

PROJETO GEOTÉCNICO E ESTRUTURAL DE DUTOS ENTERRADOS

**LUCAS LOPES ASSAD
RAFAEL DUARTE PEDROSA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO - 2014**

PROJETO GEOTÉCNICO E ESTRUTURAL DE DUTOS ENTERRADOS

**LUCAS LOPES ASSAD
RAFAEL DUARTE PEDROSA**

“Projeto Final apresentado ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Civil”.

ORIENTADOR: PROF. Dr. FERNANDO SABOYA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO - 2014**

PROJETO GEOTÉCNICO E ESTRUTURAL DE DUTOS ENTERRADOS

LUCAS LOPES ASSAD
RAFAEL DUARTE PEDROSA

“Projeto Final apresentado ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Civil”.

Aprovada em 24 de janeiro de 2014

Comissão Examinadora:

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr (Orientador, D.Sc., Geotecnia) – UENF

Prof. Sérgio Tibana (D.Sc., Geotecnia) – UENF

Prof. Priscila de Almeida Cardoso Santiago (M.Sc, Geotecnia) – IFF

Dedico este projeto, primeiramente, à minha família que me deu total suporte, amor e incentivo durante minha formação acadêmica e pessoal. Em especial, meu pai, minha mãe, meu irmão e meus avós.

Dedico a meus amigos, que nem sempre perto, sempre me auxiliaram nos momentos difíceis e de dúvida. Especialmente a meus amigos Douglas Ferreira, Thiago Lennon, Silas, Igor Freitas, Pedro Quitete, Lucas Gasparini e Diogo Falquer.

Dedico aos meus professores, que caminharam comigo durante esses cinco anos e meio de formação acadêmica, principalmente ao professor Saboya por toda ajuda no curso e nessa etapa final.

Dedico aos meus colegas de turma por todas as dificuldades e alegrias vividas, sempre juntos. Principalmente, Ramiro Reis, Kiyoshi Yamazaki, Greisson Peixoto, Iury, Tadeu e Vinicius Lennon, amigos de classe, de estágio e de vida.

Dedico ao Eng. Vinicius Correa, o Eng. Cassio Rodrigues e ao Mestre de Obras Leandro Mesquita, fundamentais na minha formação profissional.

Por último, a Sara de Assis Ribeiro por ser a peça fundamental no fim dessa etapa, me apoiando, sendo minha amiga, namorada e fiel companheira.

Rafael Duarte Pedrosa

Primeiramente dedico à minha família, pelo amor e por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, Pai, Irmão, Tios e Avós, todos foram de grande importância nessa minha caminhada e me apoiaram em todas as escolhas que fiz.

Aos meus bons amigos que fiz durante toda minha graduação na UENF, em meu estágio e na igreja os quais juntos me deram a força que eu precisava nas horas mais difíceis.

Dedico a todos os meus professores, em especial Fernando Saboya e Sérgio Tibana por todo conhecimento e atenção proporcionados nesses anos, que foram os melhores anos de minha vida.

Dedico aos engenheiros Joaquim Castelo Jr. e André Jum Yassuda, pelo companheirismo nesse ano de estágio e por todo ensinamento e a oportunidade de conhecer na prática o que é a Engenharia Civil.

Por fim, à Luna Codeço e sua família por todo companheirismo e dedicação em me ajudar em qualquer coisa que precisei durante toda minha caminhada.

Lucas Lopes Assad

“Mensagem Dedicatória”

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar a Deus por ter nos dado força e iluminado os nossos caminhos para que pudéssemos concluir mais uma etapa de nossas vidas

Aos nossos pais e irmãos que sempre nos apoiaram e deram força em todos os momentos difíceis da jornada.

A todos os professores e funcionários do curso de engenharia civil, pela paciência, dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas.

Ao Professor Saboya pelos conhecimentos transmitidos e pela orientação não só durante a realização do projeto final, mas durante toda nossa caminhada acadêmica.

Aos Professores Sérgio Tibana e Priscila de Almeida por participar da nossa banca examinadora. Proporcionando-nos a oportunidade de crescer e sempre acrescentar mais ao nosso conhecimento.

Aos amigos que fizemos durante o curso, pelas verdadeiras amizades que construímos ao longo desses anos, deixando a trajetória mais prazerosa e divertida.

Por fim, agradecemos aos amigos e familiares, pelo carinho e compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva e também a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para que esse projeto fosse realizado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
CAPITULO I – INTRUDUÇÃO.....	01
1.1 Considerações Iniciais.....	01
1.2 Objetivo	01
1.3 Metodologia.....	02
CAPITULO II – HISTÓRICO.....	03
CAPITULO III – INFORMAÇÕES GERÁIS	06
3.1 GASVOL.....	06
3.2 Informações Iniciais do Projeto	06
CAPÍTULO IV – INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	08
4.1 Considerações Iniciais.....	08
4.2 Investigações de Subsolo.....	08
4.3 Análise e Obtenção de Parâmetros.....	10
CAPÍTULO V – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E GEOTÉCNICO	12
5.1 Informações Iniciais.....	12
5.2 Dimensionamento Estrutural Devida às Pressões Internas.....	13
5.3 Dimensionamento Estrutural Devido à Carga de Solo e Sobrecarga.....	15
5.4 Capacidade de Carga do Solo Abaixo do Duto	25
5.5 Efeitos do Lençol Freático	28
CAPITULO VI – CONCLUSÃO	31
Anexo A – Relatório de Sondagem à Percussão	32
Anexo B – Cálculo de Deflexões por Cargas Experimentais Verticais	33
Anexo C – Cálculo de Deflexões para a Situação 1	34
Anexo D – Cálculo de Deflexões para a Situação 2.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

RESUMO

Este projeto tem como objetivo fazer uma análise das situações críticas de dutos enterrados para transporte de gás, tratando de sua estrutura devido às tensões internas e da sua interação com o solo, tomando como referência um duto com material e dimensão já existente e já utilizado na rede de dutos no Brasil. O estudo envolveu a análise do terreno onde o duto seria implantado, tomando como base ensaios de sondagem a percussão e a partir do mesmo foram determinadas algumas propriedades do solo. Uma primeira análise foi feita com o estudo das tensões internas do duto, admitindo uma tensão de trabalho e comparando com a tensão de escoamento do aço do duto. Para a interação solo duto, foram calculadas as deformações causadas no mesmo, submetendo-o às cargas geradas pelo solo de cobertura somando com as cargas geradas por um trem-tipo, considerando que o duto enterrado passa por baixo de uma rodovia de tráfego intenso. Após essa etapa calculou-se a capacidade de carga que o solo resiste quando o duto está apoiada sobre ele. Por último, foi feita a análise considerando o nível do lençol freático acima da profundidade que o duto está enterrado. A água gera um empuxo que poderia causar uma flutuação da rede e através do método utilizado é possível determinar se o mesmo flutuaria, tornando necessário medidas para fixar o duto na profundidade determinada, ou se ele ficaria estável. No fim, o duto se manteve estável e com deformações aceitáveis em todas as situações para a profundidade escolhida.

PALAVRAS-CHAVE: Dutos Enterrados; Projeto Estrutural; Projeto Geotécnico.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Gasodutos previstos existentes para o Cone Sul	04
FIGURA 2 – Comércio entre países do Cone Sul, em bilhões de m ³ /ano	05
FIGURA 3 – Padrões e medidas homologadas para transporte de cargas.....	06
FIGURA 4 – Duto posicionado abaixo do eixo triplo central.....	07
FIGURA 5 – Duto localizado abaixo do eixo triplo traseiro.....	07
FIGURA 6 – Amostrador da sondagem à percussão	09
FIGURA 7 – Sondagem à percussão	09
FIGURA 8 – Classificação do solo	10
FIGURA 9 – Parâmetros de resistência e deformabilidade em função do SPT ..	11
FIGURA 10 – Correlação do Ko com o SPT	11
FIGURA 11 – Especificações do duto de aço	12
FIGURA 12 – Maquete virtual	12
FIGURA 13 – Carga x Cobertura	16
FIGURA 14 – Deformação x Cobertura.....	18
FIGURA 15 – Relação de distâncias entre eixos	19
FIGURA 16 – Carga do eixo simples	19
FIGURA 17 – Carga do eixo duplo.....	20
FIGURA 18 – Carga do eixo triplo.....	20
FIGURA 19 – Transferência de cargas no solo.....	20
FIGURA 20 – Relação entre (r/z) e Nb.....	21
FIGURA 21 – Primeira situação	23
FIGURA 22 – Segunda situação	24
FIGURA 23 – Valor dos fatores de capacidade de carga (Nc, Nq, Ny) em função do ângulo de atrito.....	26
FIGURA 24 – Duto enterrado sob o efeito do levantamento do lençol freático	29

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES

- σ_y - Tensão de escoamento
FS - Fator de segurança
 σ_{max} - Tensão devido à pressão interna
 P_i - Pressão de Operação
D - Diâmetro do duto
e - Espessura do duto
 σ_{max} - Tensão devido à pressão interna
 σ_{adm} - Tensão admissível de norma
 σ_{cd} - Tensão circunferencial disponível
 γ - Peso Próprio do Solo
 P_v - Carga de Terra
c - Cobertura de terra
 σ_v - Tensão vertical atuante
 ΔX - Deflexão horizontal
 D_L - Fator de deflexão retardada
K - Constante de assentamento
 W_c - Carga total atuante sobre o duto
r - Raio de duto
E - Módulo de elasticidade do aço
I - Momento de inércia do duto
E' - Módulo de elasticidade do solo
 P_d - Carga pontual deslocada
 N_B - Fator de relação r/z
 σ_r - Acréscimo de tensão horizontal
 θ - Ângulo entre a carga deslocada e o duto.
v - Coeficiente de Poisson
 σ_h - Acréscimo de tensão horizontal pelo solo
 γ_s - Peso específico do solo
K - Coeficiente de empuxo do solo
 W_p - Peso próprio do duto por metro
 W_s - Carga de solo sobre o duto por metro

W_w - Força vertical de baixo para cima por metro, gerada pelo empuxo da água

D - Densidade do aço carbono do API-5L-56

θ_f - Ângulo entre a superfície de ruptura e a horizontal

φ - Ângulo de atrito

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Iniciais

A rede de dutos no Brasil cresceu de forma muito rápida nos últimos anos. Muitas empresas do ramo petrolífero as utilizam para transporte de gás e óleo, o que torna o transporte mais seguro e barato para grandes distâncias. Com o crescimento da região Norte Fluminense novos dutos devem ser construídos para atender à grande demanda das empresas do ramo do petróleo.

Os dutos enterrados são estruturas calculadas para suportar grandes esforços gerados pelo solo onde foi enterrado e pelos óleos ou gases que serão transportados em seu interior.

Para dimensionamento do duto, é de suma importância uma análise do solo onde a obra será executada e das propriedades do duto a ser enterrado. Para isso é importante que o projetista conheça bem todo o trecho que o duto irá percorrer, assim como o comportamento dos tipos de solo encontrados no trecho.

1.2 – Objetivo

Têm-se como proposta inicial, a elaboração de um projeto visando à implantação de dutos enterrados enfatizando os aspectos geotécnicos e estruturais. Quanto ao projeto estrutural devem-se considerar dutos que transportam gás e óleo, cuja variação de temperatura e a pressão interna gerada pelo material transportado tornam-se condicionantes de segurança.

No projeto geotécnico serão considerados os efeitos do embutimento, capacidade de carga e levantamento devido ao efeito do lençol freático. Serão considerado também reaterros controlados para evitar danos estruturais durante essa fase da obra.

1.3 – Metodologia

O primeiro passo importante para o dimensionamento do duto é o conhecimento detalhado do local onde o duto será lançado. Para isso serão feitas sondagens para analisar o solo presente no trecho escolhido e assim definir sua estratigrafia e suas propriedades geomecânicas.

Em seguida, para calcular o dimensionamento estrutural, usou-se como base o gasoduto GASVOL da empresa Petrobrás.

Serão também analisados os esforços atuantes (sobrecarga vertical, flutuabilidade, dilatação térmica e pressões internas) em toda região do duto, assim como a análise de transmissão de cargas na seção crítica do duto, onde o mesmo estará cruzando uma rodovia de grande movimento.

Por fim será analisado o processo de escavação e reaterro a fim de controlar a execução e evitar danos ao duto durante essa fase da obra.

CAPÍTULO II – HISTÓRICO

O gás natural, até a década de 90, era considerado no Brasil como um energético de pouco interesse comercial, tendo sido desprezado e considerado quase um fracasso da atividade de exploração do petróleo. Porém, mesmo em reservas ricas em petróleo, o gás natural sempre está presente. O chamado gás associado. Por muito tempo este gás foi simplesmente separado do petróleo e queimado, nas próprias plataformas. Embora esta queima ainda ocorra, sua intensidade vem sendo reduzida progressivamente, destinando o gás para utilização, como no exemplo da Usina Termoelétrica Macaé Merchant, que opera a fim de dar proveito ao gás produzido pela Bacia de Campos. [2]

Diversos países tem o gás natural como uma fonte energética nobre, pois sua queima libera muita energia sem deixar resíduos, diferente dos outros tipos de materiais usados antes da segunda metade do século XX. Durante a revolução industrial houve uma grande demanda por matrizes energéticas, e os principais materiais encontrados na Europa foram os carvões minerais e vegetais. No entanto sua queima libera muitos resíduos tornando muito baixa sua eficácia. [2]

Após a segunda metade do século XX com o avanço da exploração do petróleo, o gás natural que era um subproduto dessa exploração, se tornou uma das principais fontes energéticas de diversos países. Com isso em 1999 o governo federal criou o Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT), o qual visava aumentar a participação da energia termelétrica no país, principalmente em regiões que sofrem pela falta de chuva e não podem utilizar os recursos hídricos para geral energia. No entanto devido aos altos preços dos gases importados da Bolívia, esse programa se extinguiu, e hoje a fonte energética do Brasil é 78,4% proveniente de recursos hídricos (MARTINS; PEREIRA, 2011).

No entanto, o gás natural não foi abandonado no Brasil, uma vez que existem muitas regiões que não dispõem de recursos hídricos, e por ser um energia limpa que produz poucos resíduos. A queima do gás natural não produz partículas sólidas nem cinzas, e também tem as taxas de emissão de nitrogênio menor que as da queima de petróleo e carvão. Entretanto a maior preocupação de se trabalhar com o gás natural, é que sua composição dispõe de altas concentrações de metano (acima de 90%), o tornando assim um gás com forte contribuição para o aumento do efeito

estufa. Quando ocorre um vazamento de gás, é praticamente impossível recuperar o que foi emitido para o meio ambiente, causando enormes danos à atmosfera. [2]

Muitos países como a Argentina e a Bolívia têm suas redes de dutos muito bem estruturadas, afim que conseguir transportar grande quantidade de massa entre pontos de interesse. No entanto o Brasil ainda peca por possuir uma rede pequena e antiga. O maior desafio que temos nos dias de hoje, é a construção de uma boa rede de dutos que transportem gases e petróleo, para que não necessite mais importar essas matérias primas de outros países. A PETROBRAS assumiu essa dianteira e pretende investir na construção de gasodutos e nas alternativas de transporte em carretas a fim de fomentar o mercado para o produto antes da chegada da rede duto viária. [2]

Os países da América latina vem sofrendo uma grande mudança em seus setores energéticos. O Chile e a Argentina foram os primeiros países a realizarem as reformas e os primeiros a estabelecerem interconexões gasíferas. No entanto, a ligação entre países como Brasil, Bolívia e Argentina são as mais importantes, pois uma vez estabelecidas, formarão um hub de integração entre os países latino-americanos. [2]

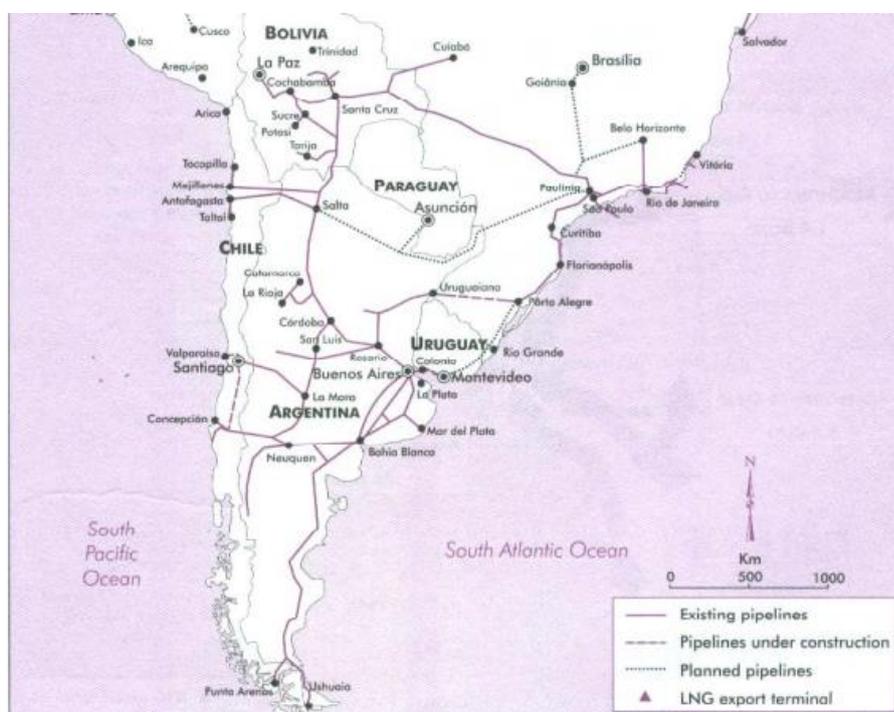


Figura 1–Gasodutos previstos e existentes para o Cone Sul, Fonte: IEA/OECD (2003).

Este rápido crescimento do comércio entre países América latina está representado na Figura 2. Todo comércio passou de 2,1 bilhões de m³ em 1996 para 9.9 bilhões de m³ em 2001. É mostrado na figura também, que países como Argentina e Bolívia, já comerciavam o gás desde 1991, enquanto o Brasil só entrou nessa rede em 1999 [2]

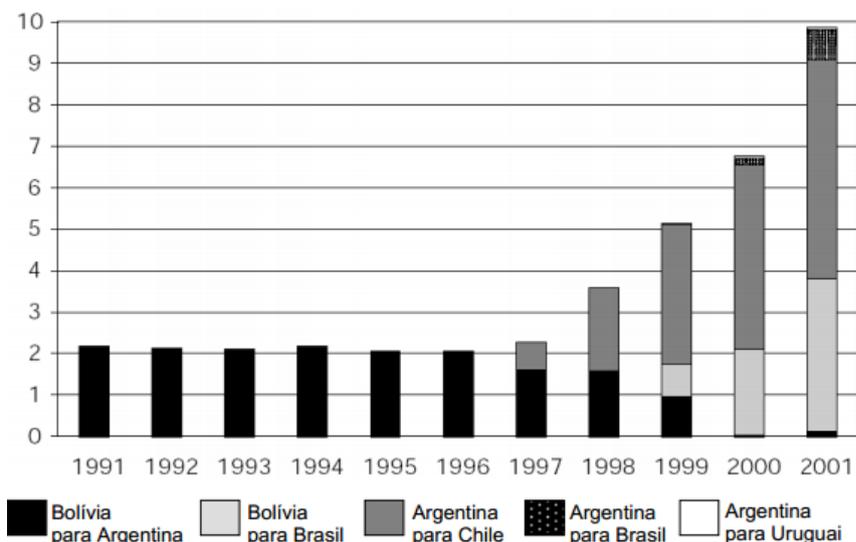


Figura 2 – Comércio entre países do Cone Sul, em bilhões de m³/ano, 1991 – 2001.
 Fonte: IEA/OECD (2003).

Neste período, o gasoduto Bolívia-Brasil foi finalizado e o primeiro estágio do gasoduto Argentina-Brasil (até Uruguaiana/RS) se tornou operacional, criando a base para uma rede de transporte sub-regional. Outros projetos estão em estudo, como um gasoduto da Argentina para o Sul do Brasil via Uruguai e um da Bolívia para o Brasil via Argentina e Paraguai. [2]

CAPÍTULO III – INFORMAÇÕES GERAIS

3.1 – GASVOL

O gasoduto REDUC-ESVOL, conhecido também como GASVOL, foi construído para conduzir o gás natural de Duque de Caxias, no Rio de Janeiro, ao gasoduto GASPAL (interliga Volta Redonda a São Paulo) e aos municípios de Japerí, Piraí e Volta Redonda. Operando desde 1986, a extensão completa do duto é de 95,2km, sendo capaz de transportar até 1.538.477.628m³ por ano. [3]

Para elaboração do projeto foram utilizadas as características do gasoduto GASVOL, cujo duto é feito do aço API-5L-56, possui diâmetro de 0,4572m e espessura de 0,0079m.

3.2 – Informações Iniciais do projeto

Para elaboração do projeto, levou-se em consideração a seção mais crítica que um gasoduto pode se submeter, o qual ocorre quando o mesmo cruza uma rodovia com grande tráfego de caminhões pesados.

A fim de uma análise de maior precisão foram consideradas duas situações distintas, utilizando o trem tipo de acordo com a figura 3. [1]

Composições	Peso máximo permitido por eixo ou conjunto de eixos [t]	Composições	Peso máximo permitido por eixo ou conjunto de eixos [t]	Composições	Peso máximo permitido por eixo ou conjunto de eixos [t]
1 	6+10=16	16 	6+10+10+10=36	31 	6+10+17+10=43
2 	6+17=23	17 	6+10+10+17=43	32 	6+10+10+17=43
3 	12+17=29	18 	6+17+10+10=43	33 	6+17+10+17=50
4 	6+10+10=26	19 	12+17+10+10=49	34 	6+17+17+10=50
5 	6+10+17=33	20 	6+10+17+17=50	35 	6+10+17+17=50
6 	6+10+10+10=36	21 	6+17+10+17=50	36 	6+17+17+17=57
7 	6+10+25,5=41,5	22 	12+17+10+17=56	37 	6+17+25,5+17=65,5
8 	6+10+10+17=43	23 	6+17+17+17=57	38 	6+17+17+25,5=65,5
9 	6+10+10+10+10=46	24 	6+10+10+10+10=46	39 	6+17+25,5+25,5=74
10 	6+17+10=33	25 	6+17+10+10+10=53	40 	6+17+17+10+10=60
11 	6+17+17=40	26 	6+10+17+10+10=53	41 	6+17+17+10+17=67
12 	6+17+10+10=43	27 	6+10+10+17+10=53	42 	6+17+17+17+17=74
13 	6+17+25,5=48,5	28 	6+10+10+10+17=53	43 	6+17+10+10+10+10=63
14 	6+17+10+17=50	29 	6+10+10+10=36	44 	6+17+10+17+10+10=70
15 	6+17+10+10+10=53	30 	6+17+10+10=43	45 	6+17+17+17+17=74

 Eixo de tração
 Caminhão
 Cavalo-mecânico
 Carrocéria
 Reboque
 Semi-reboque

Figura 3 - Padrões e medidas homologadas para transporte de cargas

Após analisar as composições e suas cargas, ficou claro que a de número 39 seria a mais desfavorável, pois a carga total é a maior homologada e com distâncias menores entre os eixos, com isso as cargas teriam menos espaço para se dissipar antes de atingir o duto. Para a primeira situação, foi analisada posicionando o duto abaixo do eixo triplo central, de acordo com a figura 4.

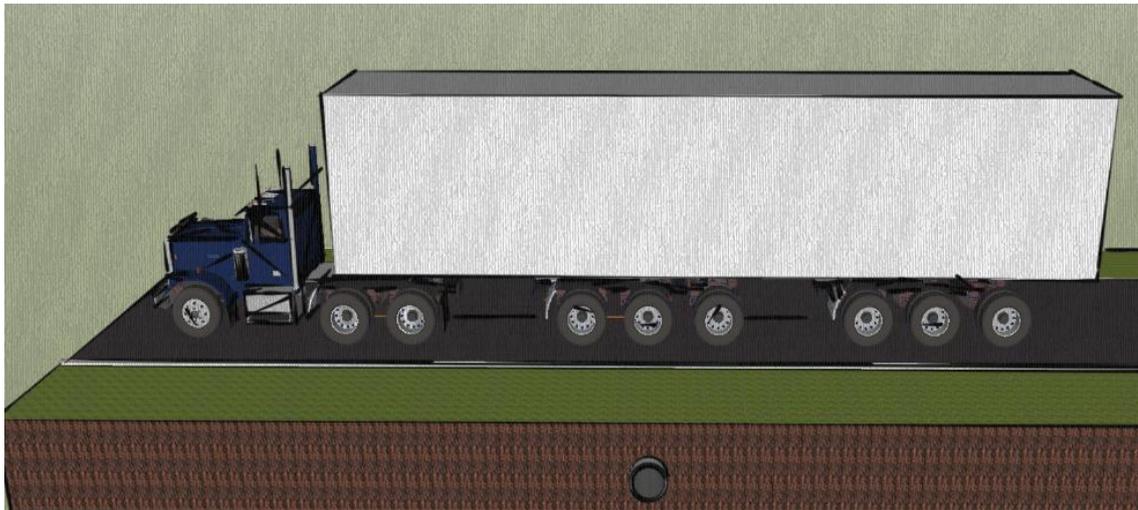


Figura 4 - Duto posicionado abaixo do eixo triplo central

Para a segunda situação, têm-se o duto localizado abaixo do eixo triplo traseiro do veículo, assim como mostra a figura 5.



Figura 5 - Duto localizado abaixo do eixo triplo traseiro

CAPÍTULO IV – INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

4.1 – Considerações Iniciais

Considerando a elaboração de um projeto de gasoduto enterrado, faz-se necessário um reconhecimento do subsolo, o qual o duto estará embutido. Tal reconhecimento pode ser feito através da investigação do subsolo, permitindo definir o perfil estratigráfico e estimar as propriedades geomecânicas do terreno em questão.

Para realização do projeto, considerou-se uma sondagem de percussão de um terreno no município de Campos dos Goytacazes (Anexo A), uma vez que a intenção do projeto é o estudo da transferência das cargas externas até o duto.

Com essa investigação, torna-se possível prever nesta obra do gasoduto, o comportamento do solo submetido às cargas experimentais. Uma vez que se tem um bom conhecimento do perfil estratigráfico, podem-se prever também as incertezas do projeto, as quais podem ser contornadas previamente.

Irá ser desconsiderada neste projeto, as camadas asfálticas de base, sub-base e revestimento da rodovia, levando todo dimensionamento geotécnico para uma situação mais desfavorável à segurança.

4.2 – Investigações de Subsolo

A função do solo neste projeto é estabilizar a estrutura nele apoiada e também, auxiliar na dissipação das tensões. Grande parte das tensões, que estão na superfície do terreno, são dissipadas antes de encontrar a parede do gasoduto.

Para elaboração do projeto foi utilizada a sondagem à percussão presente no Anexo A.

O ensaio SPT tem uma primeira utilidade na indicação da compactidade de solos granulares (areais e siltes arenosos) e da consistência de solos argilosos (argilas e siltes argilosos). A norma de sondagem SPT (NBR 6484) prevê que o boletim de sondagem forneça, junto com a classificação do solo, sua compactidade ou consistência de acordo com a figura 6. [4]

Este ensaio consiste em cravar verticalmente no solo, um cilindro de amostragem padrão (Figura 6), através de golpes de um bloco rígido com massa padronizada de 65 kg, o qual é solto em queda livre de uma altura de 75 cm.



Figura 6 – Amostrador da sondagem à percussão

Após várias quedas, o sondador anota o número de golpes necessários para cravar o amostrador em três etapas consecutivas de 0,15m de solo. O valor da resistência a penetração (N_{spt}) é o número de golpes aplicados na cravação dos 0,30 m finais. Após a sondagem do trecho escolhido, o amostrador é retirado e toda a amostra de solo é coletada a fim de ser realizada a classificação tátil visual.



Figura 7 – Sondagem à percussão

Após obter o resultado da sondagem, pode-se comparar o número de golpes do trecho escolhido com o tipo de solo existente, assim tem-se a classificação da camada de solo fazendo uma correlação com o N_{spt} (Figura 8).

Tab. 3.3

Solo	N	Compacidade/Consistência
Areias e siltes arenosos	< 4	Fofa(o)
	5 - 8	Pouco compacta(o)
	9 - 18	Medianamente compacta(o)
	19 - 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	< 2	Muito mole
	3 - 5	Mole
	6 - 10	Média(o)
	11 - 19	Rija(o)
	> 19	Dura(o)

Figura 8 - Classificação do solo

A partir da sondagem à percussão, encontrou-se que o N_{SPT} para a camada até 2,5 metros de profundidade era de 11 golpes. Portanto foi determinado que o solo é uma areia siltosa medianamente compacta.

4.3 – Análise e obtenção de parâmetros

Para o cálculo geotécnico utilizaremos diversos parâmetros do solo, entre eles o ângulo de atrito (ϕ), o peso específico (γ), o módulo de elasticidade do solo (E'), o coeficiente de empuxo (K_0) e o coeficiente de Poisson (ν)

Como não foi realizado nenhum ensaio de caracterização do solo, todos os parâmetros foram adquiridos por meio da correlação entre a bibliografia e o ensaio de sondagem à percussão.

Foram usadas as tabelas de correlação de parâmetros de resistência e deformabilidade em função do SPT, figura 9 [7] e a determinação do K_0 por H. P. Caputo, figura 10 [8].

Areias e Solos Arenosos					
Compacidade	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ °	E (t/m ²)	v
Fofa	1,6	0	25 - 30	100 - 500	0,3 a 0,4
Pouco Compacta	1,8	0	30 - 35	500 - 1400	
Medianamente Compacta	1,9	0	35 - 40	1400 - 4000	
Compacta	2,0	0	40 - 45	4000 - 7000	
Muito Compacta	> 2,0	0	> 45	> 7000	
Argilas e Solos Argilosos					
Consistência	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ °	E' (t/m ²)	v
Muito Mole	1,3	0 - 1,2	0	30 - 120	0,4 a 0,5
Mole	1,5	1,2 - 2,5	0	120 - 280	
Média	1,7	2,5 - 5,0	0	280 - 500	
Rija	1,9	5,0 - 15,0	0	500 - 1500	
Dura	> 2,0	> 15,0	0	> 1500	

Figura 9 - Parâmetros de Resistência e de deformabilidade em Função do SPT

k_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

	k_0
argila pré - adensada	0,7 a 0,75
areia natural	0,5
areia solta	0,4
areia compacta	0,6 a 0,75
argilas pastosas	1,0
água	1,0

Figura 10 - Correlação do K_0 com o SPT por (CAPUTO, 1997)

Portanto para fins de projeto de solo os dados utilizados foram:

$$\phi = 35^\circ$$

$$\gamma = 1900 \text{ kgf/m}^3 = 18,6 \text{ kN/m}^3$$

$$E' = 1400 \text{ t/m}^3 = 13720 \text{ kN/m}^2$$

$$K_0 = 0,4$$

$$\nu = 0,4$$

CAPÍTULO V – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E GEOTÉCNICO

5.1– Informações Iniciais

Neste projeto optou-se pela utilização de dutos flexíveis de aço, com a mesma especificação dos dutos do projeto GASVOL. Para análise, utilizou-se o comprimento unitário de 1m, afim de melhor estudo da situação crítica a qual o duto será exposto.

O duto é feito do aço API-5L-56, possui diâmetro de 0,4572m e espessura de 0,0079m. Todas essas dimensões estão representadas na figura 9.

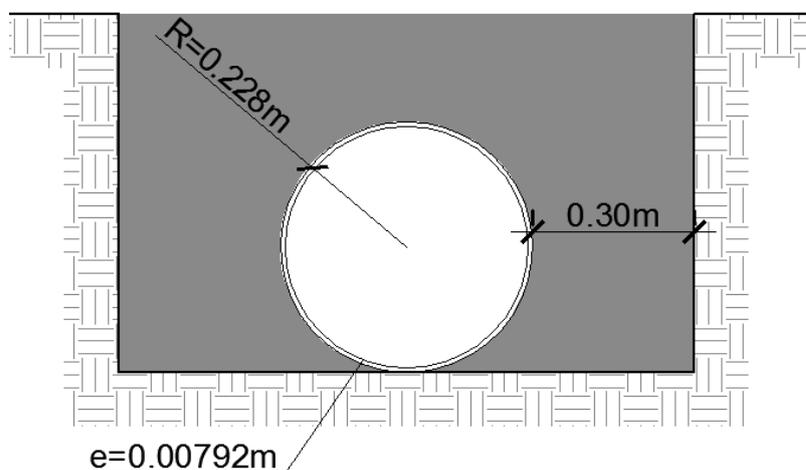


Figura 11 – Especificações do duto de aço.

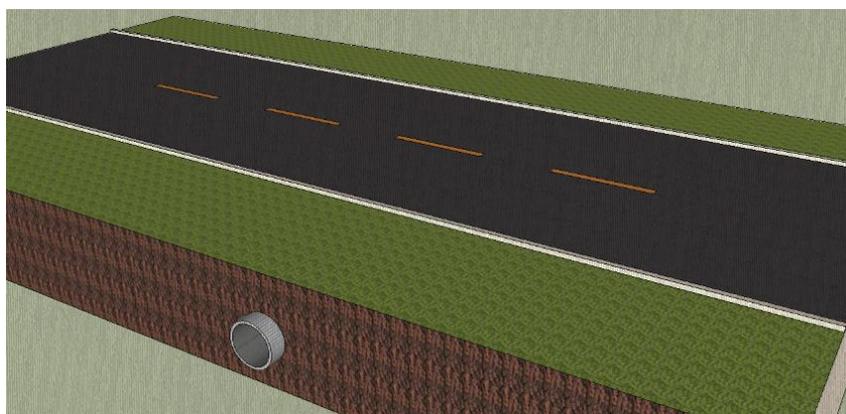


Figura 12 – Maquete virtual.

5.2 – Dimensionamento Estrutural Devido às Pressões Internas

Para melhor compreensão do duto e do material utilizados, foi feita uma revisão dos parâmetros que envolvem o dimensionamento estrutural do mesmo. Mesmo admitindo os parâmetros de um duto já utilizado nos dias de hoje, achou-se necessária essa verificação, pois devido a novos fatores externos, o duto poderá se comportar de uma forma diferente.

Primeiramente optou-se por um fator de segurança de 0,72.

Após escolhido o fator de segurança, pode-se minorar a tensão de escoamento do duto, obtendo assim a tensão admissível de norma. Usa-se a seguinte fórmula.

$$\sigma_{adm} = \sigma_y * FS \quad (1)$$

Sabendo que:

$$\sigma_y = 530.896,29 \text{ kPa [11]}$$

$$FS = 0,72$$

Logo:

$$\sigma_{adm} = 382.245,328 \text{ kPa}$$

Onde:

σ_{adm} = Tensão admissível de norma (kPa)

σ_y = Tensão de escoamento (kPa)

FS = Fator de segurança

Após esse passo, deve-se calcular a tensão devido à pressão interna, a fim de comparar com o valor encontrado anteriormente e verificar a segurança do duto devido aos esforços internos.

Optou-se pela pressão de operação do duto de 9.806,65 kPa, a qual é a pressão máxima admissível de operação de um gasoduto em operação, o GASVOL. [10].

Uma vez admitido o valor da pressão de operação, deve-se calcular a tensão devido à pressão interna do duto, usa-se a formula a seguir:

$$\sigma_{max} = \frac{P_i * D}{2 * e} \quad (2)$$

Sabendo que:

$$P_i = 9.806,65 \text{ kPa}$$

$$D = 0,4572 \text{ m}$$

$$e = 0,0079 \text{ m}$$

Logo:

$$\sigma_{max} = 283.772,18 \text{ kPa}$$

Onde:

σ_{max} = Tensão devido à pressão interna (kPa)

P_i = Pressão de Operação (kPa)

D = Diâmetro do duto (m)

e = Espessura do duto (m)

Com esse valor calculado, pode-se calcular a tensão circunferencial disponível, a qual nos mostra se o duto está seguro ou não.

$$\sigma_{cd} = \sigma_{adm} - \sigma_{max} \quad (3)$$

Sabendo que:

$$\sigma_{max} = 283.772,18 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{adm} = 382.245,328 \text{ kPa}$$

Logo:

$$\sigma_{cd} = 98.473,15 \text{ kPa}$$

Onde:

σ_{max} = Tensão devido à pressão interna (kPa)

σ_{adm} = Tensão admissível de norma (kPa)

Como o valor da tensão circunferencial disponível é aproximadamente 24% da tensão admissível pela norma, temos que o duto atende os padrões de segurança.

Por fim, tem-se que calcular a deflexão máxima diametral que o duto pode sofrer antes de romper, e compara-la com a norma (3,00%). Usa-se então a equação abaixo:

$$Máx_{dx} = 0,0416 * \frac{D}{e} * \frac{1}{100} \quad (4)$$

Sabendo que:

$$D = 0,4572\text{m}$$

$$e = 0,0079\text{m}$$

Logo:

$$Máx_{dx} = 2,40\%$$

Onde:

D = Diâmetro do Duto (m)

e = Espessura do Duto (m)

$Máx_{dx}$ = Máxima deflexão permitida

Logo, como a deflexão máxima calculada é menor do que a admitida pela norma, será utilizada a mesma a fim de favorecer a segurança.

5.3 – Dimensionamento Estrutural Devido à Carga de Solo e Sobrecarga

Para melhor compreensão do solo, foi executada uma sondagem a percussão para que assim fossem obtidos os parâmetros necessários para os cálculos geotécnicos. As tabelas de correlação utilizadas estão descritas no capítulo IV.

Primeiramente optou-se por determinar a profundidade de assentamento do duto. Para esse cálculo, devem-se calcular as tensões atuantes no duto em diversas profundidades, as quais têm como resultante a soma da carga de terra acima do duto e a carga transferida do meio externo para o duto. Após esta etapa, calculam-se as deflexões para as cargas encontradas, e assim determina-se a profundidade ideal de assentamento do duto. Para cálculo da carga de terra usamos a fórmula:

$$P_v = \gamma * c \quad (5)$$

Onde:

γ = Peso Próprio do Solo (kgf/m³)

P_v = Carga de Terra (kPa)

c = Cobertura de terra (m)

Foram analisadas as cargas totais para diversas coberturas de terra, e após essa etapa, calcularam-se todas as resultantes das cargas externas que são transferidas para o duto. Para isso, usa-se a teoria de Boussinesq:

$$\sigma_v = 0,48 * \frac{P}{c^2} \quad (6)$$

Onde:

σ_v = Tensão vertical atuante (kPa)

P = Carga pontual acima do duto (kN)

c = Cobertura de terra (m)

Após calcular a carga de terra e a carga aplicada, traçamos um gráfico que mostra como a soma dessas duas cargas se desenvolve de acordo com a profundidade.

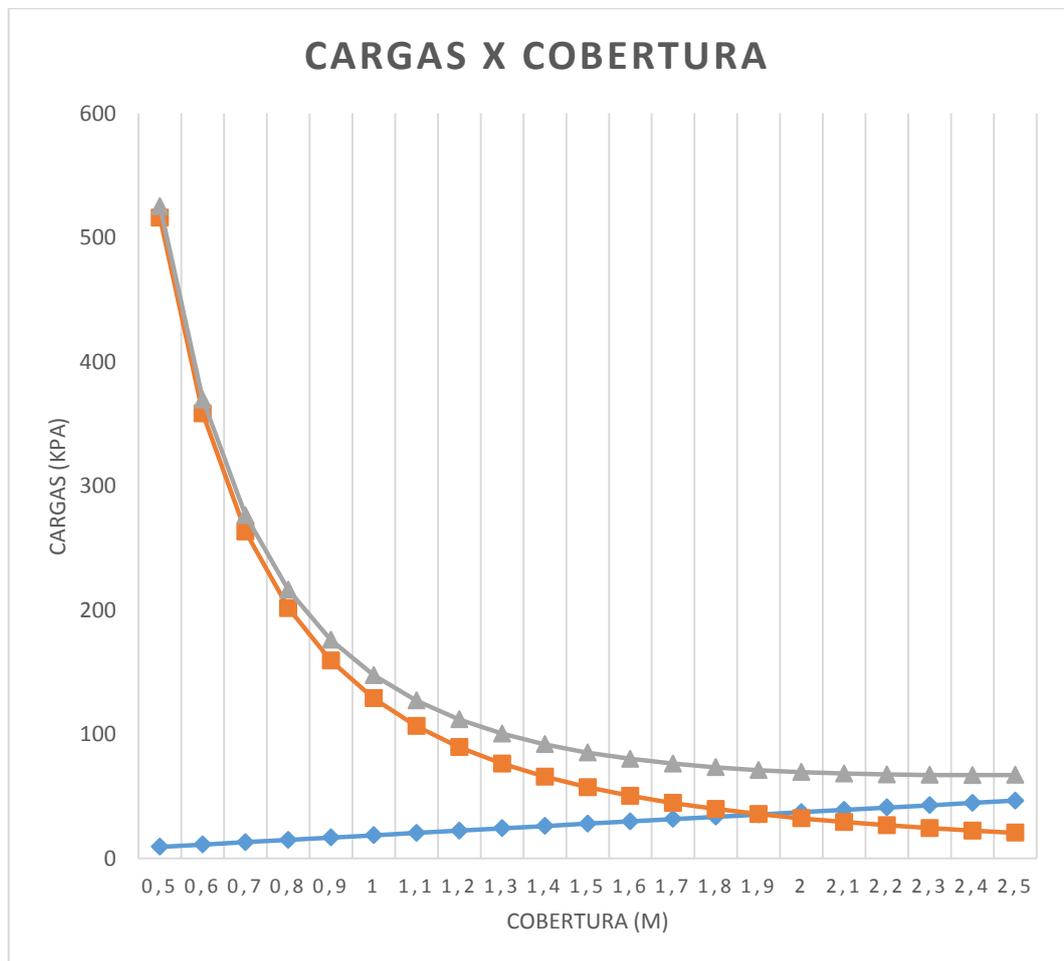


Figura 13 – Carga x Cobertura

Por fim, soma-se a carga de terra com a carga resultante vertical, e calcula-se as deflexões para as respectivas coberturas. A deflexão é dada pela fórmula de Spangler – Iowa

$$\Delta X = \frac{D_L * K * W_c * r^3}{E * I + 0,0061 * E' * r^3} \quad (7)$$

Onde:

ΔX = Deflexão horizontal

D_L = Fator de deflexão retardada

K = Constante de assentamento

W_c = Carga total atuante sobre o duto (kPa)

r = Raio de duto (m)

E = Módulo de elasticidade do material (kN/m²)

I = Momento de inércia do duto (m³)

E' = Módulo de elasticidade do material da vala (kN/m²)

Todos os resultados são apresentados na planilha localizada no Anexo B. Foi gerado um gráfico (figura 14) para melhor visualização das deflexões em relação à profundidade.

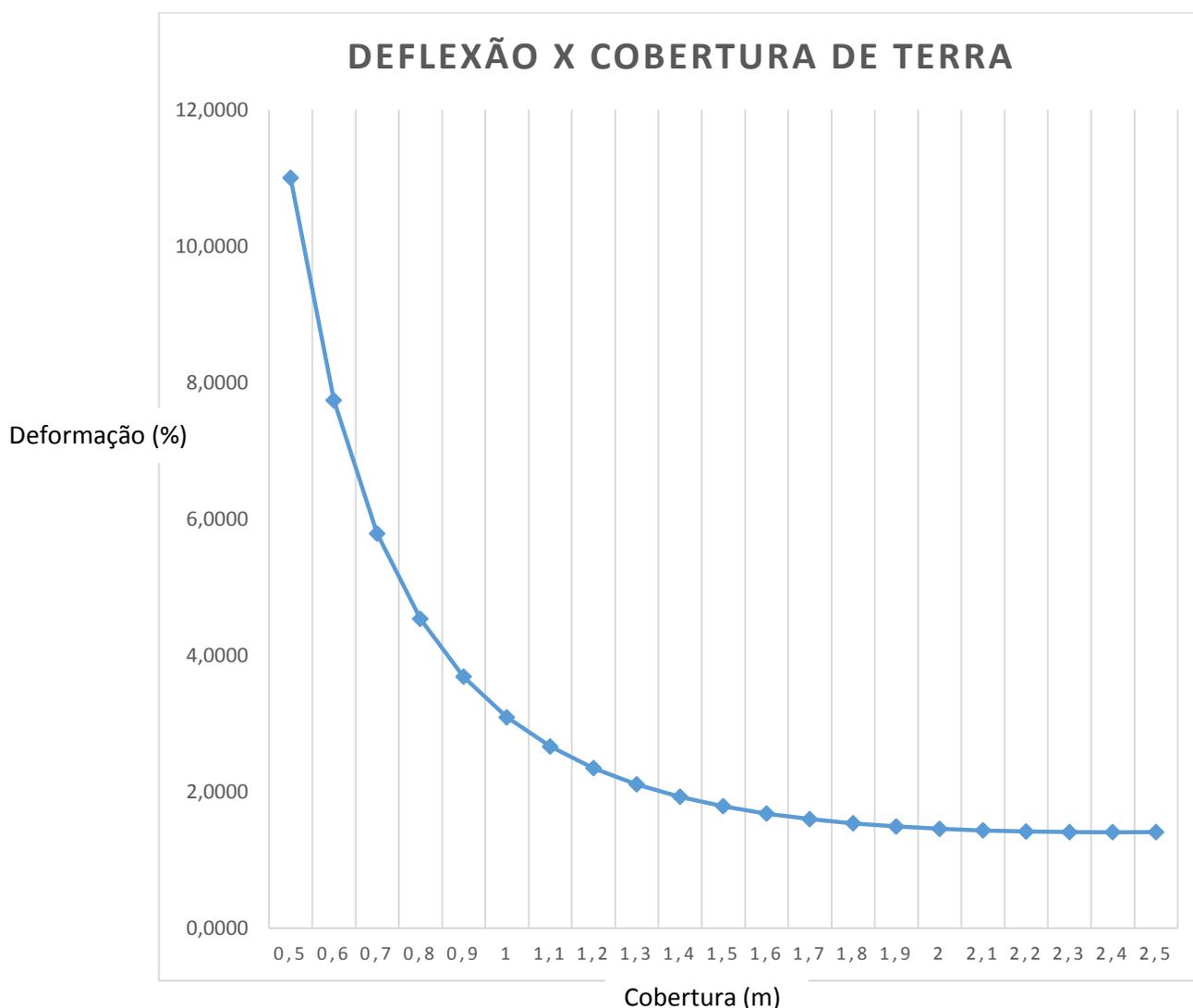


Figura 14 – Deformação x Cobertura.

A partir desse gráfico optou-se pela profundidade de 1,5m, pois é uma profundidade de boa trabalhabilidade e onde as cargas já começam a ser bem dissipadas causando uma deformação de 1,79% no duto.

Após a escolha da profundidade que será utilizada no projeto, irá ser analisada a situação real, a qual o duto terá sua integridade testada quando um caminhão de 2 eixos triplos e 1 duplo e 1 simples passar por cima dele.

Utilizou-se esse modelo de caminhão, pois é o pior tipo de carga que passará por cima do duto. Foi realizado um comparativo com os caminhões mais comuns no Brasil, a partir da figura 3.

Como se pode observar, foi escolhida a composição número 39, uma vez que ela apresenta a maior carga localizada em menor tamanho de carreta.

Foram estudadas duas situações críticas para a análise da deformabilidade do duto em relação às cargas transferidas para ele. A primeira situação a ser estudada, é quando o duto está localizado abaixo do eixo triplo central como mostrado na figura 4.

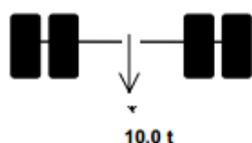
Para a segunda situação estudada, tem-se o duto localizado em baixo do último eixo triplo do caminhão, como na figura 5.

Todas as distâncias foram obtidas através da resolução do DNIT nº 12/98 artigo 1º. Foram usadas as distâncias mínimas, no propósito de maximizar a segurança do projeto.

EIXO / CONJUNTO DE EIXOS	RODAGEM	SUSPENSÃO	ENTRE-EIXOS (m)
Isolado	simples	-	-
Isolado	simples	-	-
Isolado	dupla	-	-
Duplo	simples	direcional	-
Duplo	dupla	tandem	>1,20 ou 2,40
Duplo	dupla	não em tandem	>1,20 ou 2,40
Duplo	simples+dupla	especial	1,20
Duplo	simples+dupla	especial	>1,20 ou 2,40
Duplo	Extralarga ⁽⁴⁾	pneumática	>1,20 ou 2,40
Triplo ⁽³⁾	dupla	tandem	>1,20 ou 2,40
Triplo ⁽³⁾	Extralarga ⁽⁴⁾	pneumática	>1,20 ou 2,40

Figura 15 – Relação de distancias entre eixos.

Para as cargas, usou-se a resolução do DNIT de nº 68 de 23/09/1998. Segue abaixo cada eixo e sua respectiva carga.



Resolução 12/98	10.000 kg
Resolução 104/99	+ 750 kg
TOTAL	10.750 kg

Figura 16 – Carga do eixo simples.

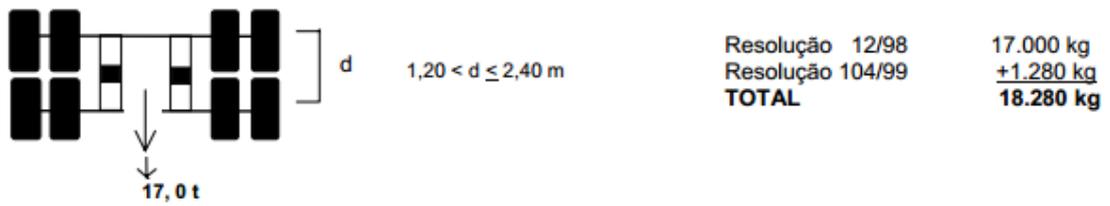


Figura 17 – Carga do eixo duplo.

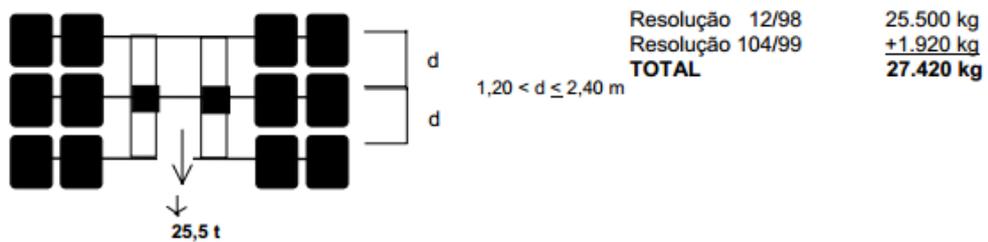


Figura 18 – Carga do eixo triplo.

As cargas resultantes no duto estão representadas no esquema abaixo, e cada uma delas tem o seu cálculo explicado a seguir.

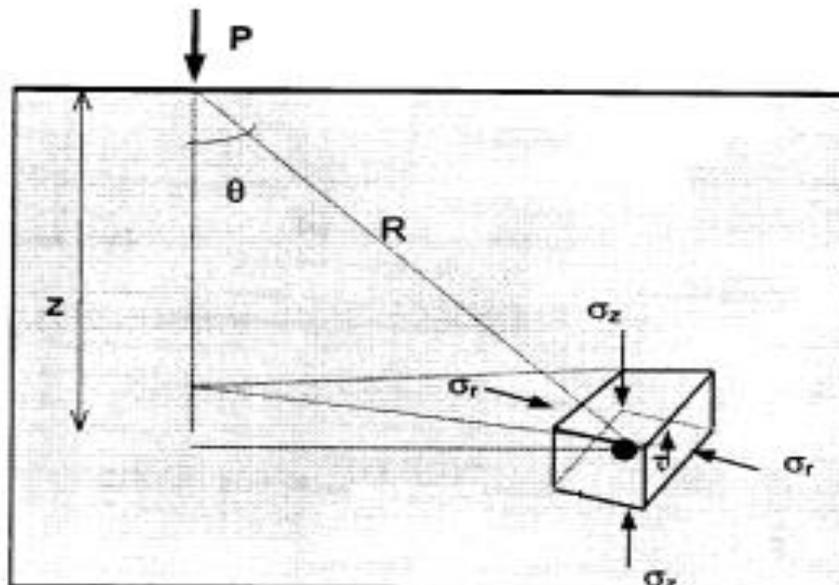


Figura 19 – Transferência de cargas no solo.

Usou-se a tensão vertical σ_z calculada anteriormente, uma vez que foi utilizada a carga do eixo triplo para o cálculo anterior. Para os eixo simples, duplo e triplo que não estão acima do duto, calcula-se acréscimo de tensão vertical que eles irão gerar sobre o duto pela equação abaixo.

$$\sigma_z = N_B * \frac{P_d}{c^2} \quad (8)$$

Onde:

σ_v = Tensão vertical atuante (kPa)

P_d = Carga pontual deslocada (kN)

c = Cobertura de terra (m)

N_B = Fator de relação r/z (figura 17)

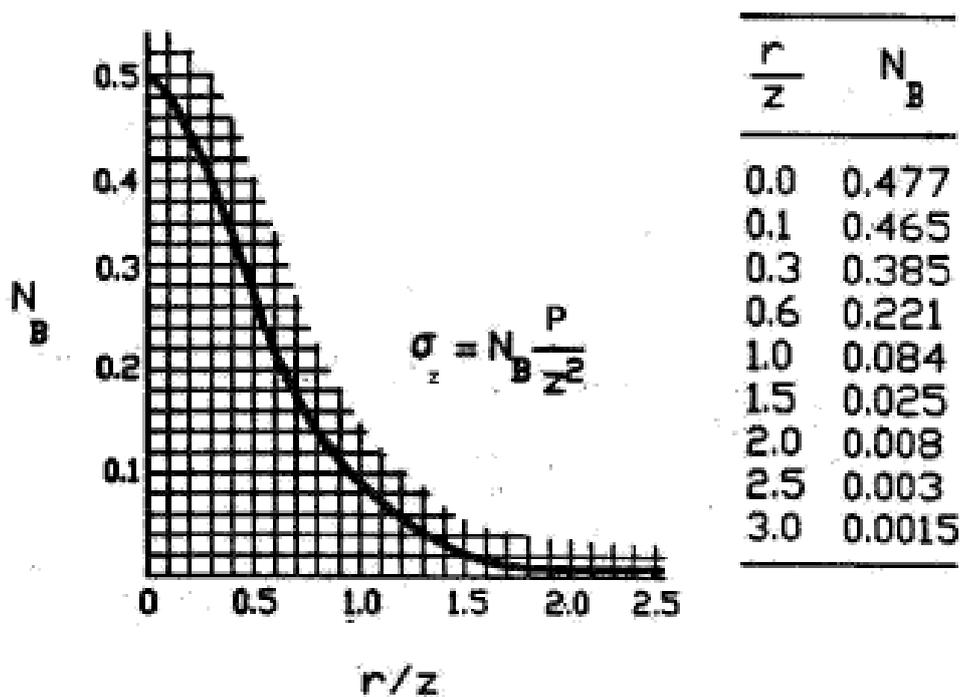


Figura 20 – Relação entre (r/z) e N_b .

Além das tensões verticais, existem acréscimos de tensão horizontais σ_{r1} e σ_{r2} causadas pelo deslocamento da carga, e também se tem σ_h , que é o acréscimo de tensão horizontal causado pelo solo. Usa-se a equação abaixo para o cálculo das tensões horizontais σ_{r1} e σ_{r2} .

$$\sigma_r = \frac{P_d}{2 * \pi * c^2} * [3 * \cos^3 \theta * \sin \theta - (1 - 2 * \nu) * \frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos \theta}] \quad (9)$$

Onde:

σ_r = Acréscimo de tensão horizontal (kPa)

P_d = Carga pontual deslocada (kN)

c = Cobertura de terra (m)

θ = Ângulo entre a carga deslocada e o duto. (Graus)

ν = Coeficiente de Poisson

Para o acréscimo de tensão horizontal causado pela carga de solo, usa-se a equação abaixo:

$$\sigma_h = \gamma_s * c * K \quad (10)$$

Onde:

σ_h = Acréscimo de tensão horizontal pelo solo (kPa)

γ_s = Peso específico do solo (kN/m³)

c = Cobertura de terra (m)

K = Coeficiente de empuxo do solo

Para a primeira situação, tem-se a presença de uma resultante das tensões verticais dadas pela soma da carga de terra (P_v), tensão vertical causada pelo eixo triplo acima do duto (σ_v) e o acréscimo de tensão causado pelos demais eixos afastados ($\sum \sigma_z$). Separam-se as cargas horizontais em duas, cargas da direita e cargas da esquerda, a fim de calcular separada a deflexão em cada ponto.

Do lado esquerdo tem-se como resultante a soma do acréscimo de tensões horizontais causadas pelas cargas afastadas ($\sum \sigma_r$) e a tensão horizontais causadas pelo solo (σ_h). Do lado direito tem-se a resultante causada pela da carga afastada (σ_r) e ae a tensão horizontais causadas pelo solo (σ_h).

A ilustração de todas as cargas atuantes no duto para esta primeira situação está dada na figura 21.

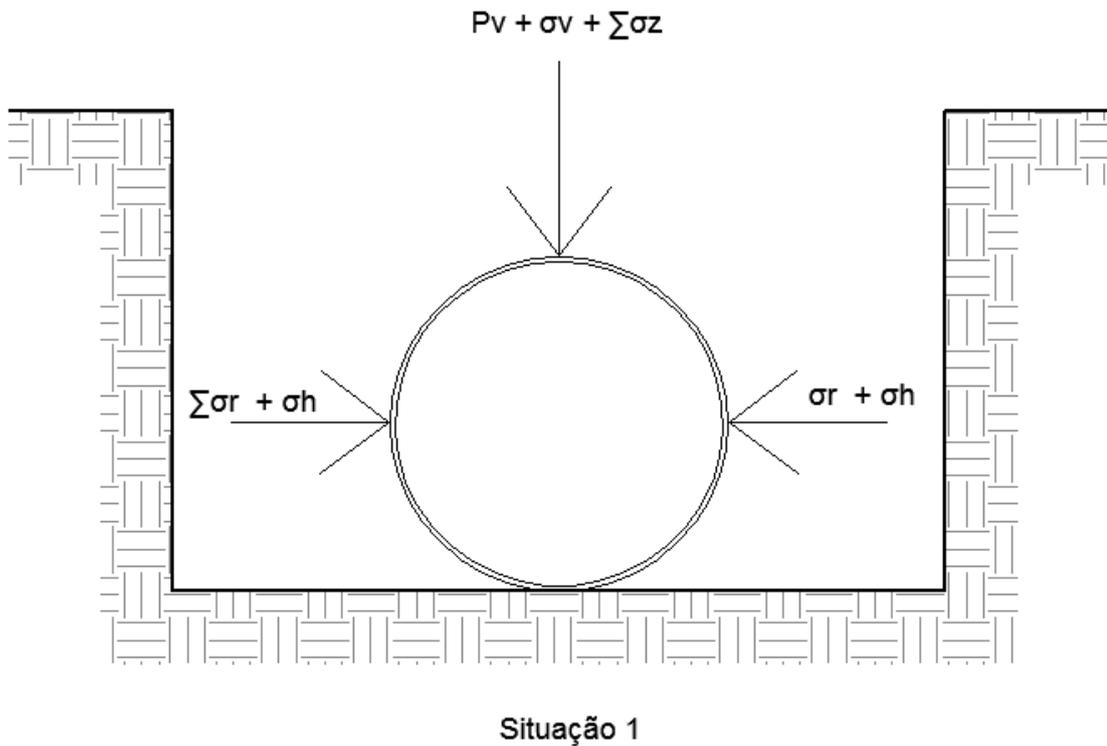
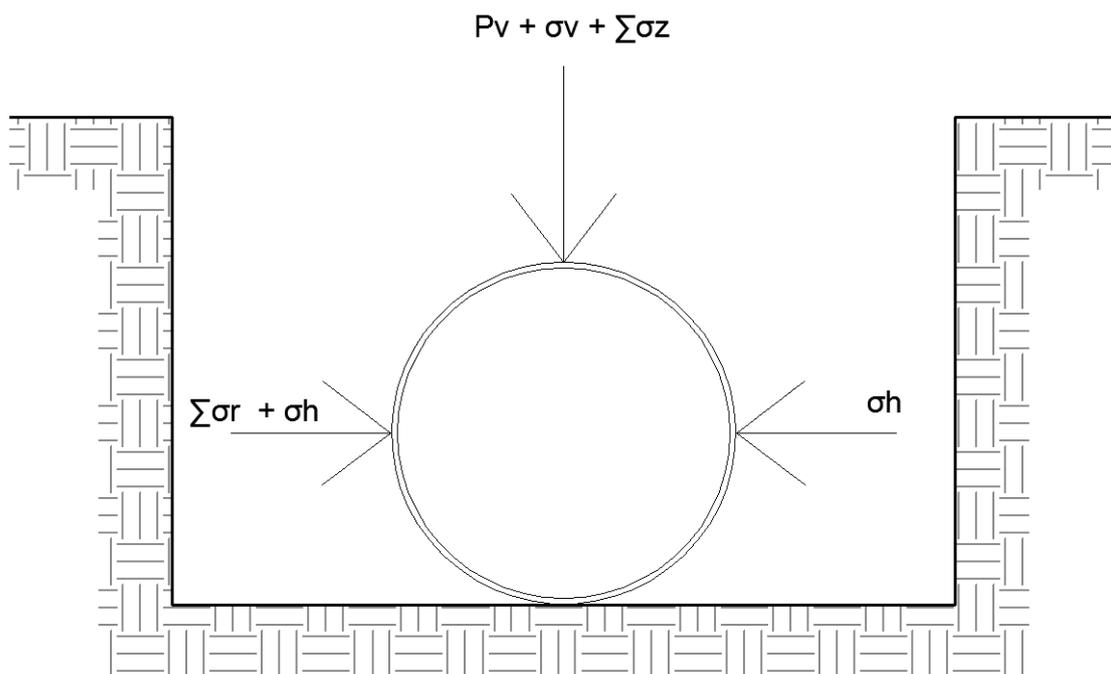


Figura 21 – Primeira situação.

Para a segunda situação, tem-se a presença de uma resultante das tensões verticais dadas pela soma da carga de terra (P_v), tensão vertical causada pelo eixo triplo acima do duto (σ_v) e o acréscimo de tensão causado pelos demais eixos afastados ($\Sigma \sigma_z$). Separam-se novamente as cargas horizontais em duas, cargas da direita e cargas da esquerda, a fim de calcular separada a deflexão em cada ponto.

Do lado esquerdo tem-se como resultante a soma do acréscimo de tensões horizontais causadas pelas cargas afastadas ($\Sigma \sigma_r$) e a tensão horizontais causadas pelo solo (σ_h). Do lado direito tem-se dessa vez, somente tensão horizontais causadas pelo solo (σ_h), uma vez que não há presença de nenhuma carga deste lado.

A ilustração de todas as cargas atuantes no duto para a segunda situação está dada na figura 22.



Situação 2

Figura 22 – Segunda situação.

Para análise das deformações, separa-se novamente o eixo esquerdo do direito do duto. Em ambos os lados para identificar a carga resultante que causa a deflexão do duto, diminui-se a resultante das tensões verticais da resultante das tensões horizontais, uma vez que ambas são opostas na solicitação da deformação do duto.

Com essa tensão resultante final, usa-se a equação de Spangler-Iowa para cálculo da deformação do duto. A deformação encontrada para a primeira situação foi de 1,94%, e para a segunda situação, encontrou-se uma deformação de 2,00%. Ambas as deformações são aceitáveis, uma vez que a deformação máxima calculada anteriormente é de 2,40%. Todos estes cálculos estão presentes nas planilhas, que se encontram nos anexos C e D.

5.4 – Capacidade de Carga do Solo Abaixo do Duto

O duto instalado a uma devida profundidade aplicará uma carga sobre o solo, o qual deverá possuir uma capacidade de carga que suporte a tensão aplicada, sem romper ou sofrer deformação exagerada.

As soluções para cálculo da capacidade de carga são bastante eficazes na previsão da resistência admissível do solo. Os principais métodos de cálculo da tensão admissível são as fórmulas de Terzaghi e Meyerhof, com contribuições de Hansen e Vesic. As fórmulas são determinadas a partir do mecanismo de ruptura o qual é função das características do solo.

Para esse projeto o duto será tratado como uma sapata corrida e a formulação de Terzaghi poderá prever a capacidade de carga do solo.

$$Q_{ult} = cN_c + \gamma H N_q + \gamma \frac{D}{2} N_\gamma \quad (11)$$

Onde:

c = Coesão do solo.

N_c, N_q, N_γ = Fatores de carga em função do ângulo de atrito.

γ = Peso específico do solo (kN/m³).

H = Profundidade de assentamento do duto (m).

D = Diâmetro do duto (m).

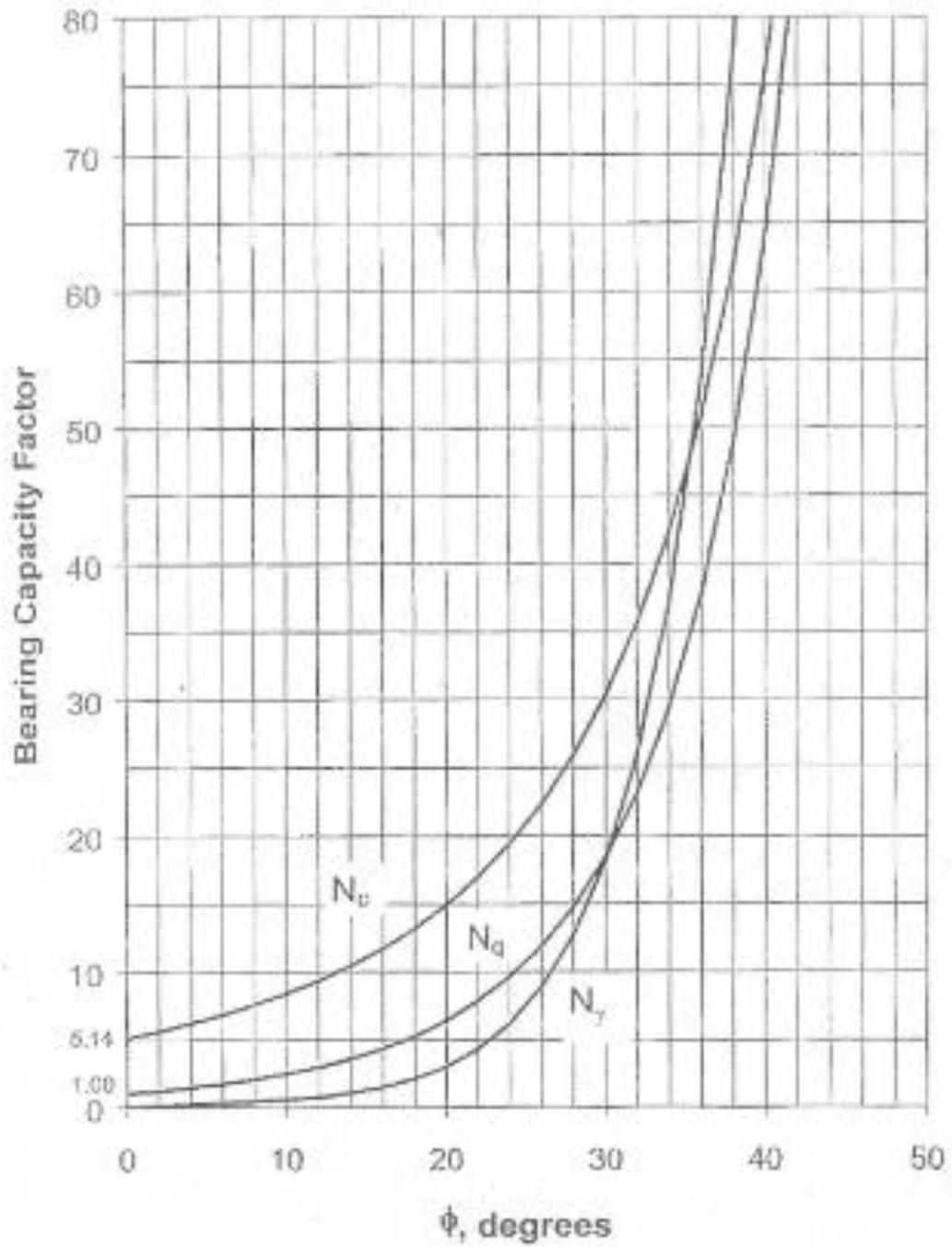


Figura 23 – Valor dos fatores de capacidade de carga (N_c , N_q , N_γ) em função do ângulo de atrito.

Sabendo que:

$$N_c = 47,5$$

$$N_q = 36$$

$$N_\gamma = 47$$

$$c = 0$$

$$\gamma = 19 \text{ kN}/\text{m}^3$$

$$D = 0,4572 \text{ m}$$

$$H = 2,0 \text{ m}$$

Então:

$$Q_{ult} = 1572,14 \text{ kPa}$$

A carga aplicada pelo duto no solo é determinada pela seguinte equação:

$$Q_{trab} = W_p g / A \quad (12)$$

Onde:

Q_{trab} = Carga aplicada

W_p = Peso próprio do duto;

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$ (Gravidade);

$A = 0,4572 \text{ m}^2$ (Área de aplicação da carga do duto no solo).

Para determinar o peso próprio do duto a equação abaixo deve ser aplicada.

$$W_p = \left(\frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi (d-e)^2}{4} \right) \times D \quad (13)$$

Onde:

$d = 0,4572 \text{ m}$ (Diâmetro externo do duto);

$e = 0,0079 \text{ m}$ (Espessura do duto);

$D = 7860 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Densidade do aço carbono do API-5L-56) [6].

Como resultado tem-se:

$$W_p = 87,92 \text{ kg}/\text{m}$$

$$\text{Logo: } Q_{trab} = 1,88 \text{ kN/m}^3$$

Assim poderemos calcular o fator de segurança para a capacidade de carga calculada, que se dá pela razão entre a carga última (Q_{ult}) e a carga de trabalho (Q_{trab}). Calculado o fator de segurança, $FS = 834$, podemos afirmar que o solo abaixo do duto não irá romper ou sofrer deformações bruscas devido ao peso do duto, uma vez que o fator de segurança está muito acima do mínimo determinado pela NBR-6122-2010.

5.4 – Efeito do Lençol freático

Dutos e reservatórios enterrados muitas vezes são colocados abaixo do lençol freático. Uma grande cobertura do solo pode evitar a flutuação, mas com pouca cobertura, medidas para fixar o duto ao solo, podem ser necessárias para evitar a flutuação. [5]

Como podemos reparar no perfil estratigráfico no Anexo A, o nível d'água se encontra a aproximadamente 4 metros de profundidade. Com o aumento das chuvas essa profundidade pode diminuir e é possível que o duto fique submerso à água.

Portanto, faz-se necessário analisar o efeito do empuxo no duto enterrado, para determinar se é preciso dimensionar uma fundação para evitar o arrancamento.

Tal verificação é feita com o equilíbrio das forças envolvidas. As quais são:

W_p = Peso próprio do duto por metro;

W_s = Carga de solo sobre o duto por metro;

W_w = Força vertical de baixo para cima por metro, gerada pelo empuxo da água.

A equação abaixo determinará se as forças geradas pela cobertura de solo e o peso próprio do duto serão suficientes para impedir a flutuação gerada pelo lençol freático.

$$\Delta W = W_w - W_p - W_s \quad (14)$$

Como foi calculado anteriormente o peso próprio do duto é:

$$W_p = 87,92 \text{ kg/m}$$

Para determinar a carga gerada pelo solo, faz-se necessário determinar a área de solo que influenciará sobre o duto, de acordo com a figura 24.

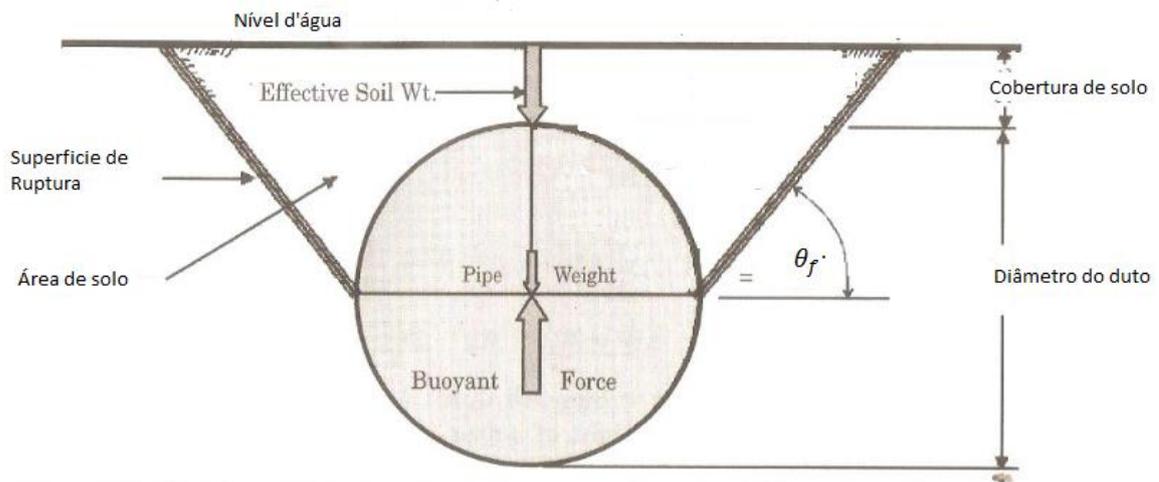


Figura 24 – Duto enterrado sob o efeito do levantamento do lençol freático.

A área será determinada pela equação abaixo:

$$A_{Total} = 2 \left[hR + 0,215R^2 + \frac{1(h+R)^2}{2 \tan\theta_f} \right] \quad (15)$$

Onde:

$h = 1,5 \text{ m}$ (Cobertura de solo);

$R = 0,2286 \text{ m}$ (Raio do duto);

$\theta_f = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ (Ângulo entre a superfície de ruptura e a horizontal);

$\varphi = 35^\circ$ (Ângulo de atrito).

Logo:

$$A_{total} = 2,26 \text{ m}$$

A carga gerada pelo solo sobre o duto é dada por:

$$W_s = A_{total}\gamma_b \quad (16)$$

Onde:

$$\gamma_b = 1900 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ (Massa específica do solo seco).}$$

Logo:

$$W_s = 2037,38 \text{ kg}/\text{m}$$

A força, de baixo para cima, gerada pelo empuxo da água do lençol freático é calculada pela equação abaixo:

$$W_w = \pi R^2 \gamma_w \quad (17)$$

Onde:

$$\gamma_w = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ (Massa específica da água).}$$

Logo:

$$W_w = 164,17 \text{ kg}/\text{m}$$

Aplicando a equação temos o resultado:

$$\Delta W = -1961,12$$

Conclui-se que o duto permanecerá posicionado a 1,5 metros de profundidade, pois as cargas do peso próprio do duto e do solo são muito superiores a força gerada pelo empuxo da água sobre o duto.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO

A instalação de um gasoduto localizado abaixo de uma rodovia é uma obra bem complexa, que necessita de um procedimento sequencial para ser executado de forma correta. O dimensionamento geotécnico e estrutural consiste em um procedimento sequencial, no qual a primeira etapa é a escolha no local a ser analisado.

Foi feito o cálculo para determinar se o duto suportaria a pressão interna gerada pelo material transportado. Concluímos que o duto suporta a pressão e ainda possui bastante tensão disponível antes de atingir a tensão de escoamento do aço.

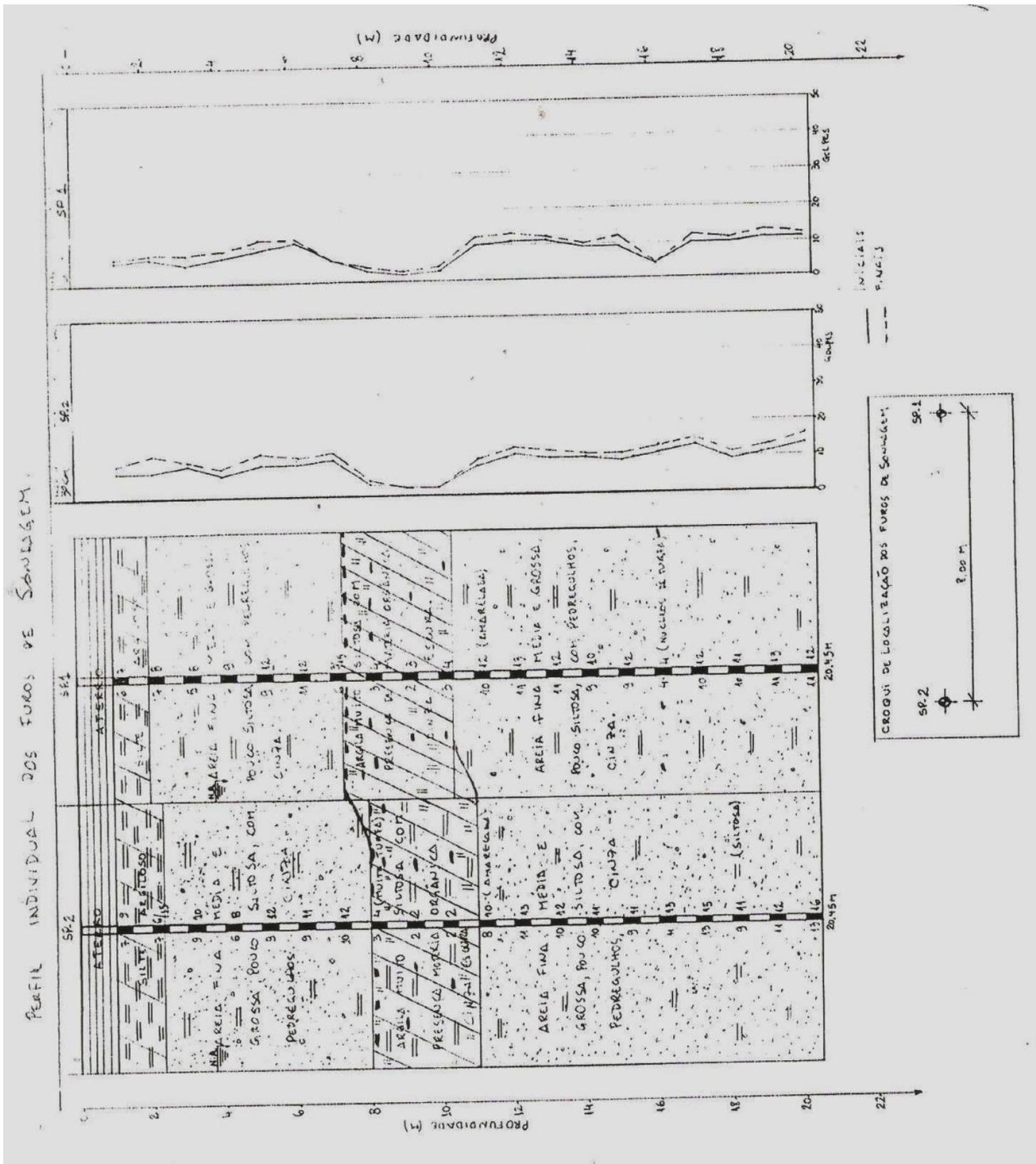
Para esse local será escolhido o melhor material para que o gasoduto sofra o mínimo possível às ações externas. Após essa etapa foi feita a inspeção do solo presente no local, obtendo assim todos os seus parâmetros.

Após ter conhecimento do solo e aplicar o método de Terzaghi, tratando o duto como uma sapara corrida, foi possível determinar um fator de segurança alto, o qual nos leva a concluir que o duto não causará a ruptura do solo onde for instalado.

Uma vez que os materiais e parâmetros foram obtidos, foi calculada a profundidade ideal da instalação do duto, por meio de uma carga experimental localizada acima do duto. Após essa profundidade ser escolhida, foi feito todo cálculo com as cargas reais que podem ser obtidas na rodovia para saber se o duto sofre uma deflexão aceitável.

Após a conclusão dos cálculos foi constatado que o trecho do gasoduto é seguro. Em um segundo momento, o levantamento causado pela variação da altura do lençol freático também foi considerado, e após a execução dos cálculos o duto se manteve seguro.

Anexo A – Relatório de Sondagem à Percussão



Anexo B – Cálculo de deflexões por cargas experimentais verticais

CoBERTura (m)	Carga de Terra (kPa)	Carga aplicada (kPa)	Carga Total (kPa)	Deflexão (m)	Deformação (%)
0,5	9,3	515,8	525,1	0,050297	11,00
0,6	11,2	358,2	369,4	0,035380	7,74
0,7	13,0	263,2	276,2	0,026455	5,79
0,8	14,9	201,5	216,4	0,020726	4,53
0,9	16,8	159,2	176,0	0,016854	3,69
1	18,6	128,9	147,6	0,014135	3,09
1,1	20,5	106,6	127,1	0,012170	2,66
1,2	22,3	89,5	111,9	0,010718	2,34
1,3	24,2	76,3	100,5	0,009627	2,11
1,4	26,1	65,8	91,9	0,008799	1,92
1,5	27,9	57,3	85,2	0,008165	1,79
1,6	29,8	50,4	80,2	0,007678	1,68
1,7	31,7	44,6	76,3	0,007306	1,60
1,8	33,5	39,8	73,3	0,007023	1,54
1,9	35,4	35,7	71,1	0,006810	1,49
2	37,2	32,2	69,5	0,006655	1,46
2,1	39,1	29,2	68,3	0,006546	1,43
2,2	41,0	26,6	67,6	0,006476	1,42
2,3	42,8	24,4	67,2	0,006437	1,41
2,4	44,7	22,4	67,1	0,006425	1,41
2,5	46,6	20,6	67,2	0,006435	1,41

Anexo C – Cálculo de deflexões para a situação 1

Situação 01 - Duto localizado abaixo do eixo triplo central												
Para Cobertura de:	1,5	Metros		Distância	Nb	Tensão Vert.	Carga de terra	Tensão Vert. Total	Tensão Horizontal	Tensão Horiz. total	Tensão Resultante	Deflexão
r/z	Hipotenusa			(m)		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	(m)
1,60	2,83019434	Eixo Simples	2,40	0,007	0,20	27,93	27,93	28,1267	1,5300	12,7020	15,4246	0,001477
0,80	1,920937271	Eixo Duplo	1,20	0,12	9,55	27,93	27,93	37,4817	10,4421	21,6141	15,8676	0,001520
0,80	1,920937271	Eixo Triplo	1,20	0,12	14,33	27,93	27,93	42,2576	15,6632	26,8352	15,4224	0,001477

Situação Crítica								
Primeira Situação	Tensão Vertical	Tensão Horizontal (1)	Tensão Horizontal (2)	Tensão Resultante (1)	Tensão Resultante (2)	Deflexão (1)	Deflexão (2)	Deformação Máxima
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	(m)	(m)	(%)
	115,9340	23,1441	38,0072	92,7899	77,9268	0,008887926	0,007464262	1,94

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] http://www.contrans.com.br/lmgs/tabela_padroes_e_medidas_homologadas.png
Acesso em 05/12/2013 – 19h35
- [2] Silva P. M. 2004. Modelo de transporte em rede com restrições de capacidade: Estudo de alternativas na área de influencia do gasoduto Bolívia Brasil. 125 p. Tese (Ciencias em planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ.
- [3] Udaeta M. M., Galvão L. C. R., Rodrigues R. G. B. GEPEA-USP – Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP.
- [4] VELLOSO, D. D. A.; LOPES, F. D. R. **Fundações**. 1º. ed. Oficina de Textos, v. Único, 2011.
- [5] MOSER, A.; FOLKMAN, S. **Buried Pipe Design**. 3º. ed. McGraw Hill Professional, 2008.
- [6] <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8525/000578533.pdf?sequence=1>
Acesso em 26/12/2013 – 17h29
- [7] <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF03-Par%C3%A2metros-dos-Solos-para-C%C3%A1culo-de-Funda%C3%A7%C3%B5es.pdf>
Acesso em 26/12/2013 – 17h32
- [8] <http://www.civilnet.com.br/Files/MecSolos2/Empuxos%20de%20Terra.pdf>-
[26/12/2013 – 18h05](#)
Acesso em 26/12/2013 – 18h05
- [9] Diniz C. P. e Vieira L. D. 2011. Projeto Para Instalação de Dutos Enterrados.

[10] <http://www.jusbrasil.com.br/diarios/715754/pg-145-secao-1-diario-oficial-da-uniao-dou-de-29-09-2006>

Acesso em 18/01/14 – 09h53

[11] http://www.woodcousa.com/line_pipe_properties.htm

Acesso em 18/01/2014 – 10h30