oriundos do peso próprio, do empuxo hidrostático e do arrasto fluido provocado pela velocidade de avanço das embarcações.
- a viabilidade técnica das configurações é determinada inicialmente pelo atendimento aos seguintes critérios: tração máxima nos dutos; força máxima de reboque das embarcações; flecha máxima dos dutos.

Para se determinar a viabilidade de uma certa configuração de transporte desenvolveu-se um modelo analítico simplificado que permite a rápida determinação dos efeitos da velocidade de transporte sobre os esforços atuantes no duto. A simplificação do modelo decorre da hipótese de que, nas configurações usuais de transporte, as relações d/L serão pequenas, devido à limitações de flecha d . O modelo baseia-se em equações da catenária, simplificadas para catenária rasa, e permite a avaliação paramétrica dos esforços nas extremidades do duto e da flecha do mesmo, em função da velocidade das embarcações, da distância entre elas e do ângulo inicial das extremidades do duto com o eixo horizontal. Com base nestes resultados rapidamente pode-se determinar as configurações viáveis em termos da tração máxima, da capacidade de reboque e da flecha máxima.

No próximos itens do trabalho apresenta-se uma descrição do modelo desenvolvido e um exemplo de aplicação do mesmo para o transporte de um riser flexível entre duas embarcações AHTS. Para verificação da validade do modelo apresenta-se também uma comparação de resultados para um caso analisado também pelo método dos

elementos finitos, onde o riser é modelado a partir de elementos de treliça.

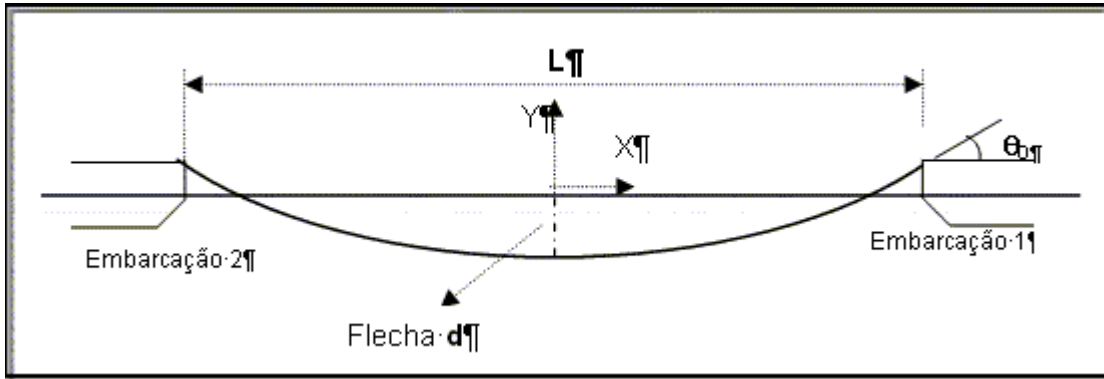


Figura 1

MODELO ANALÍTICO SIMPLIFICADO

O modelo analítico desenvolvido baseia-se numa simplificação das equações de equilíbrio estático de um cabo flexível submetido à cargas Q_x e Q_y por unidade de comprimento (s) na posição indeformada, conforme mostra a figura 2. As equações de equilíbrio estático deste cabo, desenvolvidas em detalhes nas referências [2], [3], [4] e [5] são:

$$\frac{d}{ds}(T(s) \cdot \cos\theta(s)) = -Q_x(s)$$

onde:

T: tração no cabo;

θ : ângulo entre o cabo e o eixo X;

ε : deformação elástica axial do cabo;

E: módulo de Young;

A: área transversal do cabo

$$\frac{d}{ds}(T(s) \cdot \sin\theta(s)) = -Q_y(s)$$

(1)

$$\frac{dx}{ds} = (1 + \varepsilon(s)) \cdot \cos\theta(s)$$

$$\frac{dy}{ds} = (1 + \varepsilon(s)) \cdot \sin\theta(s)$$

$$\varepsilon(s) = \frac{T(s)}{EA}$$

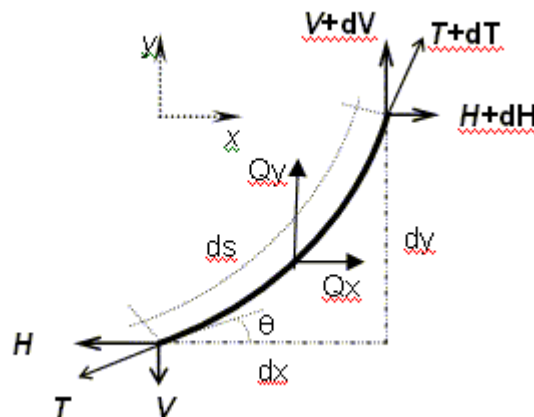


Figura 2 - Elemento de cabo plano

Solução estática sem correnteza ($V=0$; $Q_x=0$; $Q_y=-Q$)

Considere-se agora o cabo horizontal da figura 1 submetido apenas a uma carga lateral Q ($Q_y = -Q$; $Q_x = 0$), correspondendo ao seu peso submerso. Supondo uma razão d/L pequena (catenária rasa ou retesada) e pequenas deformações ($\varepsilon \ll 1$), as seguintes simplificações podem ser feitas [1]:

$$\cos \theta \cong 1 \Rightarrow dx \cong ds \tag{2}$$

$$\sin \theta \cong \theta$$

Com estas simplificações nas equações (1) obtém-se:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{Q}{H_0}; \quad \frac{dy}{dx} = \theta(x) \tag{3}$$

Integrando-se estas equações, com condições de contorno $y(\pm L/2) = 0$, obtém-se o seguinte resultado:

$$\frac{y(x)}{L} = -\frac{QL}{8H_0} \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \tag{4}$$

onde:
 H_0 = componente horizontal da tração da tração no cabo
 Q = peso submerso do cabo

$$\theta(x) = \frac{QL}{H_0} \cdot \frac{x}{L}$$

As equações (4) representam a solução estática aproximada para o cabo em catenária rasa, submetido apenas ao seu peso submerso. Com estas equações, o comprimento L_c deste cabo pode ser aproximadamente determinado como segue:

$$L_c = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dx}{\cos \theta} \cong \int_{-L/2}^{L/2} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \theta^2 \right) dx = L + \frac{L}{24} \cdot \left(\frac{QL}{H_0} \right)^2 \tag{5}$$

As equações (2) e (4) serão empregadas mais adiante para introduzir o efeito da velocidade de avanço das embarcações.

O efeito da velocidade de avanço das embarcações

O efeito da velocidade de avanço V das embarcações pode ser modelado considerando-se o duto estacionário sendo submetido à uma correnteza uniforme, de velocidade V , paralela ao plano contendo o duto. Nesta situação surge sobre o duto uma força de arrasto hidrodinâmico, distribuída ao longo de seu comprimento que, por sua vez, provoca o deslocamento do duto até uma nova posição de equilíbrio estático. Esta força de arrasto por unidade de comprimento (f_c) depende da posição relativa final entre o duto e a direção de V e, por hipótese, age apenas na direção normal ao cabo, como mostra a figura 3 .

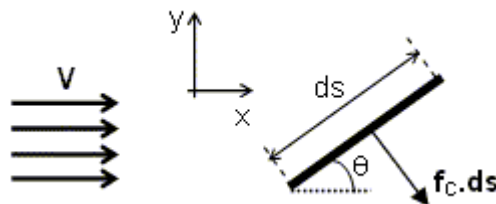


Figura 3

Com auxílio da figura 3, o módulo da força de arrasto num elemento de cabo é dado por:

$$f_c \cdot ds = \frac{1}{2} \rho C_D D \cdot (V \cdot \sin\theta) \cdot (V \cdot \sin\theta) \cdot ds \quad (6)$$

onde: ρ = densidade da água

C_D = coeficiente de arrasto da seção transversal do duto

As componentes desta força, por unidade de comprimento, nas direções x e y são:

$$f_{cX} = \frac{1}{2} \rho C_D D \cdot V \cdot |V| \cdot \sin^2\theta \cdot |\sin\theta| \quad (7)$$

$$f_{cY} = -\frac{1}{2} \rho C_D D \cdot V \cdot |V| \cdot \sin\theta \cdot |\sin\theta| \cdot \cos\theta$$

Os termos $|V|$ e $|\sin\theta|$ aparecem nas equações (7) para garantir o sentido correto das forças nas direções x e y. Introduzindo-se nestas equações as aproximações para catenária rasa obtém-se:

$$f_{cX} = \frac{1}{2} \rho C_D D \cdot V \cdot |V| \cdot \theta^2 \cdot |\theta| \quad (8)$$

$$f_{cY} = -\frac{1}{2} \rho C_D D \cdot V \cdot |V| \cdot \theta \cdot |\theta|$$

A adição das parcelas f_{cX} e f_{cY} aos valores Q_x e Q_y das equações (1), combinada com as simplificações dadas nas equações (2), resulta no sistema de equações de equilíbrio para o cabo em catenária rasa submetido à uma correnteza de velocidade V . É imediato verificar que estas equações resultantes são acopladas e não tem solução analítica trivial. Tendo em vista o caráter preliminar do estudo, propõe-se a seguir duas simplificações para a avaliação da força de arrasto, de modo a permitir a solução analítica das equações.

Simplificação da força de arrasto

Na condição de catenária rasa ($d/L \ll 1$) a rigidez geométrica de uma cabo flexível é bastante elevada e pode-se considerar, em primeira aproximação, que a configuração do duto não apresentará uma alteração significativa com a incidência da correnteza. Com esta hipótese, as componentes (8) da força de arrasto distribuída ao longo do duto podem ser calculadas empregando-se a solução para o ângulo θ dada pelas equações (4). Introduzindo esta simplificação obtém-se:

$$f_{cX} = \frac{1}{2} \rho C_D D \cdot V \cdot |V| \cdot \left(\frac{Q}{H_0}\right)^3 \cdot x^2 \cdot |x| \quad (9)$$

$$f_{cY} = -\frac{1}{2} \rho C_D D \cdot V \cdot |V| \cdot \left(\frac{Q}{H_0}\right)^2 \cdot x \cdot |x|$$

Os termos $|V|$ podem ser eliminados multiplicando-se convenientemente as equações por ± 1 conforme o sentido da correnteza. Para eliminação dos termos $|x|$ propõe-se a substituição das forças distribuídas f_{cX} e f_{cY} por duas distribuições equivalentes, que preservem o valor da resultante destas componentes nas direções x e y e reproduzam corretamente o sentido destas forças ao longo do cabo. As forças equivalentes propostas são:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{cX} &= \bar{f}_x \cdot x^2 \\ \bar{f}_{cY} &= -\bar{f}_y \cdot x \end{aligned} \quad (10)$$

Para que as resultantes das componentes da força de arrasto sejam preservadas, os valores de \bar{f}_x e \bar{f}_y devem ser determinados como segue:

$$\begin{aligned} \int_0^{L/2} \bar{f}_x \cdot x^2 \cdot dx &= \int_0^{L/2} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot V^2 \cdot \left(\frac{Q}{H_0}\right)^3 \cdot x^3 \cdot dx \Rightarrow \bar{f}_x = \frac{3}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot V^2 \cdot L \cdot \left(\frac{Q}{2H_0}\right)^3 \\ -\int_0^{L/2} \bar{f}_y \cdot x \cdot dx &= -\int_0^{L/2} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot V^2 \cdot \left(\frac{Q}{H_0}\right)^2 \cdot x^2 \cdot dx \Rightarrow \bar{f}_y = \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot V^2 \cdot L \cdot \left(\frac{Q}{2H_0}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Com estes resultados as cargas por unidade de comprimento, Q_x e Q_y , atuando no cabo submetido a uma correnteza de intensidade V incidindo no sentido positivo do eixo x , ficam:

$$\begin{aligned} Q_x &= \bar{f}_x \cdot x^2 \\ Q_y &= -Q - \bar{f}_y \cdot x \end{aligned} \quad (12)$$

Solução estática com correnteza ($V \neq 0$; $Q_x = \bar{f}_{cx}$; $Q_y = -Q + \bar{f}_{cy}$)

Com as simplificações dadas pelas equações (2) e (12), as equações de equilíbrio (1) para um cabo em catenária rasa, submetido a uma correnteza de intensidade V , são:

$$\frac{d}{dx}(H(x)) = -\bar{f}_x \cdot x^2 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dx}(H(x) \cdot \theta(x)) = Q + \bar{f}_y \cdot x \quad (14)$$

Integrando-se as equações (13) e (14) obtém-se:

$$H(x) = -\frac{\bar{f}_x}{3} \cdot x^3 + C_1 \quad (15)$$

$$H(x) \cdot \theta(x) = Q \cdot x + \frac{\bar{f}_y}{2} \cdot x^2 + C_2 \quad (16)$$

onde C_1 e C_2 são constantes de integração.

Levando agora (15) em (16) e com o auxílio de (3), obtém-se:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Q \cdot x + \frac{\bar{f}_y}{2} \cdot x^2 + C_2}{-\frac{\bar{f}_x}{3} \cdot x^3 + C_1} = \theta(x) \quad (17)$$

Integrando (17) obtém-se a equação da curva assumida pelo duto após a incidência da correnteza:

$$y = \int \frac{Q \cdot x + \frac{\bar{f}_y}{2} \cdot x^2 + C_2}{-\frac{\bar{f}_x}{3} \cdot x^3 + C_1} dx \quad (18)$$

A solução desta integral fornece:

$$\text{Onde: } y = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{f}_y}{\bar{f}_x} \ln(x^3 + \varphi^3) + \frac{1}{2} \cdot \ln(\alpha) \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \bar{f}_x} + \frac{C_2}{\varphi^2 \cdot \bar{f}_x} \right) + \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \arctg(\Delta) \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \bar{f}_x} - \frac{C_2}{\varphi^2 \cdot \bar{f}_x} \right) + C_3 \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{x^2 - \varphi \cdot x + \varphi^2}{(x + \varphi)^2}; \quad \Delta = \frac{2 \cdot x - \varphi}{\sqrt{3} \cdot \varphi}; \quad \varphi = \sqrt[3]{\frac{-3 \cdot C_1}{\bar{f}_x}}; \text{ e } C_3 \text{ é uma constante de integração.}$$

Condições de Contorno

Para se completar a solução do problema deve-se determinar as constantes C_1 , C_2 e C_3 . Para isto é necessário aplicar três condições de contorno. As duas primeiras referem-se às coordenadas das extremidades do duto e devem ser aplicadas na equação (19) impondo-se que:

$$y\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \quad (20)$$

$$y\left(-\frac{L}{2}\right) = 0 \quad (21)$$

A terceira condição é obtida impondo-se que o comprimento do riser sujeito à correnteza seja igual ao comprimento dado pela equação (5). Esta condição deve ser aplicada a partir da seguinte integração:

$$\int_{-L/2}^{L/2} (1 + 1/2 \cdot \theta^2) dx = L + \frac{L}{24} \cdot \left(\frac{QL}{H_0}\right)^2 \quad (22)$$

onde $\theta(x)$ é dado pela equação (17).

Aplicando-se as condições de contorno chega-se a:

$$-\frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{L^3}{8} + \varphi^3\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln(\alpha^+) \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \bar{f}_X} + \frac{C_2}{\varphi^2 \cdot \bar{f}_X}\right) + \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \arctg(\Delta^+) \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \bar{f}_X} - \frac{C_2}{\varphi^2 \cdot \bar{f}_X}\right) + C_3 = 0 \quad (23)$$

$$-\frac{1}{2} \cdot \ln\left(-\frac{L^3}{8} + \varphi^3\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln(\alpha^-) \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \bar{f}_X} + \frac{C_2}{\varphi^2 \cdot \bar{f}_X}\right) + \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \arctg(\Delta^-) \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \cdot \bar{f}_X} - \frac{C_2}{\varphi^2 \cdot \bar{f}_X}\right) + C_3 = 0 \quad (24)$$

$$\frac{1}{\varphi} \cdot \ln\left(\frac{\alpha^+}{\alpha^-}\right) \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \bar{f}_Y \cdot \left(\frac{\bar{f}_Y}{2} + \frac{Q}{\varphi}\right) - \frac{C_2}{\varphi^3} \cdot \left(Q + \frac{C_2}{\varphi}\right)\right] + \quad (25)$$

$$+ \frac{3}{\varphi \cdot \sqrt{3}} \cdot (\arctg(\Delta^+) - \arctg(\Delta^-)) \cdot \left[\bar{f}_Y \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \bar{f}_Y - \frac{Q}{\varphi}\right) - \frac{2 \cdot C_2}{\varphi^3} \cdot \left(Q - \frac{C_2}{\varphi}\right)\right] +$$

$$\text{onde: } + \left[\frac{3 \cdot L}{-\frac{L}{64} + \varphi^6}\right] \cdot \left[\bar{f}_Y \cdot \left(\frac{L^4 \cdot \bar{f}_Y}{64} + Q \cdot \varphi^3\right) + \frac{L^2}{4} \cdot (\bar{f}_Y \cdot C_2 + Q^2) + C_2 \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \frac{Q \cdot L^4}{\varphi^3} + C_2\right)\right] +$$

$$\alpha^+ = \alpha \left(x = \frac{L}{2}\right); \quad \alpha^- = \alpha \left(x = -\frac{L}{2}\right); \quad \Delta^+ = \Delta \left(x = \frac{L}{2}\right); \quad \Delta^- = \Delta \left(x = -\frac{L}{2}\right)$$

As equações (23), (24) e (25) formam um sistema de três equações algébricas em três variáveis que, resolvido por método numérico, fornece os valores das constantes C_1 , C_2 e C_3 , completando a solução do modelo analítico.

APLICAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS

Neste item são apresentados resultados obtidos pelo modelo analítico para um riser de 9.2" de diâmetro e 0.57 kN/m de peso linear submerso sendo transportado por duas embarcações em linha, variando a distancia L entre ambas entre 500 e 1250m, o ângulo com a horizontal na extremidade (θ_0) entre 20° e 35° e velocidades de 0 a 5m/s.

A Tabela 1 apresenta os comprimentos, obtidos a partir da configuração estática da linha sem a incidência de correnteza, e utilizados nas demais análises.

Tabela 1. Relação entre distância e comprimento

θ_0	20°	25°	30°	35°
500	510	516	525	536
750	764	774	787	803
1000	1017	1031	1048	1070
1250	1270	1280	1310	1337

As Fig. 4 e 5 apresentam os resultados obtidos para a tração em função da velocidade para cada ângulo analisado. Nestas figuras, a linha tracejada, apresentada na legenda como limite, refere-se à restrição de capacidade máxima de reboque das embarcações a serem utilizadas.

Analisando estas figuras, vê-se que para as embarcações distanciadas de 500 ou 750m, todas as configurações analisadas são viáveis quanto à restrição de capacidade de reboque. Para as embarcações distanciadas de 1000m, o transporte é possível apenas com ângulo de 30° ou 35°, com velocidade máxima de 3.7m/s e 4m/s, respectivamente. Para os demais ângulos, a tração atuante no riser supera a capacidade de reboque, inviabilizando a operação. Para uma distância de 1250m entre as embarcações, nenhuma configuração é viável. A Fig. 6 apresenta as configurações que atendem a restrição de capacidade de reboque para uma distância entre as embarcações de 1000m, o que permite verificar se as configurações selecionadas atendem a restrição de flecha máxima.

Esta figura apresenta também a diferença entre a configuração sem correnteza ($V = 0m/s$) e as configurações assumidas pelo riser na presença de correnteza, sendo constatado que, para velocidades de cruzeiro usuais (até 3 nós), a diferença entre a configuração com e sem correnteza não é significativa, conforme considerado como hipótese inicial, para o cálculo da força de arrasto devido à incidência da correnteza.

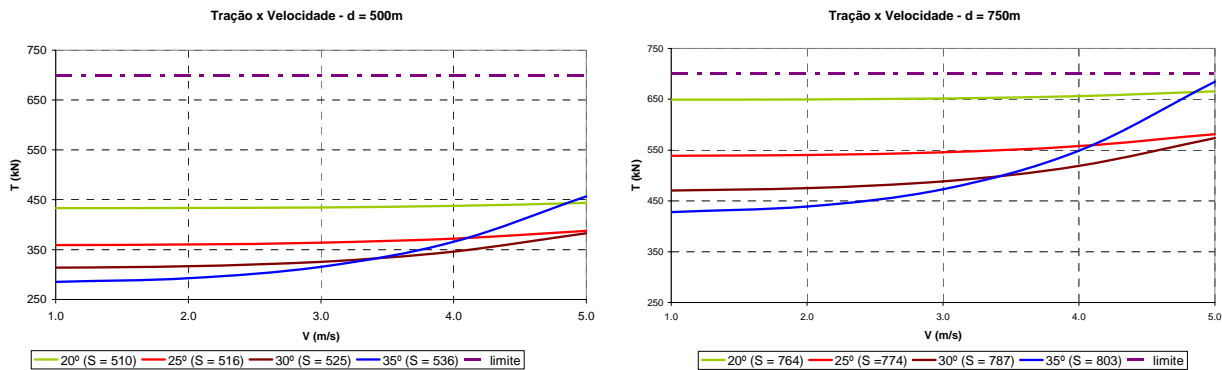


Fig. 4: Distancia entre as embarcações de 500m (esquerda) e 750m (direita)

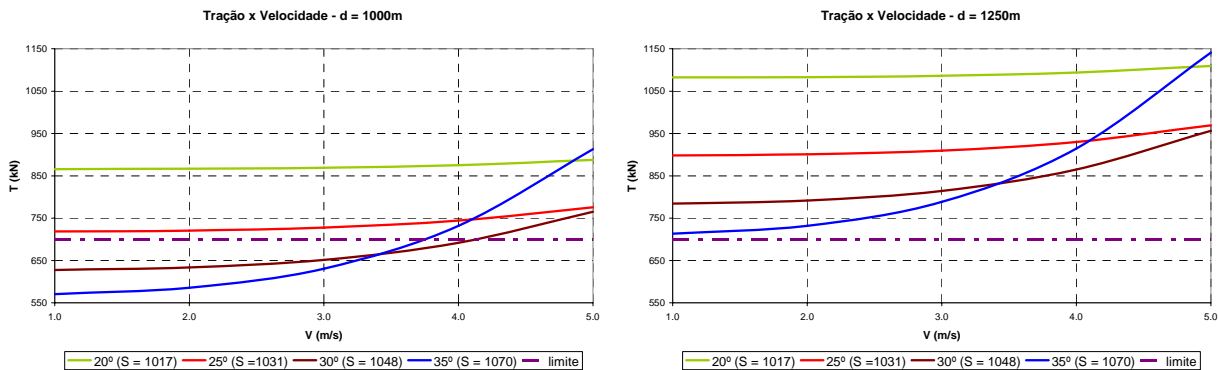


Fig. 5: Distancia entre as embarcações de 1000m (esquerda) e 1250m (direita)

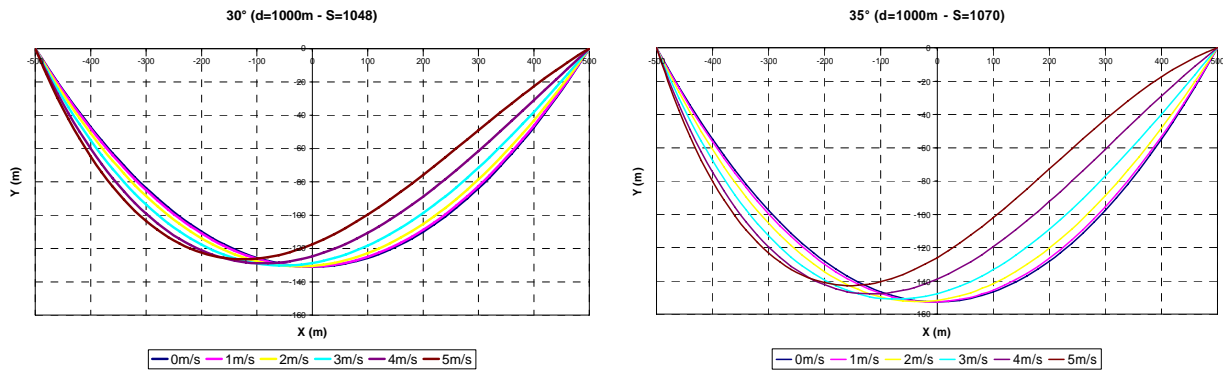


Fig. 6: Configuração do riser para uma distancia entre as embarcações de 1000m. $\theta_0 = 30^\circ$ (esquerda) e $\theta_0 = 35^\circ$ (direita)

COMPARAÇÕES COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Com o intuito de se verificar a qualidade dos resultados obtidos, as configurações apresentadas no item anterior foram analisadas pelo Método de Elementos Finitos, utilizando-se elementos de treliça para a representação do riser, conforme apresentado em [6].

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os esforços atuantes e a configuração apresentada pelo

riser para o caso $\theta_0 = 35^\circ$ com distância entre as embarcações igual a 1000m e velocidade da corrente incidente de 3m/s..

A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados obtidos, pelo modelo analítico apresentado e pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), para o ângulo com a horizontal e esforços atuantes em ambas as extremidades do riser.

Tabela 2. Esforços e ângulo com a horizontal nas extremidades

	Extremidade de Ré			Extremidade de Vante		
	Modelo analítico	MEF	Diferença	Modelo analítico	MEF	Diferença
Esforço Total	604.6 kN	623.0 kN	-2.9 %	631.6 kN	621.8 kN	1.5 %
Esforço Horizontal	510.9 kN	512.6 kN	-0.3 %	575.3 kN	570.3 kN	0.9 %
Ângulo com a horizontal	32.3°	34.6°	-6.6 %	24.4°	23.4°	4.2 %

A Fig. 7 apresenta a configuração obtida para o riser pelo modelo analítico e pelo MEF. A linha preta representa a configuração assumida pelo riser sem a presença da corrente, a linha vermelha, a configuração obtida pelo modelo analítico considerando velocidade de corrente incidente de 3m/s e a linha azul, a configuração obtida pelo MEF considerando a mesma velocidade incidente. A linha preta representa a configuração obtida por ambos os modelos.

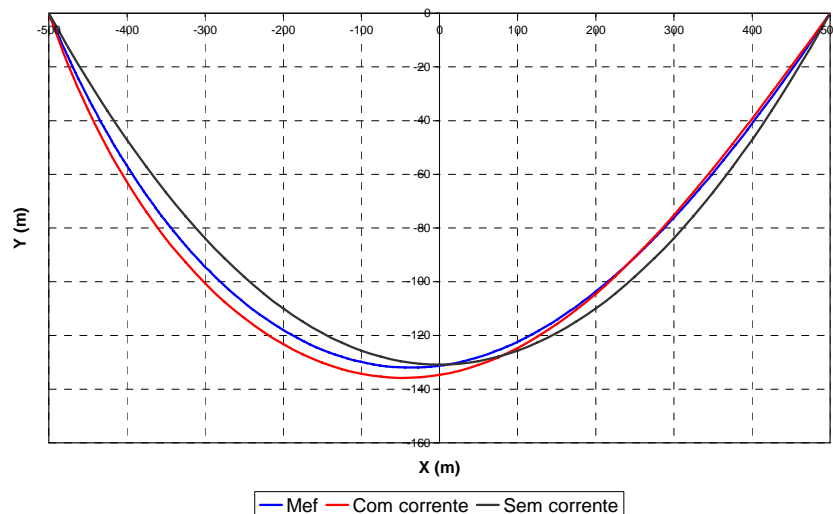


Fig. 7: Configurações obtidas pelo modelo apresentado e pelo MEF

Percebe-se uma ligeira diferença entre as configurações obtidas pelo modelo apresentado e o MEF, quando se considera a velocidade incidente no riser, enquanto que os esforços atuantes nas extremidades apresentam uma diferença bastante reduzida.

A melhor precisão nos esforços era esperada pois o modelo desenvolvido, através de, permite a obtenção bastante precisa dos esforços atuantes devido a incidência da correnteza e aproxima a configuração para uma catenária rasa.

REFERENCIAS

1. Aranha J.A.P., Pesce C.P., Martins C.A., Andrade B.L.R. - Mechanics of submerged cables: asymptotic solution & dynamic tension, Symposium International Society of Offshore and Polar Engineering, 1993, Cingapura.
2. Martins, M. R., Ribeiro, A. E., Maeda, F. C.- Programa CATENA v1.3 - Manual teórico, EPUSP - Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, São Paulo, Brazil, 33 p. 1998.
3. Oppenheim B. W., Wilson P. A.- Static 2-D Solution of a Mooring Line of Arbitrary Composition in the Vertical and Horizontal Operating Modes, International Shipbuilding Congress, pp. 142-153, 1982.
4. Peyrot, A.H. (1980), "Marine Cable Structures", Journal of the Structural Division - ASCE, pp. 2391-2404.
5. Peyrot, A.H. e Goulois, A.M. (1979), "Analysis of Cable Structures", Computers & Structures, vol. 10, pp. 805-813.
6. Teixeira, B. S., Martins, M. R.- Finite Element Method for Cable Analysis, 17th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM - 2003, São Paulo, Brazil, 2003.