

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise Numérica e Analítica da Interação Solo - Duto enterrado para Transporte de Gás em Áreas Urbanas e em Rodovias

Prof. Dr. Joaquim Mário Caleiro Acerbi
Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, acerbi@ufu.br

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia
Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

Profa. Dra. Giovana Bizão Giorgetti
Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, ggeorgetti@ufu.br

RESUMO: Este trabalho faz um estudo analítico e numérico da carga sobre tubulação de gás enterrada, carga proveniente do peso próprio do solo e da sobrecarga de veículos pesados. As alturas mínimas de cobertura de solo sobre o duto flexível metálico são verificadas para alguns casos. Essas alturas são comparadas com fórmulas da literatura técnica: Método de Marston-Spangler; Fórmula clássica de Boussinesq e o Método simplificado do Espraçamento de Tensões. Assim, neste trabalho a metodologia de instalação de dutos enterrados é analisada por meio de simulação numérica por elementos finitos com o uso do pacote de programas - Software da Rocscience, versão 2017, onde procura-se entender de maneira mais realista a interação duto – solo, para várias alturas de cobertura executada em aterro arenoso compactado. Através deste estudo comparou-se os resultados previstos numericamente com os encontrados quando se aplica o método analítico clássico, conhecido como Método de Marston- Spangler ou equação de Marston-Spangler, e também para a equação de Boussinesq e o do procedimento simplificado de Estimativas de Tensões por Espraçamento. Os resultados numéricos apresentaram valores bem menores quando comparados com os obtidos com todos os outros processos utilizados neste trabalho, exceto para a espessura de cobertura de 0,4 metros, quando se aplicou a formulação analítica clássica, de Marston- Spangler, cujo valores foram da mesma ordem de grandeza, e onde se obteve-se um valor de 44 kN/m de carga no duto analisado pelo método numérico e de 38 kN/m quando se usou a formulação de Marston- Spangler.

PALAVRAS – CHAVES: dutos enterrados, modelagem numérica, Método de Marston-Spangler.

1 INTRODUÇÃO

Considerando que a maior parte da população brasileira vive em áreas urbanas no Brasil, censo IBGE (2017), aumentando a necessidade de disponibilidade de serviços essenciais, que entre outros, temos: abastecimento de água, coleta de esgotos, drenagem fluvial e de combustíveis. Devido a essas necessidades é cada vez mais usado

dutos para transporte de todo tipo de fluidos, inclusive gás e de combustíveis de um modo

geral, Viana, (2003). As dutovias, como são conhecidas, são muito utilizadas pela sua competitividade econômica, justamente por terem menores custos em relação ao material empregado, à instalação e manutenção, e transporte propriamente dito, Viana, (2003). O uso de tubulações de gás de petróleo atravessando rodovias e mesma áreas com vias urbanas, sujeitas a tráfego pesado se tornou acontecimento comum. Existe sempre a preocupação da análise das cargas atuantes nos dutos que estão associadas ao trânsito de

veículos pesados, somadas ao peso do solo de cobertura dos dutos. De um modo geral, a carga ou as tensões associadas ao trânsito são bem mais significativas, e, para garantir a segurança do duto, lança-se mão de uma altura mínima de cobertura de solo sobre o duto, com as devidas especificações de materiais e procedimentos executivos. A altura mínima é usada para garantia de segurança em relação às deflexões, deformações e eventuais danos ao duto, como resultado de flambagem ou colapso, devido à cargas sobre o mesmo. E esse “colchão de amortecimento” formado pelo solo que dissipa a sobrecarga evitando os danos, Watkins e Anderson, (2000). Com o conhecimento do solo, da rigidez relativa do sistema solo-duto e da sobrecarga atuante na superfície do solo de aterro da vala, pode-se estimar a altura mínima em função da deflexão limite na tubulação, Spangler (1951).

O objetivo principal do trabalho é fazer um estudo comparativo entre os valores das cargas atuantes sobre o duto estimadas numericamente, com o uso de um programa de elementos finitos, e os valores calculados quando se usa o método clássico analítico de Marston-Spangler. De maneira complementar se fez também a comparação com a fórmula de Boussinesq (1885), baseada na teoria da elasticidade, apud Sousa Pinto, (2006); e no procedimento simplificado ou técnica simplificada de estimativas de tensões por espraimento, em uma dada profundidade, baixo de cargas distribuídas, Cintra et al., (2012).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Bueno & Costa (2012), o conceito de rigidez está vinculado ao tipo de duto, do solo de preenchimento da vala e da condição de apoio da tubulação, e assim, os dutos enterrados podem ser classificados em sistemas estruturais rígidos, flexíveis e de comportamento intermediário. Ainda segundo os mesmos autores, o sistema flexível é aquele em que existe uma interação duto-solo, em que a tubulação é mais flexível ou menos rígida do que o solo compactado usado para preencher a vala, e o solo é mais rígido

devido ao processo construtivo que induz a um comportamento acoplado.

A teoria de Marston – Spangler (1951), adota como premissa que a carga do duto atuante no duto enterrado é a do prisma interior, majorada ou reduzida pelos efeitos das forças de atrito do solo adjacente. De tal forma que, para dutos rígidos, pode ser expressa por:

$$Q_s = C_v \cdot g \cdot (B_v)^2 \quad (1)$$

Onde C_v é um fator de carga; g é o peso específico do solo e B_v é a largura da vala; O desenvolvimento e os valores dos C_v podem ser encontrados em Bueno & Costa (2012).

Segundo Spangler (1950), para dutos flexíveis multiplica-se a equação (1) por B_c/B_v , onde B_c é o diâmetro do duto ou conduto. Assim, a equação (1) se transforma em:

$$Q_s = C_v \cdot g \cdot (B_v) \cdot (B_c) \quad (2)$$

Para o método do espraimento de tensões, que consiste em dissipar a carga aplicada na superfície do solo de acordo com a profundidade e com o ângulo que faz com a vertical. Foi adotado um ângulo aproximado de 27°; ou 2V:1H.

A carga no duto foi ainda calculada para efeito de sobrecarga, através da teoria da elasticidade com o uso da fórmula de Boussinesq; e verificado o comportamento de forma mais precisa, com o uso do pacote de programas - Software da Rocscience, versão 2017.

Com base nos estudos de um projeto hipotético, com as seguintes propriedades geométricas, físicas e mecânicas de um duto metálico: Aço API 5L X46, tensão de escoamento de 46000 ksi, cerca de 3235 kg/cm², diâmetro de 16”; 40,64 cm, parede de espessura $t = 3/8$ ” ou 0,925 cm, revestido com polietileno e com proteção catódica, trabalhando com pressão interna constante e contínua de 38 kg/cm². Para efeito de maior segurança, as análises foram conduzidas com a hipótese de

pressão no interior do duto igual a 0 (zero).

Geralmente os dutos são instalados em vala com ou sem trincheira induzida, saliência positiva e negativa, Bueno & Costa (2012). Usualmente é escavada uma vala em forma de trincheira estreita de largura de 1,5 a 2 vezes o diâmetro do duto a ser instalado. Depois de realizada a escavação da trincheira até a cota de projeto para o apoio (H), o duto é instalado, e o aterro de solo arenoso de cobertura é executado até a superfície do solo. Neste caso adotou-se uma distribuição geométrica de que a largura da vala tem 2 vezes o diâmetro do duto. Foi considerado uma camada de solo de proteção de espessura de no mínimo 0,40 m, acima da geratriz superior do duto. Foram realizados 3 casos para estudos para duto de aço em vala convencional: 0,40; 0,80 e 1,00 metro de espessura de solo (h) e com o confinamento dado pelo solo arenoso lateral. Correspondendo análises para um diâmetro, 2 diâmetros e 2,5 diâmetros de cobertura, respectivamente.

A figura 1, seguinte ilustra o modelo geométrico utilizado.

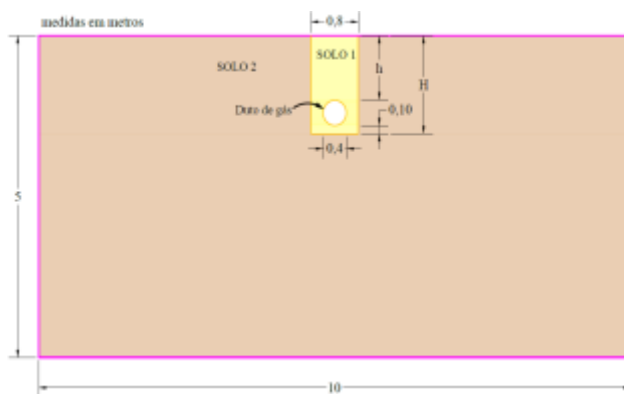


Figura 1 – Idealização geométrica a ser usada na análise numérica e algébrica do caso estudado.

A tabela 1, seguinte especifica a os parâmetros geotécnicos dos solos utilizados com aterro, solo1, e do horizonte natural escavado, solo 2.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos do solo 1, usado como berço, aterro lateral e de cobertura do duto.

Solo	e	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo 1	0,47	18,0	0	35
Solo 2	0,62	17,0	25,0	25

Obs: O Coeficiente de Poisson foi adotado como sendo 0,3 para os dois solos, e, como Módulo de Elasticidade foi adotado 70,0 GPa para o solo 1 e 20 GPa, para o solo 2.

Existem duas parcelas de carregamento vertical sobre o duto enterrado: um devido ao peso próprio do solo, denominado geostático, e outro devido a sobrecarga no solo, na superfície do aterro. Para os três casos analisados, foi considerado o peso do solo, mais uma sobrecarga concentrada devido ao peso de uma sobrecarga rodoviária de 80 kN; a norma brasileira NBR 7188/1984 especifica um caminhão Tipo 45 (45 toneladas ou 450 kN), projetando uma carga concentrada mínima de 75 kN. Adotou-se 80 kN para efeito de segurança. Essa carga foi utilizada para a aplicação do método de Boussinesq. Essa carga foi transformada em uma carga distribuída, utilizado nos métodos restantes, Marston-Spangler e do espraçamento de Tensões, e para a análise numérica. Adotou-se também um coeficiente de impacto de 1,5 como estimativa do aumento da carga aplicada devido ao efeito dinâmico da “queda” da roda em uma depressão, “buraco na via”. De modo que foi analisado e estudado uma tensão média distribuída de 600kPa; ou de cerca de 120 kN/m de cargamédia.

3 Resultados

3.1 Formulação de Boussinesq

Com o uso da fórmula de Boussinesq para determinação das tensões verticais devidas à carga concentrada superficial de 80kN concentrada na superfície do aterro, cuja projeção vertical passe pelo centro do duto. Os valores encontrados se apresentam na tabela 2, seguinte.

Tabela 2 – Resultados das tensões acima do duto e carga por metro – Método de Boussinesq

Cobertura de solo acima do duto h(m)	Tensões devidas a sobrecarga de 80kN (kPa)	Tensões no duto (pp + sobrecarga) (kPa)	Carga por metro (kN/m)
0,40	239	246	98
0,80	60	74	30
1,00	38	56	22

3.2 Método do Espraimento de Tensões

Com o uso da técnica de espraimento de tensões, calculou-se as tensões médias e carga por metro no topo do duto. Na tabela 3, seguinte, apresenta-se os resultados

Tabela 3 – Resultados das tensões acima do duto e carga por metro – Método do Espraimento de Tensões – 600kPa

Cobertura de solo acima do duto h(m)	Tensões devidas a sobrecarga distribuída de 600 kPa	Tensões no duto (pp + sobrecarga) (kPa)	Carga por metro (kN/m)
0,40	143	150	60
0,80	67	81	32
1,00	50	68	27

3.3 Método de Marston-Spangler

Com uma adaptação feita no Método de Marston-Spangler, onde se usou o conceito de duto flexível, altura de aterro crítico, e usando ábacos de estimativa de fatores de carga, Bueno & Costa (2012), conseguiu-se estimar as tensões e as cargas no topo do duto. Os resultados se encontram na tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Resultados das tensões acima do duto e carga por metro – Método de Marston-Spangler – 600kPa

Cobertura de solo acima do duto h(m)	Tensões devidas a sobrecarga distribuída de 600 kPa Aterro fictício	Tensões no duto (pp + sobrecarga) (kPa)	Carga por metro (kN/m)
0,40	80	87	35
0,80	58	72	29
1,00	51	69	28

3.4 Análise numérica

Baseado na geometria idealizada, figura1, e nos parâmetros geotécnicos da tabela 1, apresenta-se a seguir, os resultados para o caso mais crítico, cobertura de 0,40 m, definido como aquele que causou maior deformação e tensão no topo do duto(carga no duto). E o menos crítico, menor deformação e tensão no topo do duto(carga no duto), cobertura de 1,0 metro, os dois casos com sobrecarga de 600kPa mais o efeito de peso próprio. Esses resultados foram obtidos com a utilização do Software de Elementos Finitos Rocscience 2017. Os principais resultados encontrados estão nas figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, e na figura 9. Estas figuras foram sintetizadas na tabela 5 e nas figuras 10 e 11, em forma de gráficos, apresentados na sequência.

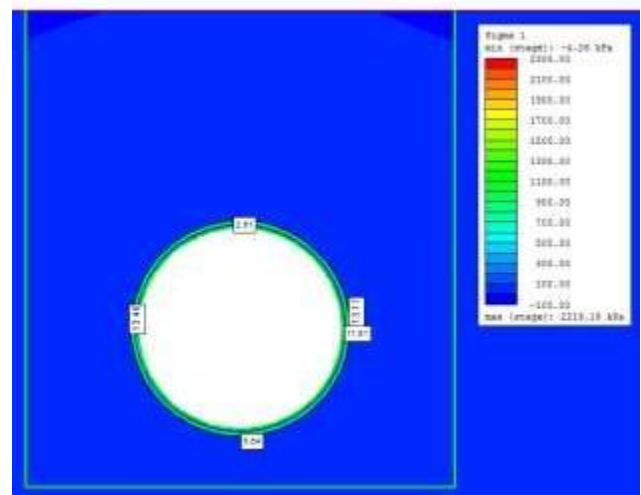


Figura 2 – Tensão no duto devida ao peso próprio de solo de confinamento, com 0,40 m de cobertura.

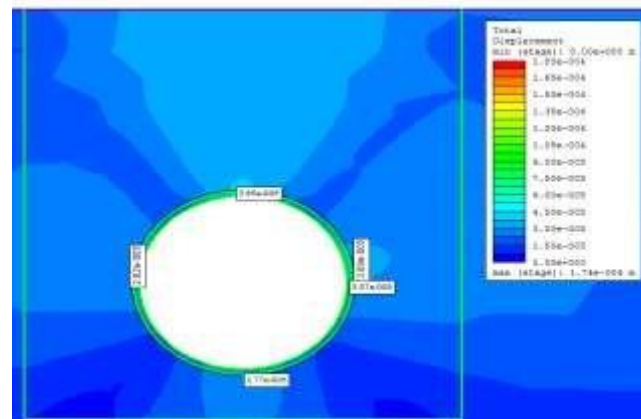


Figura 3 – Deslocamento no duto devida ao peso próprio de solo de confinamento, com 0,40 m de cobertura.

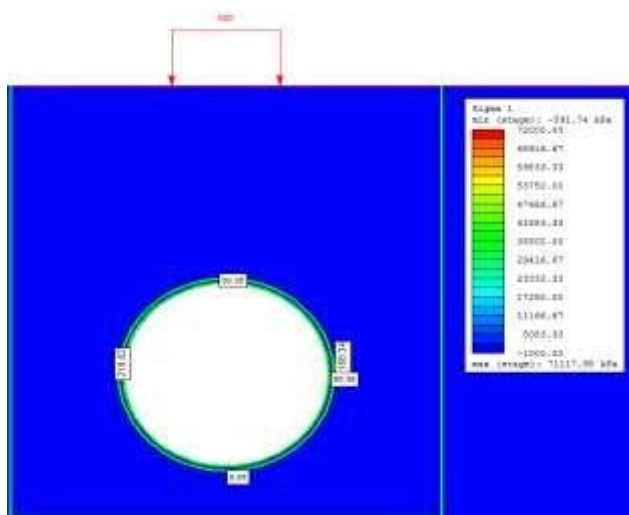


Figura 4 – Tensão no duto devida ao peso próprio de solo de confinamento e da sobrecarga de 600kPa, com 0,40 m de cobertura.

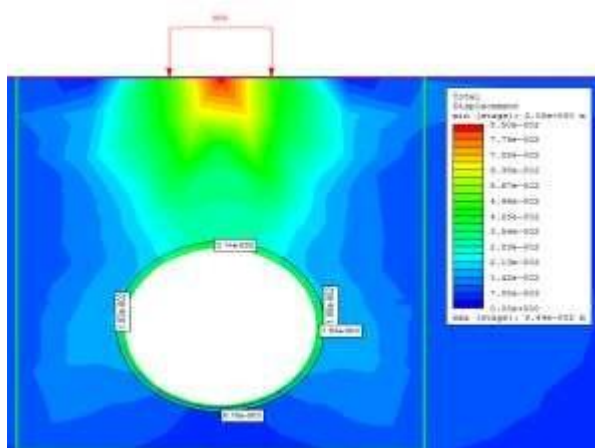


Figura 5 – Deslocamento no duto devido ao peso próprio de solo de confinamento e da sobrecarga de 600kPa, com 0,40 m de cobertura.

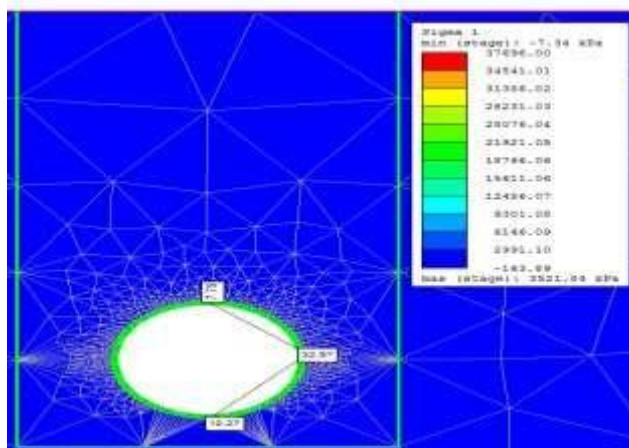


Figura 6 – Tensão no duto devida ao peso próprio de solo de confinamento, com 1,0 m de cobertura.

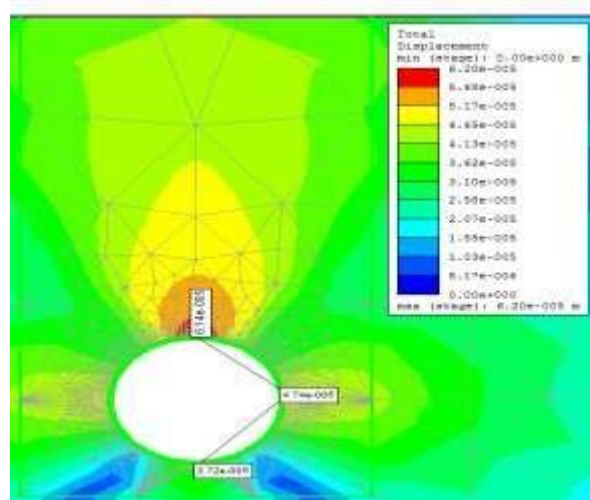


Figura 7 – Deslocamento no duto devido ao peso próprio de solo de confinamento, com 1,0 m de cobertura.

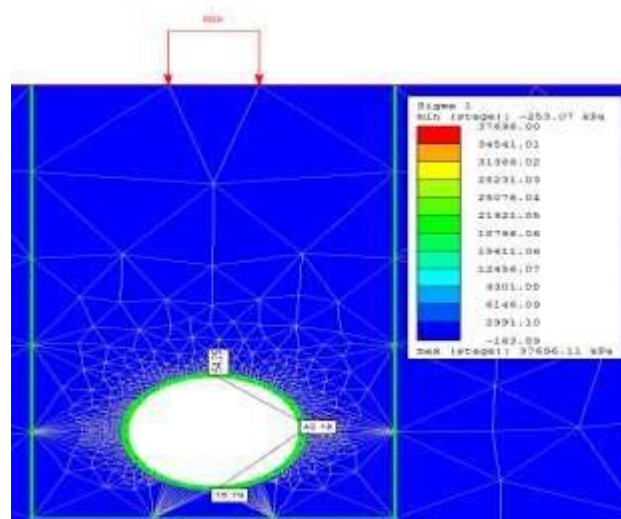


Figura 8 – Tensão no duto devida ao peso próprio de solo de confinamento e da sobrecarga de 600kPa, com 1,0 m de cobertura.

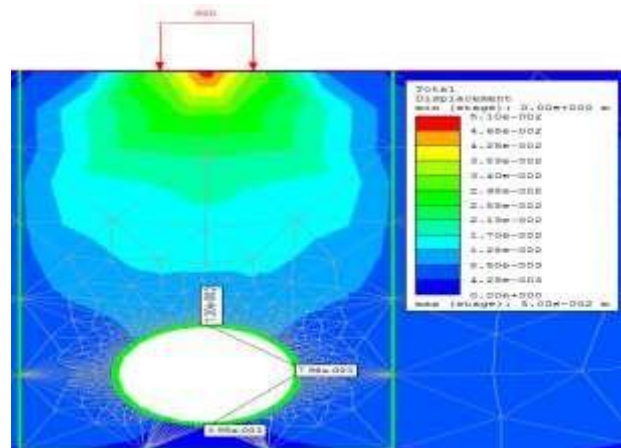


Figura 9 – Deslocamento no duto devido ao peso próprio de solo de confinamento e da sobrecarga de 600kPa, com 1,0 m de cobertura.

A tabela 5, seguinte mostra os valores agrupados das tensões devidas ao peso próprio, devidas ao peso próprio e da sobrecarga e a força por metro sobre o duto.

Tabela 5 – Resultados das tensões acima do duto e carga por metro – Método Numérico – elementos finitos
Software da Rocscience – 600kPa

Cobertura de solo acima do duto h(m)	Tensões devidas ao peso próprio (kPa)	Tensões no duto (peso próprio + Sobrecarga 600 kPa)	Carga por metro (kN/m)
0,40	2,68	110,21	44
0,80	6,10	44,43	18
1,00	7,79	30,35	12

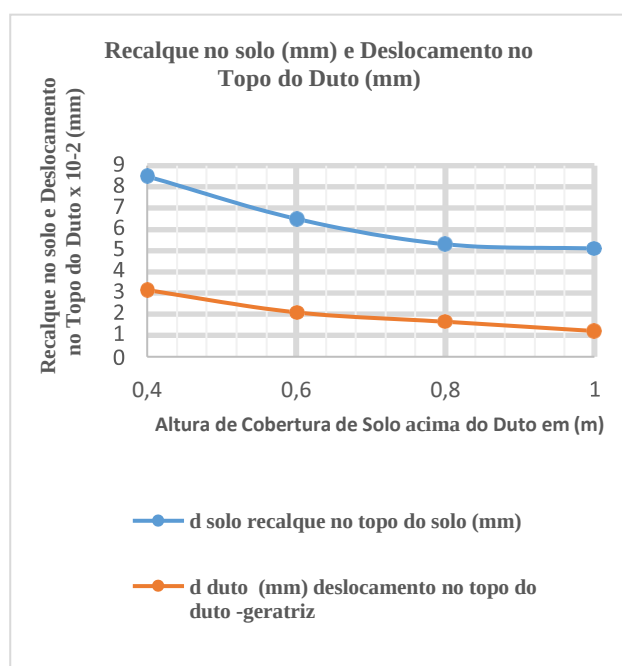


Figura 10 - Apresenta o deslocamento no solo superficial acima do duto (recalque do solo) e o deslocamento sofrido pela geratriz superior do duto.

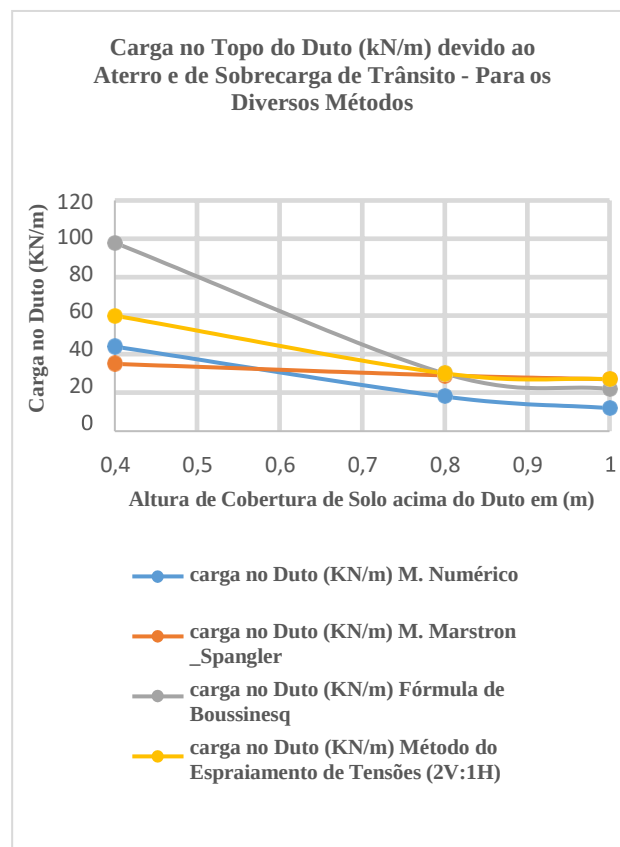


Figura 11 - Carga no topo dos dutos x Altura de solo acima do duto.

4 Análises

Os resultados encontrados para os métodos clássicos para estimativas de tensões no duto e, principalmente, para cargas por metro de duto foram ou apresentaram resultados bastante próximos, com exceção para o método de Boussinesq que apresentou resultado bem maior para a cobertura de solo de 0,40m, e isso deve a um sofisma matemático apresentado pela formulação para cálculo de tensões muito próximos do ponto de aplicação da carga vertical. O método numérico apresentou valores muito mais baixos para o cálculo das tensões, e deslocamentos do solo (recalques) e deformação/deslocamento do topo do duto. Esse comportamento pode ser explicado pela interação duto-solo confinante, simulando o efeito de arqueamento do solo, efeito de arco ou silo, fazendo com as tensões verticais sejam transferidas para áreas laterais, para o solo confinante, daí a importância do controle da execução do aterro compactado nas laterais de confinamento do duto.

4 Conclusões

Os resultados apresentados pelos métodos clássicos apresentam estimativas de valores de tensões e cargas bastante concordantes, mas o método numérico mostrou ser muito mais realista com relação às tensões e deslocamentos do maciço de solo, e principalmente por mostrar o “efeito de ovalização”, com o aumento das tensões laterais e alívio das tensões verticais, e principalmente, da carga direta sobre a tubulação em análise. O método numérico mostrou ser uma ferramenta extremamente poderosa e útil na análise das interações solo-duto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio e por ter autorizado a aquisição da licença de uso do Software Rocscience 2017.

REFERÊNCIAS

- Viana, P.M.F. (2003). Geovalas: Um Novo Processo Construtivo para Dutos Enterrados. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 220p.
- Watkins, R.K; e Anderson, L.R. (2000). Structural Mechanics of Buried Pipes/Conduits, London: CRC Press, 444p.
- Spangler, M.G. (1951) Soil Engineering, Iowa: International Text Book Company.
- Souza Pinto, C. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos. Editora Oficina de Textos.
- Cintra, J.C.A. e Aoki, N. e Albiero, J.H. (2012). Fundações Diretas – projeto Geométrico.
- Bueno, B. e Costa, Y. (2012). Dutos Enterrados - Aspectos Geotécnicos. Editora Oficina de Textos
- Spangler, M. G. (1950). Theory of Loads on Negative Projecting Conduits. Proceedings of HRB, v.30, p 153-161.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7188. (1984). Carga móvel sobre Ponte Rodoviária e passarela de Pedestre. Rio de Janeiro.