

Avaliação das deformações verticais de um tubo metálico enterrado submetido ao carregamento de um veículo

Rafaela Machado de Angelo

Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, r123_5@hotmail.com

Edmundo Rogério Esquivel

Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, esquivel@sc.usp.br

RESUMO: Programas computacionais geotécnicos utilizando métodos numéricos se apresentam como uma ferramenta para a boa previsão das deformações em tubos enterrados quando bem empregados. Este trabalho apresenta um estudo sobre a variação da deformação vertical de tubos enterrados submetidos ao carregamento de um veículo. Foram realizadas análises numéricas utilizando o método de elementos finitos considerando 630 modelos, obtidos da variação das características do solo (módulo de elasticidade), do tubo (espessura de parede) e da altura da camada de recobrimento do solo. O programa utilizado nas análises numéricas foi o SIGMA/W do pacote Geostudio. Os resultados encontrados apontam que as maiores deformações no tubo ocorrem devido ao carregamento veicular quando este se localiza exatamente acima do tubo. Observou-se que o aumento da espessura da camada de solo que recobre a tubulação causa uma diminuição de 26% a 50% das deformações no tubo. Foram desenvolvidas equações para o cálculo das deformações para os casos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação vertical, tubos enterrados, modelagem numérica, carregamento móvel.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de tubulações enterradas utilizadas para transporte de fluidos serem empregadas pelos homens desde a antiguidade, foi no século passado que uma expressão para o cálculo do carregamento geostático sobre um tubo enterrado e expressões para o cálculo das deflexões horizontais e verticais de uma tubulação flexível foram publicadas, sendo elas as equações de Marston e de Spangler (Moser e Folkman, 2008). Tais trabalhos se tornaram a base para previsão do comportamento de tubos enterrados. Entretanto, os resultados dessas equações mostraram-se conservadores quando comparados com valores medidos em campo, para situações que não se enquadram nas condições adotadas no desenvolvimento de tais formulações.

Ferreira *et al.* (2006) e Gerscovich *et al.* (2008) compararam a previsão do carregamento vertical sobre o tubo obtidos através da equação de Marston, do uso de modelagem numérica e o peso da camada de solo sobre o tubo. A equação analítica e a modelagem numérica resultaram sempre em valores inferiores ao peso da camada de solo, como esperado, já que é usual a atuação do arqueamento no solo circundante a um tubo instalado em vala. Ambos os trabalhos mostraram também que os resultados obtidos pela equação analítica são mais conservadores que os obtidos pela modelagem numérica. Para os autores, o mecanismo de distribuição do carregamento no sistema solo-tubo é mais complexo do que o imaginado por Marston e enquanto a equação analítica foi desenvolvida considerando a teoria de Rankine para solo na condição ativa e o critério de Mohr-Coulomb para a avaliação do

cisalhamento, a simulação numérica calcula tensões e deformações que satisfaçam as equações de equilíbrio e de compatibilidade.

A aplicação do carregamento de um veículo sobre uma tubulação enterrada figura dentre as situações que não se enquadram nas condições adotadas pelas equações analíticas. Arockiasamy *et al.* (2006) mediram em campo as deflexões de um tubo flexível plástico submetido a um carregamento móvel. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos por programas computacionais e por equações analíticas. Os valores calculados pelos programas foram os mais próximos dos valores medidos.

No presente trabalho, desenvolvido por Machado de Angelo (2016), as deformações verticais de tubos metálicos submetidos ao carregamento de um veículo pesado foram calculadas com auxílio do módulo SIGMA\W do pacote de programas Geostudio 2007. Foram avaliados 630 modelos que consideraram a variação de propriedades relativas ao solo, ao tubo e à geometria de instalação. Com os resultados obtidos foram ajustadas equações para o cálculo de deformações verticais em tubos sob as mesmas condições consideradas no estudo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para compor os modelos a serem estudados foram adotados parâmetros relativos a um tubo metálico API 5L (módulo de elasticidade de 2×10^5 MPa), com 508 mm de diâmetro e 15 diferentes espessuras (8, 9.5, 11.1, 12.7, 14.3, 15.9, 17.5, 19.1, 20.6, 22.2, 25.4, 26.5, 30, 31 e 36.5 mm). Os tubos foram modelados com elementos de viga.

Foram considerados dois solos não coesivos distintos, sendo uma areia fluvial e uma areia selecionada e ensaiada por Costa (2005). O peso específico, os parâmetros de resistência e deformação das duas areias são apresentados na Tabela 1. Para representar condições intermediárias foram adotados os módulos de elasticidade de 10167, 12000, 24000 e 26000 kPa.

Foram consideradas 14 combinações das características de solo, mostradas na Tabela 2. As combinações se referem a diferentes condições de solo de base (solo sobre o qual o tubo está apoiado) e solo de aterro (solo que envolve o tubo), como mostrado na Figura 1.

As etapas de instalação do tubo e compactação das camadas de solo foram consideradas nos modelos. A altura de cada camada era de 0.25 m. Foram consideradas 3 alturas de recobrimento de solo sobre o tubo: 0.5 m, 0.75 m e 1.0 m.

Tabela 1 – Características das areias utilizadas.

Condição	Parâmetros	Areia Fluvial	Costa (2005)
Areia Compacta	ρ_{smax} (g/cm ³)	1.65	1.85
	c (kPa)	0	0
	ϕ_{pico} (°)	43	48.05
	E_{max} (kPa)	22647	29238
	ν	0.3	0.3
Areia Fofa	ρ_{smin} (g/cm ³)	1.46	1.63
	c (kPa)	0	0
	ϕ_{pico} (°)	31	36.6
	E_{min} (kPa)	4276	14217
	ν	0.4	0.4

Para representar o carregamento móvel foi aplicado um carregamento estático de 700 kPa em uma área de 0.2 m x 1.0 m, em 5 posições diferentes, simulando a aproximação do veículo ao tubo. As posições foram medidas a partir do centro do tubo, sendo elas, $0d$ (sobre o tubo), $1d$, $2d$, $3d$ e $4d$, onde d é o diâmetro do tubo. Foi considerado que cada um dos 5 carregamentos atuava independentemente uns dos outros, ou seja, não atuavam simultaneamente (Figura 1).

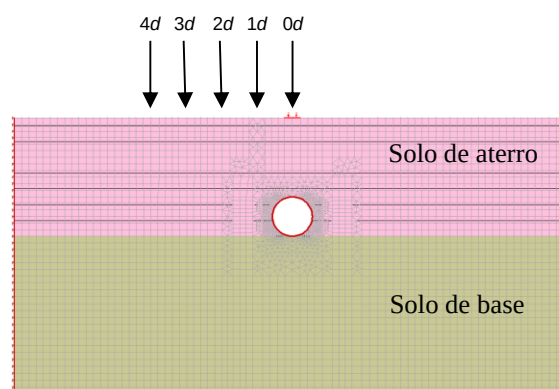


Figura 1 – Esquema geral do modelo, mostrando o tubo, o solo natural e o aterro, além das cinco posições do carregamento móvel.

Tabela 2 - Parâmetros de resistência e deformação do solo de aterro e solo natural para cada um dos modelos.

Modelo	E_{sa} (kPa)	c_a (kPa)	ϕ_a (°)	γ_a (kN/m ³)	ν_a	E_{sb} (kPa)	c_b (kPa)	ϕ_b (°)	γ_b (kN/m ³)	ν_b
E1 - C1	4276	0	31	14.2	0.4	22647	0	43	16.4	0.3
E1 - C2	4276	0	31	14.2	0.4	6000	0	31	14.2	0.4
E2 - C1	6000	0	31	14.2	0.4	22647	0	43	16.4	0.3
E2 - C2	6000	0	31	14.2	0.4	6000	0	31	14.2	0.4
E3	10167	0	43	16.4	0.3	10167	0	43	16.4	0.3
E4	12000	0	43	16.4	0.3	12000	0	43	16.4	0.3
E5 - C1	14217	0	36.6	16.3	0.4	22647	0	43	16.4	0.3
E5 - C2	14217	0	36.6	16.3	0.4	29238	0	48	18.5	0.3
E5 - C3	14217	0	36.6	16.3	0.4	6000	0	31	14.2	0.4
E6 - C1	22647	0	43	16.4	0.3	22647	0	43	16.4	0.3
E6 - C2	22647	0	43	16.4	0.3	6000	0	31	14.2	0.4
E7	24000	0	43	16.4	0.3	22647	0	43	16.4	0.3
E8	26000	0	43	16.4	0.3	22647	0	43	16.4	0.3
E9	29237	0	43	16.4	0.3	22647	0	43	16.4	0.3

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Observou-se que as posições de carregamento 1 a 3 causaram deslocamentos horizontais no tubo. A partir da posição de carregamento 4 é que se desenvolvem deflexões verticais no tubo, sendo a ocorrência da deflexão máxima quando o carregamento está exatamente sobre o tubo (posição 5). Com as deflexões fornecidas (Δy) pelo programa foi possível calcular a deformação vertical do tubo (ε_v) através da Equação 1, sendo d o diâmetro do tubo.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta y}{d} \quad (1)$$

A Figura 2 mostra as deformações verticais dos modelos para as combinações de solo E1-C1, E2-C1, E5-C1, E6-C1, E7, E8 e E9, que possuem o mesmo módulo de elasticidade da base (E_{sb}). As deformações foram plotadas em relação ao módulo de elasticidade do solo de aterro (E_{sa}) e espessura da parede do tubo (e).

Massada (2000) observou que a deformação vertical de um tubo flexível decresce não linearmente com o aumento da rigidez do solo, expressa através do módulo de reação do solo E' . O mesmo comportamento foi encontrado para os modelos de menor espessura. Entretanto, com o aumento da rigidez do tubo, indiretamente representada pela espessura da parede, a curva deixa de ser não-linear e passa para uma reta, chegando a ser constante para tubos rígidos.

O decréscimo da deformação vertical com o aumento da rigidez do solo está diretamente ligado à importância e necessidade de se realizar a compactação adequada do solo que envolve o tubo, principalmente para tubos flexíveis: a compactação do solo aumenta sua rigidez (elevação de E_{sa}); Com a aplicação do carregamento, parte se dissipa na camada de solo, não atingindo o tubo. Quanto mais compactado o solo, mais rígido e menor a parcela do carregamento que atinge o tubo, provocando menores deformações.

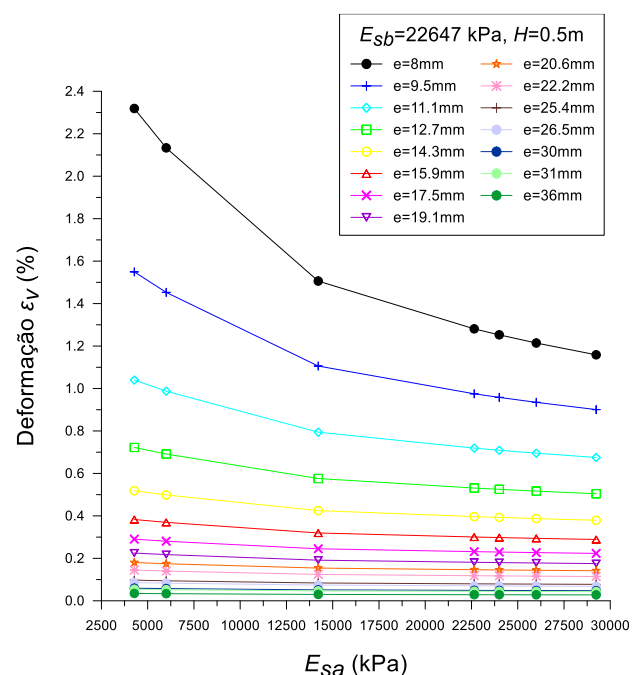


Figura 2 – Deformações verticais máximas em função do módulo de elasticidade do aterro.

A Figura 3 mostra as deformações verticais dos modelos E1-C1 em relação à espessura do tubo. A deformação vertical não varia linearmente com a espessura do tubo, também observada por Massada (2000). Nota-se também que as deformações verticais são menores quanto maior a camada de solo que recobre o tubo e que quanto mais espessa a parede da tubulação.

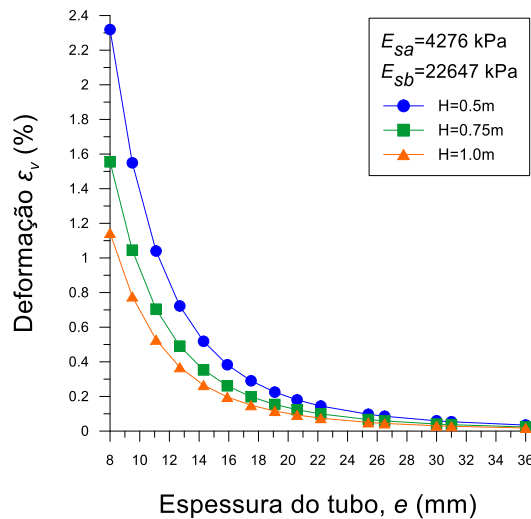


Figura 3 – Deformação vertical dos modelos E1 C1.

Comparando-se as deformações verticais considerando o aumento da camada de recobrimento de solo sobre o tubo, de 0.5 m para 0.75 m, as deformações verticais do tubo são reduzidas em 33%. O aumento dessa altura de 0.75 m para 1.0 m e de 0.5 m para 1.0 m, as

reduções das deformações verticais do tubo são de 26% e 50%, respectivamente. O aumento da camada de solo sobre o tubo faz com que a superfície em que o carregamento é aplicado esteja mais distante da tubulação, diminuindo a parcela do carregamento que atinge o tubo.

Apesar da deformação vertical não variar linearmente com o aumento da espessura do tubo, viu-se a possibilidade de ajustar equações que relacionassem a deformação vertical do tubo com a espessura da parede do tubo, altura da camada de recobrimento de solo e combinação de solos de base e aterro. As equações ajustadas são válidas para o cálculo das deformações verticais máximas em um tubo com 0.508 m de diâmetro, submetido a um carregamento móvel de 700 kPa, atuando em uma área de 0.2 m x 1.0 m.

Essas equações são representadas da seguinte forma:

$$\varepsilon_v(\%) = a + b \times e^c \quad (2)$$

onde

ε_v = deformação vertical do tubo

a, b, c = parâmetros (Tabela 3)

e = espessura do tubo

Tabela 3 – Valores dos parâmetros a, b e c que compõem a expressão que fornece as deformações

Modelo	E_{sa} (kPa)	E_{sb} (kPa)	a	b	c
E1 - C1	4276	22647	$a = \frac{1}{-49.813 + 13.393 / H}$	$b = 1000.35 \times \exp\left(\frac{-H}{0.5391}\right)$	-2.412
E1 - C2	4276	6000	$a = \frac{1}{-110.454 + 29.723 / H}$	$b = 1337.826 \times \exp\left(\frac{-H}{0.7479}\right)$	-2.708
E2 - C1	6000	22647	$a = \frac{1}{-46.907 + 13.442 / H}$	$b = 677.317 \times \exp\left(\frac{-H}{0.607}\right)$	-2.335
E2 - C2	6000	6000	$a = \frac{1}{-93.167 + 25.037 / H}$	$b = 1071.722 \times \exp\left(\frac{-H}{0.793}\right)$	-2.653
E3	10167	10167	$a = \frac{1}{-47.281 + 13.789 / H}$	$b = 349.307 \times \exp\left(\frac{-H}{1.2395}\right)$	-2.345
E4	12000	12000	$a = \frac{1}{-42.153 + 12.114 / H}$	$b = 275.149 \times \exp\left(\frac{-H}{1.214}\right)$	-2.251
E5 - C1	14217	22647	$a = \frac{1}{-29.153 + 8.143 / H}$	$b = 192.3694 \times \exp\left(\frac{-H}{0.7451}\right)$	-1.966

Tabela 3 – Valores dos parâmetros a , b e c que compõem a expressão que fornece as deformações (Continuação)

Modelo	E_{sa} (kPa)	E_{sb} (kPa)	a	b	c
E5 - C2	14217	29238	$a = \frac{1}{-25.808 + 7.139 / H}$	$b = 161.971 \times \exp\left(\frac{-H}{0.671}\right)$	-1.857
E5 - C3	14217	6000	$a = \frac{1}{-37.821 + 6.754 / H}$	$b = 437.9795 \times \exp\left(\frac{-H}{1.003}\right)$	-2.397
E6 - C1	22647	22647	$a = \frac{1}{-22.686 + 6.103 / H}$	$b = 93.654 \times \exp\left(\frac{-H}{1.022}\right)$	-1.793
E6 - C2	22647	6000	$a = \frac{1}{-38.205 + 9.333 / H}$	$b = 281.032 \times \exp\left(\frac{-H}{1.093}\right)$	-2.250
E7	24000	22647	$a = \frac{1}{-22.333 + 6.003 / H}$	$b = 90.183 \times \exp\left(\frac{-H}{0.994}\right)$	-1.774
E8	26000	22647	$a = \frac{1}{-21.039 + 5.452 / H}$	$b = 81.126 \times \exp\left(\frac{-H}{0.996}\right)$	-1.736
E9	29238	22647	$a = \frac{1}{-19.582 + 4.923 / H}$	$b = 70.8965 \times \exp\left(\frac{-H}{0.986}\right)$	-1.683

4 CONCLUSÕES

O emprego do método de elementos finitos em programas computacionais geotécnicos tem permitido modelar com facilidade problemas com tubos enterrados. A possibilidade da criação de modelos com diferentes geometrias de instalação e características dos solos, tubo e carregamentos aplicados tem-se mostrado vantajosa diante do elevado custo de outros tipos de modelagem.

Através da análise dos modelos considerados no presente trabalho, foi possível observar a influência da posição do carregamento móvel, combinação de solo da base e do aterro, altura da camada de solo de recobrimento sobre o tubo e espessura da parede do tubo na deformação vertical do tubo.

Os resultados encontrados foram condizentes com o esperado e ampliaram as informações já presentes na literatura a fim de entender o comportamento das deformações verticais de tubos enterrados.

As análises mostraram que uma boa compactação das camadas de solo envolvente ao tubo pode reduzir significativamente a deformação vertical que a tubulação sofreria com a passagem de um carregamento móvel.

A espessura da camada de solo sobre o

tubo também é um parâmetro influente na deformação vertical. O aumento da camada de 0.5 m para 1.0 m pode reduzir em 50% a deformação vertical.

Foram ajustadas equações para o cálculo da deformação vertical de um tubo de 0.508 m de diâmetro, espessura de parede variando entre 8 mm e 36 mm, enterrado a uma profundidade entre 0.5 m e 1.0 m, submetido ao carregamento veicular de 700 kPa atuando em uma área de 0.2 m x 1.0 m sobre o tubo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudos concedida à primeira autora. Também agradecem à Dra. Natália de Souza Correia por compartilhar suas opiniões que enriqueceram o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Arockiasamy, M.; Chaallal, O.; Limpeteeprakarn, T. (2006) *Full-Scale Field Tests on Flexible Pipes under Live Load Application*. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, Vol. 20, No. 1.

- Costa, R. S. (2005) *Um novo equipamento triaxial para ensaios de solos na condição de deformação plana*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 185 p.
- Ferreira, A. M.; Gerscovich, D. M. S.; Sieira, A. C. C. F. (2006) *Análise numérica do comportamento mecânico de dutos enterrados*. II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. (http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/Ilg_eojovem2006/2006-ferreira-sieira.pdf). Acessado dia 25/04/2016.
- Gerscovich, D. M. S.; Sieira, A. C. C. F.; Ferreira, A. M. (2008) *Numerical simulation of the mechanical behavior of buried pipes in trench*. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Machado de Angelo, R. (2016) *Análise numérica de uma tubulação enterrada submetida a carregamentos móveis*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 166 p.
- Massada, T. (2000) *Modified Iowa formula for vertical deflection of buried flexible pipe*. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 126, No.5, p. 440-446.
- Moser, A. P. e Folkman, S. (2008) *Buried pipe design*. 3th Edition. Publisher McGraw-Hill Companies. United States of America.