



## Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

---

# ESTUDOS PARAMÉTRICOS DO ARQUEAMENTO NO ESTADO DE TENSÕES EM DUTOS ENTERRADOS

Arnaldo dos Santos Junior<sup>1</sup>, Diogo Tenório Cintra<sup>2</sup>, Eduardo Nobre Lages<sup>3</sup>, Viviane Carrilho Leão Ramos<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Alagoas, Cidade Universitária – Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57.072-970 – Maceió – Alagoas, email: arnaldo@ctec.ufal.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Alagoas, Cidade Universitária – Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57.072-970 – Maceió – Alagoas, email: dtc@ctec.ufal.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Alagoas, Cidade Universitária – Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57.072-970 – Maceió – Alagoas, email: enl@ctec.ufal.br

<sup>4</sup> Universidade Federal de Alagoas, Cidade Universitária – Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57.072-970 – Maceió – Alagoas, email: vramos@ctec.ufal.br

**Resumo** – O uso de estruturas enterradas vem crescendo bastante nos últimos anos. Isto se deve, em grande parte, à necessidade de transporte de produtos, tais como gás natural e petróleo, e de serviços, tais como os oferecidos pelas redes de fibra-ótica. As vantagens de utilização desse tipo de estrutura, como os menores custos e as facilidades de instalação, motivam ainda mais este crescimento. Este trabalho apresenta análises paramétricas, baseadas em soluções teóricas e numéricas, para o estudo de dutos enterrados em valas, de maneira a oferecer subsídios no processo de dimensionamento dessas estruturas. São realizadas análises que permitem identificar a influência de alterações de parâmetros geométricos, físicos e mecânicos, no estado de tensões do sistema solo-duto.

**Palavras-Chave:** Dutos enterrados; Arqueamento; Análise numérica; Sistema solo-duto.

**Abstract** – The use of buried structures is growing enough in the last years. This is due, largely, to the need of transport of products, such as natural gas and petroleum, and of services, such as offered them by the fiber-optics nets. The advantages of use of that structure type, as the smallest costs and the installation facility, still motivate more the growth. This work presents parametric analyses, based on theoretical and numeric solutions, for buried pipes study under ditch condition, to offer subsidies in measurement process of those structures. Analyses are developed to identify the influence of alterations in geometric, physical and mechanical parameters, in the tension state of duct-soil system.

**Keywords:** Buried Pipes; Arching; Numerical analysis; Duct-soil system.

## 1. Introdução

O estudo de estruturas enterradas é algo que vem sendo bastante focado na atualidade. O crescimento da demanda por gás natural encanado, das malhas de transmissão de petróleo, e mais recentemente, das linhas de transmissão de fibras óticas, reflete a necessidade da obtenção de ferramentas que embasem todo o processo de dimensionamento deste tipo de estrutura. Estas fornecem subsídios para a obtenção de segurança de utilização, aperfeiçoamento de técnicas construtivas existentes, reduções de custos com materiais, dentre outros.

Um dos fenômenos bastante comuns no estudo de dutos enterrados é o arqueamento. Este é responsável por mudança nas respostas estruturais em meios onde haja um preenchimento de um espaço vazio por um determinado material com características distintas do material que o limita. Isto pode ser observado na construção de valas para o alojamento de estruturas enterradas, tais como dutos. Algumas soluções analíticas disponíveis na literatura permitem avaliar este fenômeno a partir de propriedades físicas e mecânicas do meio estudado. McKelvey (1994) cita Handy (1985), no estudo de algumas variáveis envolvidas no estado de tensões decorrentes do fenômeno de arqueamento em valas. No entanto, elas são bastante restritivas devido à complexidade envolvida na determinação analítica da solução estrutural. Tais soluções não permitem, por exemplo, a análise de tensões em uma vala onde um duto esteja presente. Uma alternativa para tanto é a utilização de métodos numéricos para a obtenção de respostas aproximadas que possam ser úteis no estudo dessas estruturas. Conforme recomendações de Cook (1989).

Neste trabalho, algumas soluções teóricas, e aplicações numéricas baseadas no método dos elementos finitos, são apresentadas com o intuito de contribuir com o estudo do arqueamento do solo em valas.

## 2. Arqueamento

Quando uma determinada porção do solo é retirada de uma região para que a vala formada sirva de berço para uma estrutura enterrada qualquer, e que depois da instalação da estrutura a mesma vala seja preenchida novamente, obtém-se, então, um sistema diferente do original. A massa de solo, anteriormente constituinte de apenas uma massa homogênea, passa a constituir duas massas de solo diferentes. Isto se deve ao fato de que, por razões construtivas ou outras, o solo passa a apresentar propriedades diferentes do seu estado original, como por exemplo, a sua compactidade. O sistema obtido então fica exposto ao fenômeno do arqueamento, que implicará de maneira direta no estado de tensões do sistema solo-estrutura, decorrentes do peso próprio da camada de solo de recobrimento e tensões atuantes na superfície da vala. Algumas soluções teóricas e numéricas permitem a avaliação do estado de tensões neste sistema. Estas são importantes, uma vez que são úteis no processo de dimensionamento de valas para berço de dutos enterrados, permitindo avaliar alguns aspectos envolvidos no estudo, tais com aspectos geométricos e mecânicos. A seguir, são apresentadas algumas destas soluções.

### 2.1. Solução Teórica

Branchman *et al.* (2000) apresenta uma solução para a determinação de tensões atuantes no interior de uma vala. Sua formulação baseia-se na adaptação das equações de Terzaghi (1943) de modo que se represente o efeito tridimensional do arqueamento na redução dos esforços atuantes em um determinado ponto situado a uma distância  $z$  da superfície superior da vala. A influência do atrito lateral e de forças coesivas em uma vala de largura  $B$  e comprimento  $L$ , preenchida com um material de peso específico  $g$ , sujeita ou não a carregamentos externos, conforme ilustrado na Figura 1, pode ser quantificada através da expressão da tensão vertical, dada por

$$s_v = \frac{(g - 2c.w)}{2Km.w} (1 - e^{-2Km.w.z}) + q.e^{-2Km.w.z} \quad (1)$$

onde

|       |                                                     |                                 |
|-------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|
| $s_v$ | Tensão vertical (kN/m <sup>2</sup> )                |                                 |
| $w$   | Coefficiente geométrico (1/m)                       | $w = \frac{1}{B} + \frac{1}{L}$ |
| $B$   | Largura da vala (m)                                 |                                 |
| $L$   | Comprimento da vala (m)                             |                                 |
| $g$   | Peso específico do solo (kN/m <sup>3</sup> )        |                                 |
| $K$   | Coefficiente de empuxo                              |                                 |
| $c$   | Coesão (kN/m <sup>2</sup> )                         |                                 |
| $m$   | Coefficiente de atrito da parede lateral = $\tan f$ |                                 |
| $f$   | Ângulo de atrito das paredes laterais (graus)       |                                 |
| $z$   | Profundidade (m)                                    |                                 |
| $q$   | Carregamento na superfície (kN/m <sup>2</sup> )     |                                 |

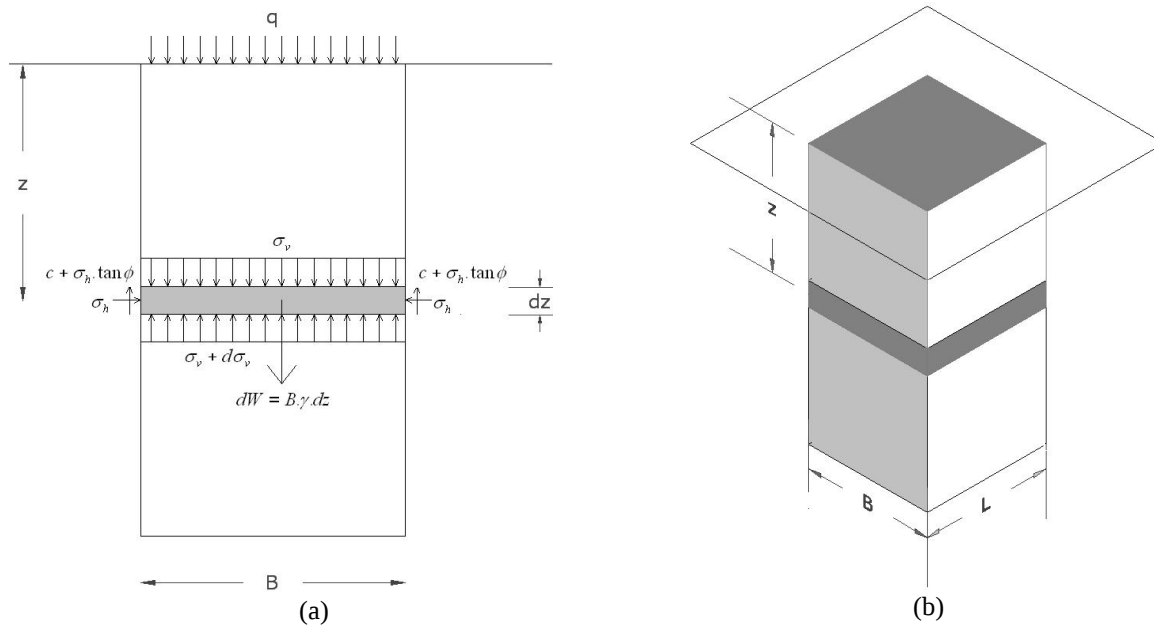


Figura 1. Representação dos modelos de arqueamento (a) bidimensional de Terzaghi e (b) tridimensional de Branchman.

Tem-se, da teoria da elasticidade, que o coeficiente de empuxo  $K$  pode ser expresso como função do coeficiente de Poisson ( $n$ ) na forma

$$K = \frac{n}{1-n} \quad (2)$$

A Tabela 1 permite avaliar a influência de alguns parâmetros físicos e geométricos envolvidos no estado de tensões de um ponto A, situado a uma distância de 80 cm da superfície superior de uma vala ( $L = \infty$ ), preenchida com um solo de peso específico  $18 \text{ kN/m}^3$ , onde está sendo aplicada uma carga ( $q$ ) de  $1000 \text{ kPa}$ . Observa-se que a redução das tensões atuantes no ponto A é maior quanto menor for a largura da vala, quanto maior for o coeficiente de Poisson do solo, e quanto maior o valor de atrito lateral com as paredes laterais.

Tabela 1. Tensões verticais no ponto A para alguns casos específicos (Valores em kPa).

|                |           | $B = 0,5 \text{ m}$ | $B = 1 \text{ m}$ | $B = 2,5 \text{ m}$ |
|----------------|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|
| $f = 10^\circ$ | $n = 0,2$ | 765,76              | 881,72            | 959,12              |
|                | $n = 0,3$ | 626,76              | 797,79            | 921,51              |
|                | $n = 0,4$ | 480,23              | 698,23            | 873,65              |
| $f = 20^\circ$ | $n = 0,2$ | 568,30              | 759,65            | 903,63              |
|                | $n = 0,3$ | 376,67              | 618,10            | 832,03              |
|                | $n = 0,4$ | 218,57              | 469,75            | 745,35              |
| $f = 40^\circ$ | $n = 0,2$ | 268,52              | 521,25            | 777,11              |
|                | $n = 0,3$ | 105,92              | 324,75            | 642,58              |
|                | $n = 0,4$ | 32,18               | 173,60            | 498,92              |

## 2.1. Solução Numérica

A partir da Equação 1, observa-se que embora se possa avaliar a influência de diversos parâmetros no estado de tensões verticais de uma vala, essa não permite avaliar o comportamento estrutural da mesma quando um duto se encontra presente neste meio. Para tanto, é comum recorrer-se a métodos numéricos, tais como o método dos elementos finitos, para o estudo destes casos. As análises seguintes são realizadas no sistema Tectos, desenvolvido pelo grupo Tecgraf da PUC-Rio. Tal sistema permite a utilização de elementos de interface necessários para o estudo numérico do arqueamento.

Nas análises foram utilizadas malhas de elementos triangulares lineares (Cook *et al.*, 1989), para a discretização do solo, do duto e da fronteira rígida, requerida para a implementação dos elementos de interface.

Utilizou-se o modelo de Mohr-Coulomb para a modelagem do solo. Para os demais materiais adotou-se um material isotrópico. A Figura 2 ilustra o modelo numérico aqui empregado para o estudo do sistema solo-duto, bem como informa as linhas onde são geradas as informações dos gráficos seguintes. Os valores de tensões apresentados nos gráficos são normalizados pelo valor de tensão uniforme atuante na superfície da vala (400 kPa).

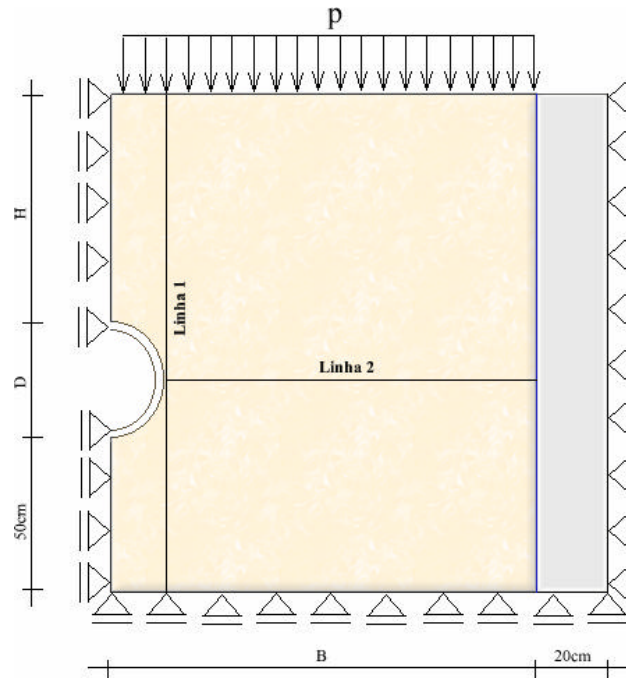


Figura 2. Representação do modelo numérico.

A Tabela 2 resume alguns parâmetros utilizados nas análises, onde  $E$  é módulo de Young,  $n$  é o coeficiente de Poisson,  $g$  é peso específico,  $j$  o ângulo de atrito,  $c$  é a coesão,  $KN$  é o parâmetro de rigidez normal do elemento de interface e  $KT$  o parâmetro de rigidez tangencial do mesmo.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas análises numéricas.

| <i>Duto</i>                 | <i>Solo</i>                  | <i>Região Rígida</i>         | <i>Interfaces</i>            |                              |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                             |                              |                              | <i>Solo-Região Rígida</i>    | <i>Solo-Duto</i>             |
| $E = 3,2 \text{ GPa}$       | $E = 80 \text{ MPa}$         | $E = 500 \text{ GPa}$        | $KN = 500 \text{ GPa}$       | $KN = 3,2 \text{ GPa}$       |
| $n = 0,4$                   | $\nu = 0,25$                 | $n = 0,4$                    | $KT = 80 \text{ MPa}$        | $KT = 80 \text{ MPa}$        |
|                             | $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ |                              | $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ | $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ |
| $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ | $\phi = 40^\circ$            | $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ | $\phi = 20^\circ$            | $\phi = 20^\circ$            |
|                             | $c = 0$                      |                              | $c = 0$                      | $c = 0$                      |

O efeito do ângulo de atrito com as paredes laterais da vala é mostrado na Figura 3. São informados os valores de tensões verticais ao longo das linhas 1 e 2, para cinco situações de atrito, em uma vala de  $B=1\text{m}$ , e para uma altura de recobrimento de solo sob o duto de  $H=5D$ , onde  $D$  é o diâmetro do duto (110 mm).

Observa-se, da Figura 3 (a), pouca influência do ângulo de atrito das paredes laterais nos valores máximos de tensão, observados nas vizinhanças do duto. Entretanto isso está associado à altura de recobrimento de solo analisada. O distúrbio de tensões ocasionados pela diferença de rigidez entre o solo e o duto tende a ser constante indiferente do impedimento ao deslocamento oferecido pelas paredes laterais da vala. No entanto, à medida que este impedimento tende a aumentar, o valor de tensão que chega ao duto em profundidades maiores tende a reduzir, diminuindo desta forma o valor de tensões máximas apresentados nas vizinhanças do duto.

A Figura 3 (b), no entanto, mostra uma influência mais expressiva do atrito lateral da vala nas tensões verticais ao longo da linha 2, revelando uma maior dependência do valor de tensão vertical atuante nas proximidades das paredes laterais ao valor de atrito apresentado nestes locais. Observa-se, ainda, que para valores mais baixos deste impedimento, a exemplo da curva de  $1^\circ$ , as tensões apresentadas, mesmo nas proximidades das paredes laterais, apresentam valores maiores que o aplicado na superfície. Isto revela que, para estas condições, o efeito do arqueamento é menos expressivo que o peso próprio do solo que faz o enchimento da vala.

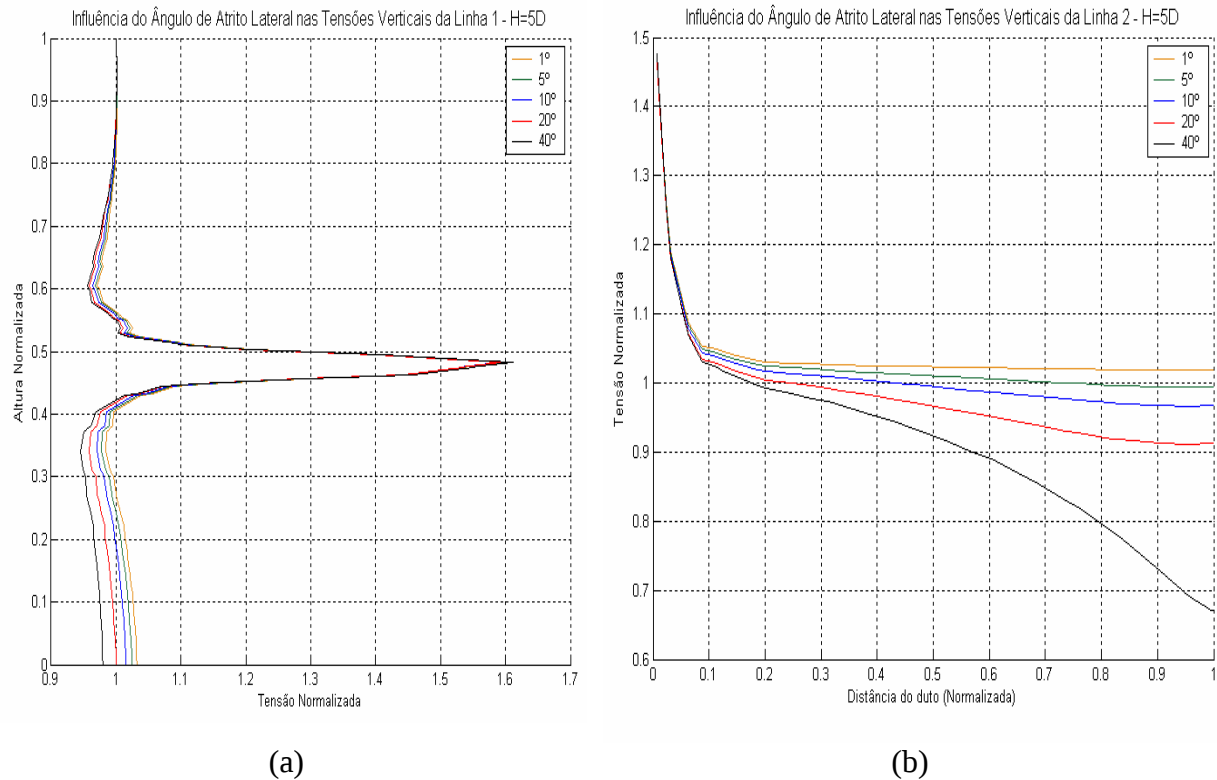


Figura 3. Influência do atrito lateral nas tensões verticais (a) linha 1 (b) linha 2.

A Figura 4, mostra a influência da largura da vala no estado de tensões da linha 1. Nota-se forte respaldo desta variável no estado de tensões do sistema solo-duto. Para um mesmo valor de impedimento ao movimento oferecido pelas paredes da vala, observa-se que quanto menor for a dimensão de sua largura, menores serão os valores de tensões apresentados ao longo da profundidade e consequentemente menores serão os esforços atuantes no duto. Se tomarmos como exemplo as curvas de ângulos de atrito de  $20^\circ$ , pode-se observar uma redução de cerca de 12% nas tensões verticais máximas atuantes ao lado do duto.

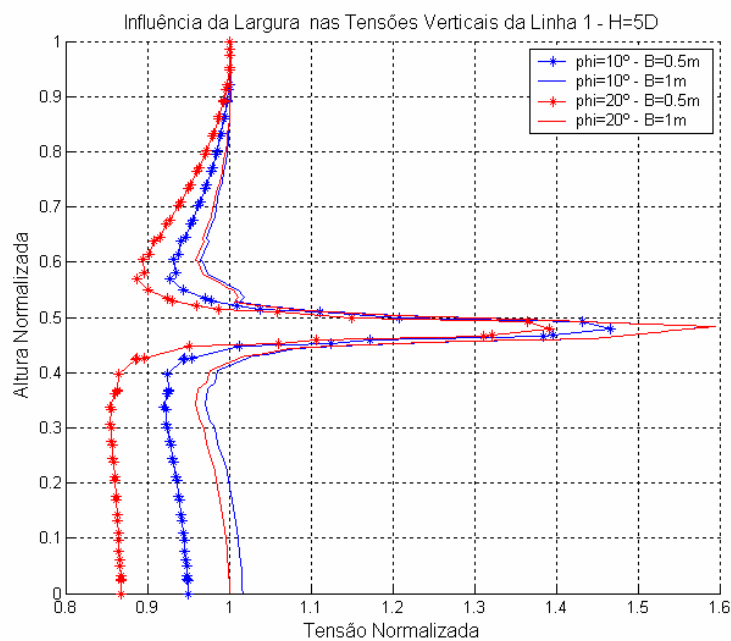


Figura 4. Influência da largura da vala nas tensões verticais da linha 1.

A influência da altura de recobrimento de solo sob o duto pode ser observada na Figura 5. Onde são plotados, para 3 valores de atrito lateral, as tensões verticais atuantes ao longo da linha 2 para os casos em que  $H=5D$ ,  $H=8D$  e

$H=10D$ . Observa-se, dois comportamentos distintos. Um referente a valores baixos atrito lateral (curvas de  $1^\circ$ ), que revela que as tensões verticais atuantes tendem a ser maiores quanto maior for o recobrimento de solo. E outro, referente a valores altos de atrito lateral (curvas de  $20^\circ$  e  $40^\circ$ ), que revela que o efeito do arqueamento tende a se sobrepor ao efeito do peso próprio.

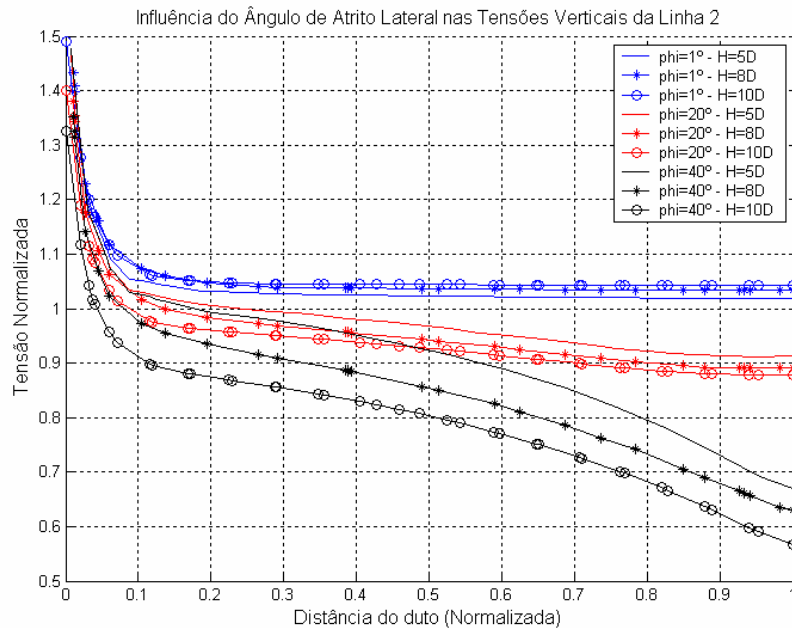


Figura 5. Influência da altura de recobrimento e do atrito lateral nas tensões verticais da linha 2.

### 3. Conclusões

Neste trabalho, verificou-se a influência de alguns parâmetros no estado de tensões do sistema solo-duto proposto. Notou-se, a partir dos estudos numéricos e teóricos, que a manipulação de fatores geométricos e mecânicos conduzem a efeitos que podem ser utilizados como base no processo construtivo de valas para o alojamento de dutos enterrados.

Algumas variáveis envolvidas no fenômeno de arqueamento presente em valas podem ser quantificadas. Notou-se que a altura de recobrimento de solo sob o duto pode influir de maneiras distintas como função do ângulo de atrito presente nas paredes laterais da vala, e que a largura da vala tem forte respaldo sobre o nível de esforços atuantes no duto.

### 4. Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP e ao CNPq pelo apoio ao projeto de pesquisa, integrante da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste do Gás Natural (RECOGÁS), que resultou neste trabalho.

### 5. Referências

- BRANCHMAN, R. W. I.; MOORE, I. D. & ROWE, R.K. 2000. The design of a laboratory facility for evaluating the structural response of small-diameter buried pipes. *Can. Geotech. J.* 37:281-295.
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. (1989) *Concepts and Application of Finite Element Analysis*, 3th Edition. University of Wisconsin, Madison. John Wiley & Sons, Inc.
- HANDY, R. L. (1985). The arch in arching. *J. Geotech. Engng*, 111(3), 302-17.
- MCKELVEY III, J. A. 1994. The Anatomy of Soil Arching. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 13, pp. 317-329.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, USA, p. 66.