

Análise Numérica do Comportamento Mecânico de Dutos Enterrados

Anderson Moura Ferreira

Departamento de Engenharia Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

Denise Maria Soares Gerscovich e Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Departamento de Engenharia Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

RESUMO: O presente trabalho descreve a metodologia de dimensionamento de dutos enterrados e analisa, por meio de simulação numérica, o comportamento mecânico de dutos enterrados e a sua interação com o solo. Para tal foi realizado estudo paramétrico, objetivando comparar métodos analíticos de cálculo da carga transmitida ao duto com os valores previstos numericamente. Os resultados mostraram que previsão analítica fornece valores de carga cerca de 1,5 vezes superiores aos obtidos numericamente para dutos de 40cm de diâmetro. Os resultados são preliminares e servem para avaliar o grau de simplificação dos métodos analíticos.

PALAVRAS-CHAVE: Dutos, modelagem numérica, método dos elementos finitos

1 INTRODUÇÃO

As enchentes urbanas representam um problema crônico no Brasil e de grande impacto na sociedade. O processo de urbanização acelerada ocorrido após a década de 60, gerou, em varias cidades brasileiras, populações urbanas com infra-estrutura deficitária. Grande parte da microdrenagem urbana consiste na drenagem da área envolvida através de dutos pluviais enterrados (Tucci et al, 1995).

A pratica de projeto e execução da microdrenagem urbana da cidade do Rio de Janeiro consiste no assentamento do conduto em uma trincheira, com caimentos que possam proporcionar a passagem do fluído e reaterro da vala com material adequado e devidamente compactado. Muitas vezes, os dutos são instalados sob vias submetidas a grandes variações de carregamentos e para não permitir que tais esforços prejudiquem a resistência do duto, recobrimentos mínimos de reaterro são predeterminados. Quando não é possível executar o recobrimento mínimo, faz-se necessária a construção de um suporte de concreto, na superfície do terreno. Como conseqüência, há um substancial aumento no custo do projeto o que pode ate inviabilizar a

obra.

Atualmente, com o uso de gás e petróleo em larga escala no país, tem-se ampliado a necessidade de instalação de dutos para transporte e distribuição dessas fontes energéticas.

Este trabalho apresenta resultados preliminares de um projeto pesquisa que se encontra em andamento. Este projeto tem como objetivo avaliar, por meio de estudos numéricos, o comportamento mecânico de dutos enterrados e a interação solo-duto, considerando a influência de parâmetros geométricos e mecânicos do solo e do duto. Espera-se, com isso, sugerir novas alternativas para concepção de projetos e metodologias construtivas.

Os resultados aqui apresentados referem-se exclusivamente a condutos rígidos, instalados em trincheiras, sem ação de cargas externas.

2 DIMENSIONAMENTO DE DUTOS

Os primeiros estudos sobre a definição dos esforços atuantes em dutos enterrados datam de 1910 e foram realizados por Marston e por seus sucessores, no Iowa Engineering Experimental Station. Desde então verificou-se que o

comportamento mecânico do conjunto solo-duto depende do método construtivo e da rigidez do elemento estrutural (Spangler, 1948).

Quanto ao método construtivo, os dutos podem ser posicionados no interior de trincheiras ou apoiados sobre o terreno natural e posteriormente embutidos sob aterro (conduto saliente). Quando posicionados em trincheiras existe uma redução das tensões verticais transmitidas ao duto, devido ao atrito mobilizado nas paredes da escavação (efeito de arqueamento). Situação diferente ou mesmo inversa ocorre quando este é coberto por aterro. (Tchebotarioff, 1978)

O contraste entre a rigidez do duto e a do solo circundante também tem influencia no comportamento do conjunto, já que este interfere no mecanismo de redistribuição de tensões gerado pelo efeito de arqueamento.

Face a expansão significativa de obras envolvendo a instalação de dutos, as técnicas construtivas têm sido aperfeiçoadas com intuito de obter redução dos esforços transmitidos ao duto. Dentre estas citam-se a introdução, no solo, de tiras metálicas ou geossintéticos (Viana e Bueno, 1998; Plácido, 2006)

Considerando um tubo circular, posicionado no interior de uma trincheira, preenchida com solo não coesivo (Figura 1), Marston e sucessores calcularam o esforço vertical atuante sobre o duto a partir da equação:

$$P = \gamma b^2 C_d \quad (1)$$

onde γ é o peso específico do reaterro, b a largura da vala, C_d um parâmetro definido por

$$C_d = \frac{1 - e^{-\alpha h}}{2K_a \tan \delta} \quad (2)$$

onde K_a é o coeficiente de empuxo ativo, δ o ângulo de atrito entre a parede e a trincheira e α um coeficiente definido por

$$\alpha = \frac{2K_a \tan \delta}{b} \quad (3)$$

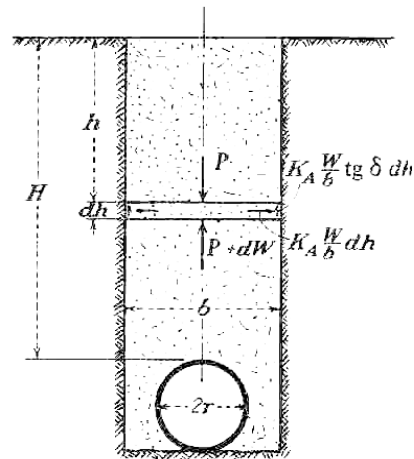


Figura 1. Modelo de Marston

O modelo de Marston resulta em cargas no duto pouco sensíveis a variações do ângulo de atrito ϕ , sempre que $\delta = \phi$. Adicionalmente, observa-se crescimento da carga P com a profundidade de embutimento até um determinado limite H/b (Figura 2); acima deste valor o atrito nas paredes é suficiente para absorver os esforços adicionais.

Quando o duto é instalado sob aterro o comportamento mecânico é completamente diferente ou mesmo inverso.

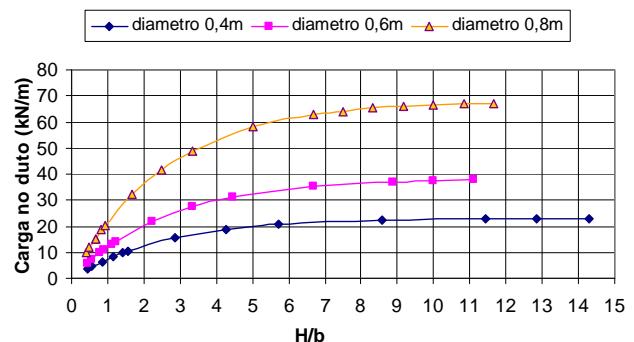


Figura 2. Variação da carga com o embutimento

3 MODELAGEM NUMÉRICA

O programa de elementos finitos, SIGMA/W (Geo-Slope International Ltd, 2002) faz parte de um pacote de programas que vem sendo cada vez mais utilizado no âmbito profissional, para análise de projetos geotécnicos.

O SIGMA/W permite a análise do comportamento das tensões e deformações de solos, desde as mais simples até análises mais complexas, em regime elásto-plástico não

linear. O SIGMA/W pode ser acoplado a outros programas do pacote Geo-Slope. Estudos de geração e dissipação de poro-pressão podem ser realizados (SEEP/W) a partir das tensões geradas no programa de análise de tensões (SIGMA/W).

O programa permite análises bidimensionais e aximétricas. Em ambos os casos podem ser adotados elementos triangulares e/ou quadrangulares, permitindo, inclusive, a inserção de nós secundários.

Dois tipos de elementos estruturais estão disponíveis: barra ou viga. A diferença entre eles está na inclusão (viga) ou não (barra) da rigidez à flexão. Elementos estruturais estão somente disponíveis em análises planas bidimensionais. Na fase de geração de tensões iniciais, estes elementos são ignorados.

O programa não possui elemento estrutural circular para representação do duto. Assim sendo o contorno do duto foi representado por uma seqüência de elementos de viga.

O programa fornece as tensões, deformações na malha e esforços nos elementos estruturais.

O programa usa a opção de executar uma etapa inicial para geração do peso próprio (“in situ”). A partir deste arquivo, as tensões e deformações induzidas pelas etapas construtivas são calculadas. Na etapa de geração das tensões iniciais são introduzidos apenas o peso específico do solo e o coeficiente de empuxo no repouso ($k_0 = 0,5$). Na fase seguinte, a partir das informações das condições iniciais, são inseridas as seguintes etapas construtivas apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Seqüência Construtiva.

Etapa	Ação
1	Escavação da vala
2	Aterro da base do duto (0,20 m)
3	Ativação dos elementos que representam o duto
4	Ativação dos elementos (solo) das laterais do duto (0,40 m)
5	Ativação dos elementos (solo) acima do duto

3.1 Geometria analisada

Os limites da malha de elementos finitos foram definidos a partir de estudo paramétrico. Foram realizadas análises variando-se a largura e a

profundidade do contorno. Os estudos consideraram distâncias de 2b, 3b e 6b, sendo b a largura da vala. Os demais parâmetros geométricos foram mantidos constantes, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros geométricos.

Localização	Valor
Largura da vala (b)	1,0m
Altura da vala (h')	0,8m
Diâmetro do Duto (\varnothing)	0,4 m
Camada de assentamento	0,1 m
Reaterro (H)	0,5 a 1,5m

Em todos os casos adotou-se a mesma seqüência construtiva, descrita na Tabela 1.

Com a definição do contorno foram avaliadas as cargas verticais no duto para profundidades de reaterro (H) de 0,50m, 0,90m, 1,20m e 1,50m.

3.2 Materiais

Para as análises foram assumidos os mesmos parâmetros tanto para o solo local quanto para o de reaterro. O comportamento tensão-deformação foi adotado como elásto-plástico.

O duto foi considerado como sendo um elemento estrutural, com rigidez axial e à flexão (viga), e comportamento elástico. A Tabela 3 resume os parâmetros adotados tanto para o solo quanto para o duto.

Tabela 3. Parâmetros geomecânicos.

Material	Parâmetro	Valor
Solo	Modulo de elasticidade (E)	3×10^3 kPa
	Coeficiente de Poisson (ν)	0,334
	Coeficiente de empuxo no repouso (k_0)	0,5
	Peso específico (γ)	20 kN/m ³
	Ângulo de atrito (ϕ)	30°
	Coesão	0
Duto	Módulo de elasticidade (E)	25×10^6 kPa
	Momento de inércia (I)	$4,05 \times 10^{-7}$ m ⁴

4 RESULTADOS

4.1 Definição do Contorno

Com base na distribuição das tensões verticais ao final das etapas construtivas, observou-se que, a partir de profundidade correspondente a 3 vezes a largura da vala (b) não ocorrem

variações significativas no valor da tensão vertical.

Adicionalmente, as deformações não sofrem alterações expressivas para o contorno lateral fixado em 3b, conforme mostra

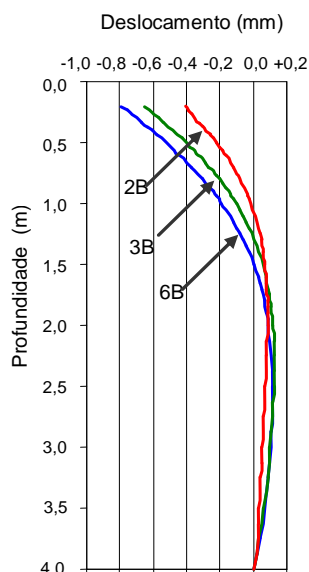


Figura 3.

Desta forma, pôde-se fixar a distância do contorno como sendo 3b tanto para as laterais quando para a profundidade, para as análises futuras. A Figura 4 mostra a malha adotada. Observa-se que na região próxima ao duto a discretização foi mais acentuada. No conjunto total da malha foram gerados 3471 nós e 1120 elementos.

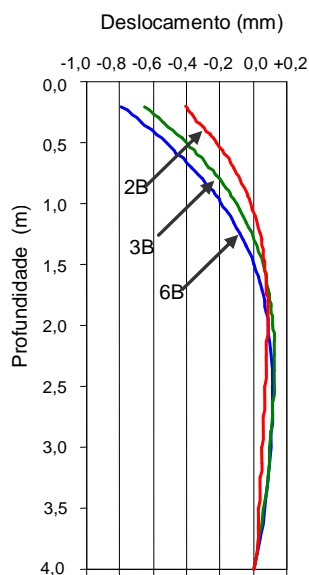


Figura 3. Variação dos deslocamentos

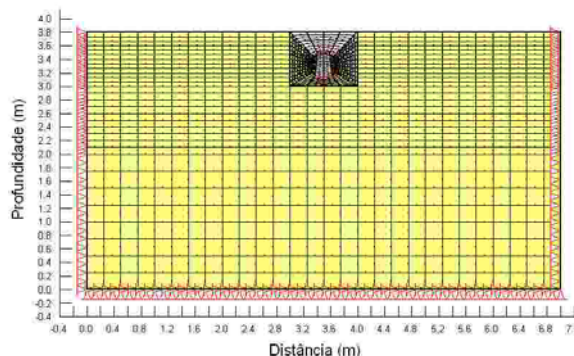


Figura 4. Malha de Elementos Finitos

4.2 Carga vertical no duto

A carga vertical atuante no topo do duto foi calculada integrando-se as tensões verticais atuantes no plano horizontal acima do duto, ao longo da largura da vala. Assim como a abordagem de Marston, assumiu-se que as tensões geradas pelo solo compactado no interior da vala, imediatamente acima do duto, são transferidas integralmente para o elemento estrutural (Figura 5).

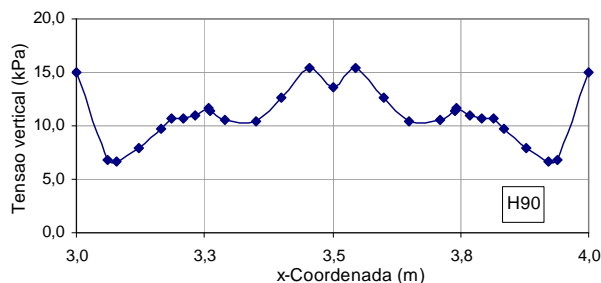


Figura 5. Distribuição de tensões verticais no topo do duto, região correspondente à largura da vala.

A Tabela 4 compara os esforços calculados segundo a equação de Marston, com os previstos na simulação numérica. Nesta tabela, estão também mostrados os valores do esforço vertical no duto, caso não houvesse redução por atrito entre o reaterro e o solo local. Neste caso, admitindo que o peso do retroaterro fosse diretamente aplicado no duto, o valor da sobrecarga poderia ser estimado por:

$$Peso(kN / m) = \gamma \times H \times b \tag{4}$$

Verifica-se, claramente, que a metodologia

proposta por Marston fornece valores inferiores aos calculados segundo hipótese simplificada. Por outro lado, os resultados observados na simulação numérica foram sempre inferiores aos de Marston (Figura 6), indicando que o mecanismo é mais complexo do que previsto originalmente.

Tabela 4. Esforços no Duto.

Reaterro (m)	Simulação Numérica (kN/m)	Equação de Marston (kN/m)	Peso (kN/m)
0,50	6,86	9,105	10,0
0,90	10,53	15,238	18,0
1,20	12,50	19,262	24,0
1,50	14,35	22,851	30,0

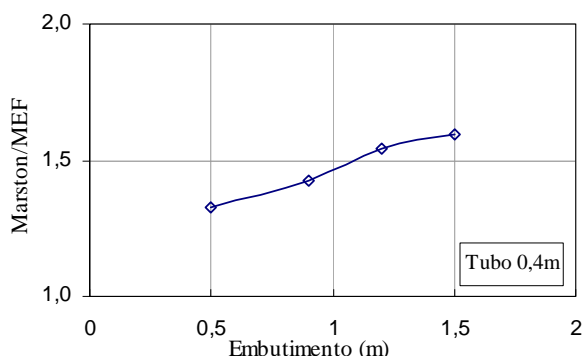


Figura 6. Comparação entre equação de Marston e MEF

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho procurou investigar a aspectos relacionados ao comportamento mecânico de dutos enterrados, por meio de análises numéricas. Foram estudadas algumas configurações de projeto, mantendo-se todos os parâmetros geotécnicos constantes. As análises consideraram diferentes profundidades de assentamento do duto.

A prática atual de dimensionamento de dutos fundamenta-se em metodologia simples de cálculo de transferência de esforços. Esta metodologia baseia-se em uma redução das tensões verticais atuantes na estrutura, em função da mobilização da resistência entre o reaterro e solo local. Os resultados aqui apresentados mostraram que a interação solo-duto é mais complexa.

Ressalta-se, por outro lado, que os resultados

devem ser considerados como preliminares. A modelagem do processo construtivo ainda pode ser melhorada através da introdução de elementos de interface, modelos mais adequados de comportamento de solo, módulos de deformabilidade compatíveis com as trajetórias de tensão (escavação e reaterro), etc.

Espera-se também, no futuro, validar a simulação numérica a partir da comparação com resultados de modelos físicos, instrumentados (Viana, 2003; Costa, Y.D.J., 2005).

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos a Fundação Rio Águas, pelo fornecimento de dados e informações, que foram primordiais para o andamento desse projeto. Agradecemos também ao Professor Luciano Rodrigues (UERJ), pelo uso do Laboratório de Computação da Engenharia Civil. Ao CNPq e UERJ somos gratos pelo apoio financeiro. Agradecemos a UENF pela disponibilização do programa SIGMA/W.

REFERÊNCIAS

- Costa, Y.D.J. (2006) Modelagem Física de Conduitos Enterrados sujeitos a Perda de Apoio ou Elevação Localizada. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 238p.
- GEO-SLOPE International Ltd (2002), Sigma/W for finite element stress and deformation analysis – *User's Guide, version 05*. Calgary, Canadá.
- Plácido, R.R (2006) Uso de Geocomposto como Camada Indutora para Redução das Tensões sobre Estrutura Enterrada. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 116p.
- Spangler, M.G. (1948) Underground Conduits: An Appraisal of Modern Research, *Trans. ASCE*, p.316-374.
- Tchebotarioff, G P (1978) *Fundações Estruturas de Arrimo e Obras de Terra*. Ed Mc Graw-Hill do Brasil
- Tucci, C.E.M.; Porto, R.L. e Barros, M.T. (1995) – *Drenagem Urbana* – ABRH/Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 428p.
- Viana, P.M.F. (2003) Geovalva: um Processo Construtivo para Dutos Enterrados. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 238p.
- Viana, P.M.F. e Bueno, B S (1998) Conduitos Enterrados: minimização de Esforços sobre a Estrutura. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e

