

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE DUTOS ENTERRADOS.

Talles Moura Mendonça, Aldo Durand Farfán

Laboratório de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia,
UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense
Av. Alberto Lamego, 2000 – Parque Califórnia – Cep: 28013600, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
web page: <http://www.uenf.br>

Key words: Pipelines, MEF Analysis, Limit Analysis Method.

Abstract. *This work presents an analytic and numeric study of the mechanical behavior of a pipeline, together with an experimental test. The experimental test which has been carried out by the Institute of Technological Researches of São Paulo (IPT), reproduces closely, the real conditions of a pipeline lying in the sea bed, transporting oil from the semi-submergible platforms to the stock ships. During the operation the steel pipeline is submitted to internal pressure and lateral loads from waves and sea currents. The critical conditions during the operation of pipelines result from lateral loads. The solutions (analytic and numeric) discussed hereafter treat the study of the behavior of pipelines when submitted to those conditions.*

Limit analysis method has been used to find out the analytic solution and the numeric simulation is performed using Finite Elements Method (FEM) through the PLAXIS program. Elastic perfectly plastic yield criterion (Mohr-Coulomb) is used in both analyses. The conclusions drawn from this study can be used to foresee futures behaviors of other load states.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento dos centros urbanos, houve um crescente aprimoramento dos meios de comunicação e de redes de serviços de água, esgoto e drenagem, obras que fazem uso intensivo de estruturas enterradas, principalmente os condutos. Atualmente, outros tipos de serviços como a distribuição de gás, petróleo, as redes de telefonia e de transmissão de dados, passagens e abrigos subterrâneos, também utilizam sistematicamente as tubulações enterradas.

O presente trabalho mostra resultados preliminares do estudo do comportamento de dutos enterrados. O estudo trata da avaliação e comparação de dois métodos de resolução: o método de análise limite numérica (ALN) e método de elementos finitos (MEF). O problema escolhido para a aplicação destes dois métodos é um ensaio experimental realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) em 1999, o qual, foi descrito por Rosas¹. Este ensaio reproduz aproximadamente as condições reais de uma tubulação que repousa no fundo marinho, a qual é utilizada para o transporte de óleo e gás das plataformas de exploração até os navios de estocagem. O transporte de óleo e gás das plataformas de exploração semi-submersíveis, até as unidades de armazenamento (navios) são realizadas através de dutos, as quais são formadas por dois tipos de tubulações: tubulações rígidas em catenária (Risers Rígidos) e tubulações sub-horizontais que repousam no leito marinho (Figura 1). Estas últimas tubulações cobrem grandes distâncias e encontram-se submetidas à ação de cargas ambientais, tais como ondas e correntes marinhas (Rosas¹).

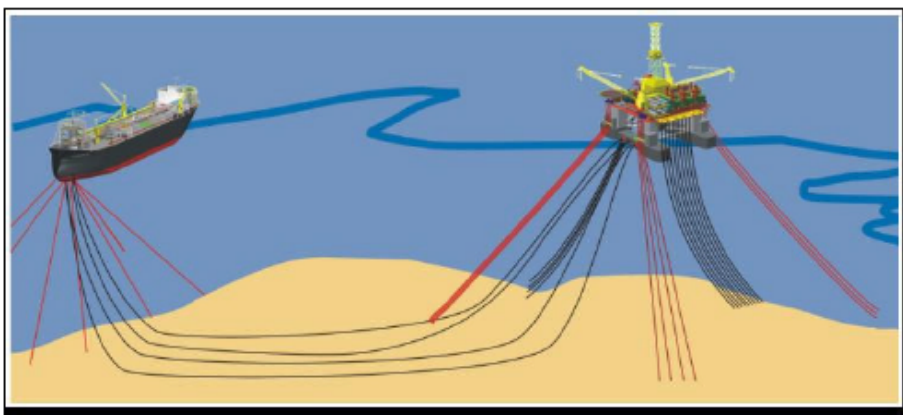


Figura 1: Dutos de transporte de gás e óleo entre a plataforma de exploração e o navio de armazenamento ¹.

2. ANÁLISE FÍSICA EXPERIMENTAL

O modelo físico é mostrado nas figuras 2 e 3. O ensaio foi realizado em escala reduzida no laboratório, utilizando uma caixa de ensaio de 1,5m de comprimento por 1,0m de altura e 1,0m de profundidade, preenchida de solo retirado do fundo do mar, em águas profundas *offshore*.

O ensaio no IPT consiste em um duto rígido de 12cm de diâmetro externo, 9cm de diâmetro interno e 0,95m de comprimento, apoiado no solo em duas posições distintas de enterramento, com 50% e 100% do diâmetro enterrado.

O duto foi submetido a cargas laterais (horizontais) aplicadas através de um sistema de cargas controladas (Figura 2), acompanhado da leitura de deslocamentos.

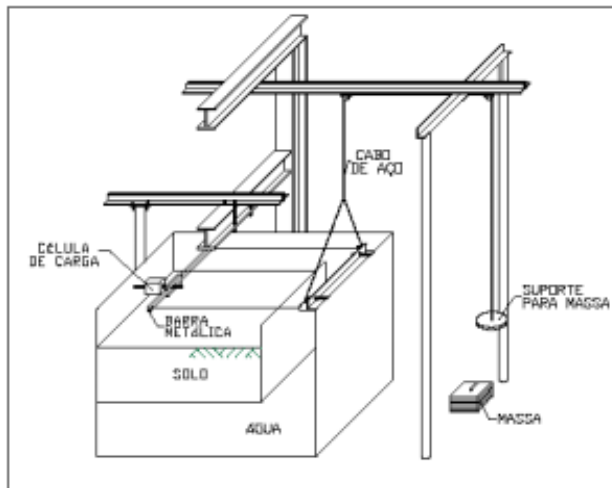


Figura 2: Sistema de Aplicação de Carga ¹.

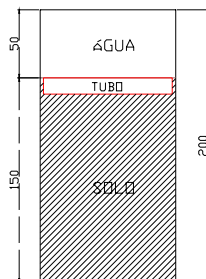


Figura 3: Representação da Caixa do Ensaio Físico.

3. RESOLUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DA ANÁLISE LIMITE

As condições básicas necessárias para a resolução de problemas de engenharia segundo a mecânica dos corpos deformáveis são: as equações de equilíbrio, as equações de compatibilidade e as relações tensão-deformação. O método da análise limite baseia-se nestas condições básicas considerando a relação tensão-deformação dos solos de forma idealizada, pressupondo um fluxo plástico associado (Finn² e Chen e Lui³). Esta suposição permite a demonstração dos teoremas limite. Os teoremas limite (teoremas do limite superior e inferior) aplicados convenientemente a problemas geotécnicos de estabilidade (ex: problemas de capacidade de carga, estabilidade de taludes, etc.), servem para obter soluções aproximadas que se aproximam tanto pela região superior ou inferior à carga de colapso da estrutura analisada.

3.1. Teorema do limite inferior (Teorema estático)

O fator de carga de colapso estático que corresponde a uma distribuição de tensões estaticamente admissíveis (σ), ou seja, que satisfazem: (a) As equações de equilíbrio no volume; (b) As equações de equilíbrio no contorno; e (c) que em nenhuma parte do meio seja violada a condição de escoamento, não será maior que o fator carga de colapso da estrutura.

3.2. Teorema do limite superior (Teorema cinemático)

O fator de carga de colapso cinemático determinado pela igualdade da taxa do trabalho externo e a taxa de dissipação interna de um campo de velocidade cinematicamente admissível (\dot{u}), ou seja, que satisfaz: (a) A condição de contorno em velocidades; e (b) a relação de compatibilidade entre deformação e velocidade, não é menor que o fator de carga

de colapso da estrutura. A dissipação da energia num fluxo plástico associado pode ser calculada por uma lei de fluxo idealizada num campo de velocidade distribuído no meio do problema em questão.

No presente trabalho, são aplicadas unicamente as condições do teorema do limite superior na forma analítica (Finn²), numa primeira etapa e numa segunda etapa será aplicado o método da análise limite numérica segundo a formulação de Araújo⁴ e Durand⁵.

Para obter uma solução analítica através do teorema superior da análise limite, foram assumidas em cada caso (tubulação enterrada a 100%D e 50%D), campos de deslocamentos/velocidades cinematicamente compatíveis com as condições de contorno (Figuras 4-b e 5-b). Na avaliação do trabalho realizado pelas forças externas (W_{ext}), foram consideradas as forças devidas ao peso do solo mobilizado, peso da tubulação e a força horizontal (P_h) (figuras 4 e 5). Devido à geometria do problema em estudo, o cálculo da energia de dissipação interna (D_{int}) considera somente a energia dissipada ao longo da superfície de ruptura, sendo assumida nula a parcela corresponde a energia de dissipação radial. Da aplicação do teorema do limite superior, a força horizontal necessária para levar o sistema a iminência de ruptura será determinado da igualdade do trabalho externo com a energia de dissipação interna.

3.3. Análise da tubulação a 100%D:

A Figura 4, mostra a geometria do problema analisado, a superfície de ruptura assumida, assim como, todas as grandezas necessárias para a obtenção do trabalho externo e a energia de dissipação interna. A Equação (1) mostra o trabalho externo realizado pelas forças de peso e a força horizontal em questão e a Equação (2), mostra a energia de dissipação na superfície AB (Figura 4-b).

$$W_{ext} = \langle P_h, -(W_s + W_d) \rangle \left\{ \begin{matrix} V_o \\ V_o \end{matrix} \right\} = P_h V_o - \left(\frac{1}{8} \pi D^2 \gamma + W_d \right) V_o \quad (1)$$

$$D_{int} = S_u V_o D \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

Onde:

W_d : Peso do duto;

W_s : Peso do solo;

S_u : Resistência não drenada ao cisalhamento.

D : Diâmetro do duto.

γ : Peso específico do solo.

P_h : Força horizontal;

V_o : Velocidade de deslocamento

W_{ext} : Trabalho das forças externas.

D_{int} : Energia interna de dissipação.

Da igualdade das equações (1) e (2), pode-se obter o valor da carga de ruptura do sistema (Eq. 3):

$$P_h = S_u \cdot D \cdot \left(\frac{\pi}{2} \right) + \left(\frac{1}{8} \pi \cdot D^2 \gamma + W_d \right) \quad (3)$$

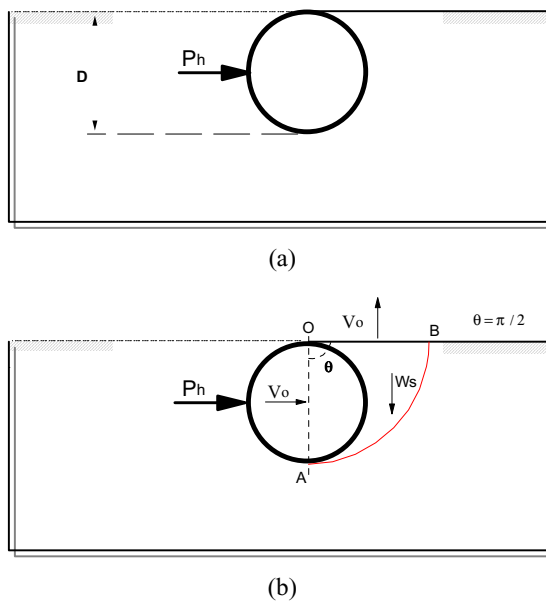
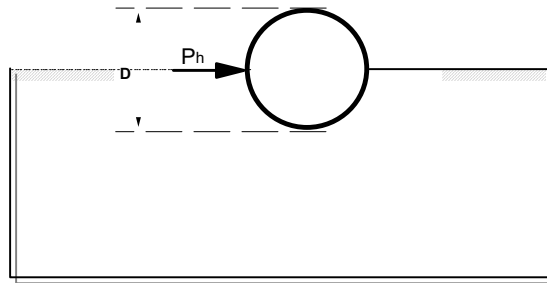


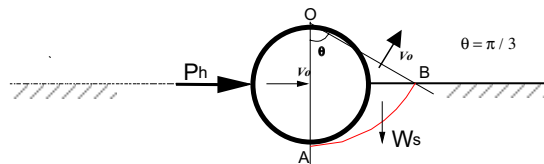
Figura 4 – Tubulação enterrada 100%D. (a) Geometria do problema. (b) Mecanismo de colapso circular e campo de velocidades cinematicamente admissíveis.

3.4. Análise da tubulação a 50%D:

De forma similar ao problema com 100%D, a Figura 5, mostra a geometria do problema, a superfície de ruptura assumida, assim como, todas as grandezas necessárias para a obtenção do trabalho externo e a energia de dissipação interna, considerando 50% de enterramento. Nas equações (4) e (5) estão respectivamente as expressões correspondentes ao trabalho externo e a energia de dissipação interna na superfície AB (Fig. 5-b).



(a)



(b)

Figura 5 – Tubulação enterrada 50% D. (a) Geometria do problema. (b) Mecanismo de colapso circular e campo de velocidades cinematicamente admissíveis.

$$W_{ext} = \langle \mathbf{P}_h, -(W_s + W_d) \rangle \left\{ \begin{array}{l} V_o \\ V_o \sin(\theta) \end{array} \right\} = \mathbf{P}_h \cdot V_o - ((0,11) \cdot \mathbf{D}^2 \boldsymbol{\gamma} + W_d) V_o \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

$$D_{\text{int}} = S_u \cdot V_0 \cdot D \left(\frac{\pi}{3} \right) \quad (5)$$

Igualando as equações (4) e (5), para obter o valor da carga P_h :

$$P_h = S_u \cdot D \left(\frac{\pi}{3} \right) + \left((0,11) \cdot D^2 \gamma + W_d \right) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6)$$

Examinando as equações (3) e (6), pode-se observar que a contribuição da parcela referida ao peso do material mobilizado (solo), não influi significativamente, portanto, esta parcela será desconsiderada para o cálculo da carga de colapso.

A Tabela 1 mostra os valores obtidos para as cargas de colapso, para as duas profundidades de enterramento. As cargas de colapso determinadas experimentalmente no IPT são também incluídas nesta tabela para efeitos de comparação. O fato de ser desconsiderado a parcela da energia de dissipação radial nas equações (2) e (5), teve maior influencia, quando a tubulação esta a 100%D. Isto é explicado porque neste caso a parcela radial é significativa, devido ao maior volume de solo deslocado (ver Fig. 4-b).

Tabela 1 – Resultados do Ensaio Físico e Análise Limite Analítica

% D enterrado	Análise Limite	Ensaio Físico
	Força (kN)	Força (kN)
50% D enterrado	0,57	0,48
100% D enterrado	0,78	0,98

4. RESOLUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para a análise numérica, foi utilizado o programa comercial de elementos finitos PLAXIS, a malha de elementos finitos utilizada por este programa são elementos triangulares com 6 e 15 nós e permite a simulação do comportamento de cinco diferentes materiais (Mohr-Coulomb, Linear Elástico, materiais com endurecimento, materiais com amolecimento e materiais com comportamento dependentes do tempo “Creep”)^{6,7}.

Em função do tipo de solo e do tipo de carregamento imposto pelo duto sobre o solo marinho, considerou-se um carregamento não drenado, ou seja, para o solo argiloso o carregamento é aplicado muito rapidamente sem que haja tempo para ocorrer drenagem. Para o modelo elástico perfeitamente plástico adotou-se o critério de Mohr-Coulomb.

As propriedades do solo e do duto foram obtidas do trabalho de Rosas¹, onde estão representados nas tabelas 2 e 3, inclusive a geometria do ensaio experimental realizado.

Tab. 2. Parâmetros do solo

Parâmetros do Solo (Argila Marinha)	
Peso Específico dos Sólidos (γ_s)	2,763 g/cm ³
Peso Específico Saturado (γ_{sat}) *	16,67 g/cm ³
Peso Específico Aparente Seco (γ_d) *	10,46 g/cm ³
Umidade (h)	59,4 %
Cisalhamento não-drenado (Su)	3 KN/m ²
Módulo de Elasticidade (E) ($E \approx 550S_u$)	1650 KN/m ²
Coefficiente de Poisson (ν)*	0,49

Tabela3: Parâmetros do duto

Parâmetros do Duto (Risers Rígido)	
Peso específico	0,261 KN/m
Diâmetro externo do duto	12 cm
Espessura do duto	3 cm
Módulo de Elasticidade do Aço (E)	2,1E+08 KN/m ²
Área	49,45 cm ²
Momento de Inércia (I)	695 cm ⁴
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33

Nas figuras 6 e 7, são apresentados os campos de deslocamentos obtidos pelo programa PLAXIS, o tipo de elementos finitos utilizados foram elementos triangulares de 6 nós. Os mecanismos de ruptura definidos por estes vetores mostram que o deslocamento da tubulação é através de uma trajetória circular, similar à superfície de ruptura assumida para as soluções analíticas (figs. 4-b e 5-b).

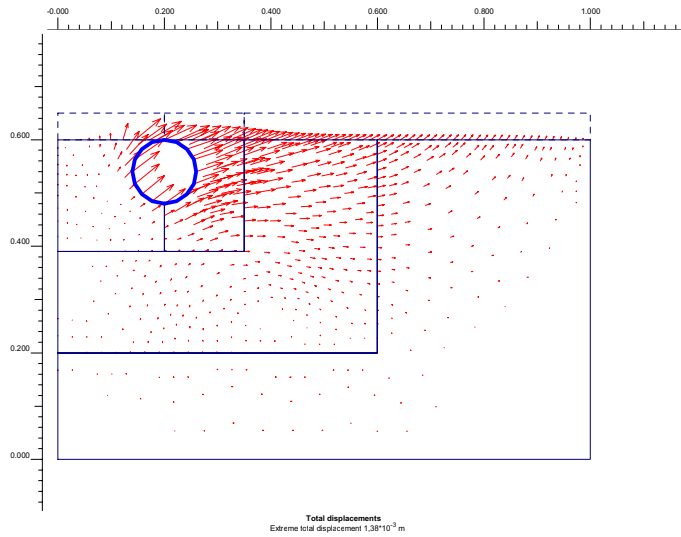


Figura 6 – Campo de deslocamentos obtido pelo programa PLAXIS (100%D).

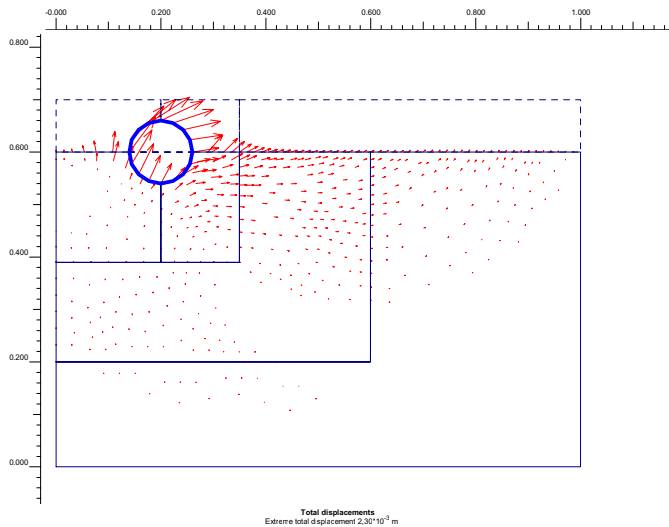


Figura 07 – Campo de deslocamentos obtido pelo programa PLAXIS (50%D).

As figuras 8 e 9 mostram em resumo os resultados preliminares obtidos. Nestas figuras são apresentadas as curvas carga x deslocamento obtidas tanto experimentalmente, analiticamente e numericamente, para as duas profundidades de embutimento da tubulação de transporte de gás/óleo. Estas tubulações são utilizadas pela Petrobrás em explorações em águas profundas. Nas simulações numéricas feitas pelo programa PLAXIS, para a obtenção das curvas mostradas nas figuras 8 e 9, não foi necessária a utilização da ferramenta de interface entre o solo e a tubulação. Foi também verificado que quando foi ativado esta ferramenta (interfaces), com parâmetros reduzidos apresentam curvas (carga x deslocamento) irregulares e a carga de ruptura diminui.

Dos resultados analíticos e numéricos nos casos estudados, pode-se afirmar, que a ruptura ocorre pelo material argiloso e não na interface solo-tubulação.

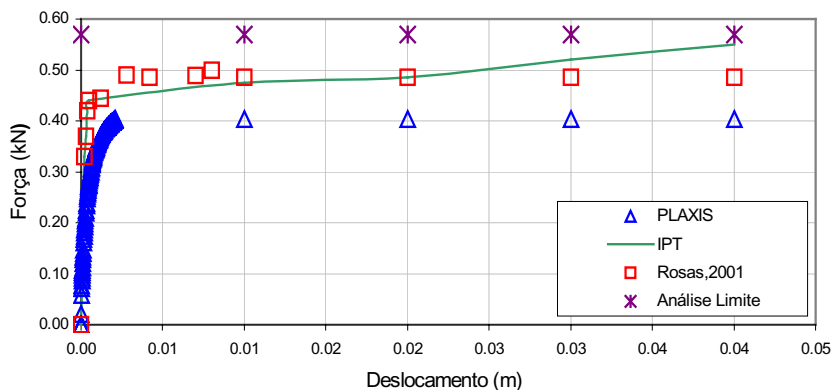


Figura 08 - Análise com 50%D da tubulação enterrada

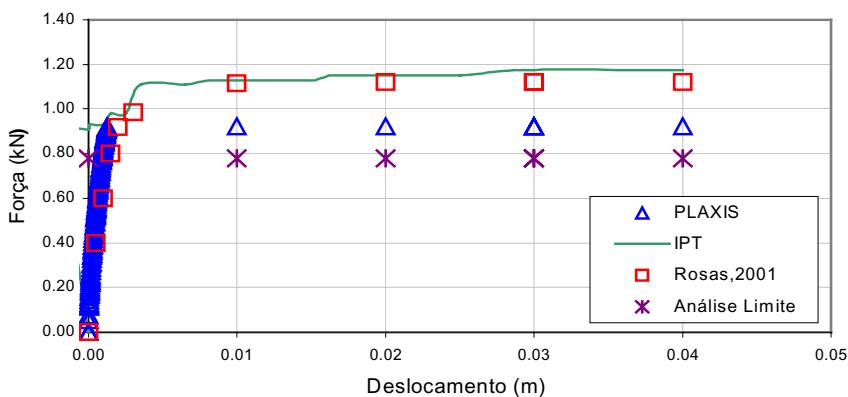


Figura 09 -Análise com 100%D da tubulação enterrada

5. REFERÊNCIAS

- [1] M.M.C. Rosas, “Um estudo numérico e experimental para avaliação da interação solo-duto”, Dissertação M.Sc., PUC-RIO, (2001).
- [2] W.D.L Finn, “Applications of limit Plasticity in soil mechanics”, *Jornal of the Soil mechanics and foundations division*, September, 1967, pp.101-120.
- [3] W.F. Chen and X.L. Liu, “Limit analysis in soil mechanics”, American Elsevier Publishing Company, New York, Vol.52, 1990.
- [4] L. Araújo, “Estudo numérico de problemas de estabilidade em materiais geotécnicos através da análise limite”, Tese PhD.,PUC-RIO, (1997).
- [5] A.F. Durand, “Aplicação da análise limite a problemas geotécnicos modelados como meios contínuos convencionais e meios de Cosserat”, Tese PhD., PUC-RIO, (2000).
- [6] B. Joshi, D.B. Durkee, T.J. Wythes, “Finite element modeling of a PE pipe heap leachate collection system”, *Finite Elements in analysis and design* 37 (2001), 979-996.
- [7] R.B.J. Brinkgreve and P.A. Vermeer, “Finite element code for soil and rock analyses, Version 07, A.A. Balkema, Rotterdam, 1998.