

# Tensões em Dutos Enterrados Atravessando Línguas Coluvionares

*Leila Ferreira Figueiredo<sup>1</sup>*  
*Emil de Souza Sánchez Filho<sup>2</sup>*

## Resumo

Este artigo analisa o sistema solo-duto, por meio do estudo das tensões ocorridas longitudinalmente no ORBIG (oleoduto Angra dos Reis – Duque de Caxias) e no OLAPA (oleoduto Araucária – Paranaguá), localizados em áreas com características comuns. Uma dessas características é que esses oleodutos atravessam uma encosta com inclinação acima de 10°, e a outra é que o solo nesses pontos são encostas constituídas por depósitos coluvionares sobrepostos sobre solo residual, e estão em áreas específicas (língua coluvionar) de escoamento lento.

Para acompanhar o comportamento solo-duto nesses locais foram instalados instrumentos de medição com a finalidade de realizar o acompanhamento dos movimentos das encostas e as deformações nos dutos.

Nas áreas estudadas foram instalados extensômetros em várias seções ao longo dos dutos, que fornecem as leituras das deformações específicas longitudinais. Essas leituras foram obtidas em seções que distam umas das outras aproximadamente 30 m, e os três sensores foram instalados em cada seção numa profundidade que varia entre 2 m e 3 m.

Os dados de campo foram analisados e calculadas as tensões em diversas seções dos dutos, de modo a se ter parâmetros para estudar as condições de segurança e durabilidade desses dutos, estudando-se a interação solo + duto.

**Palavras-chave:** Análise de Tensões; Dutos Enterrados; Instrumentação de Campo; Oleodutos.

## 1 Introdução

Uma das regiões desse estudo fica em Coroa Grande município de Mangaratiba, Rio de Janeiro onde passa o oleoduto ORBIG que transporta petróleo. Essa região tem um movimento de massa coluvionar da ordem de 2 mm/ano (ALMEIDA *et al.*, 2003). O regime pluviométrico do local mostrou uma quantidade de chuva acumulada de 1896 mm.

Este duto está a uma profundidade que varia, no trecho de Coroa Grande, entre 1,8 m e 3,0 m e atravessa uma encosta constituída por depósitos coluvionares e tálus-colúvio, sobrepostos ao solo residual, cujos movimentos estão sendo monitorados desde 1985.

A parte superior da encosta é composta de um paredão rochoso íngreme com 200 m de altura, com seu ponto mais alto na cota 470 m. A encosta apresenta inclinação média de 15° abaixo desse paredão. A vegetação existente é bastante diversificada, com muitas bananeiras, principalmente à montante do duto. O manto coluvionar, em geral micáceo, tem espessura

variando entre 4 m e 22 m. O solo residual tem espessura variando entre 4 m e 11 m e está assentado sobre rocha de gnaiss. Existem no local muitos matacões e blocos de rocha na superfície e em profundidade, tanto no colúvio quanto no solo residual, chegando os blocos a 18 m de largura na superfície do terreno.

Em virtude das movimentações observadas várias obras foram realizadas no local ao longo dos anos, tais como: execução de drenagem subhorizontal em diversos pontos; construção de canaletas para escoamento das águas superficiais oriundas do paredão rochoso; cortinas atirantadas, entre outras.

No ano de 2000 instalaram-se novos instrumentos a fim de monitorar as movimentações e analisar o sistema solo + duto. Mesmo com as intervenções realizadas os movimentos continuam a ocorrer.

Na análise do comportamento do ORBIG são estudadas a instrumentação e as leituras do km 48 + 300 ao 48 + 500. Foram instalados cinco piezômetros

1 Engenheira, Geomecânica, leila.figueiredo@geomecanica.com.br

2 Professor do PPGEC da Universidade Federal Fluminense, emilsanchez@uol.com.br

de corda vibrante, sendo três no km 48 + 300 e dois no km 48 + 500, quatro inclinômetros do tipo eletrônível, sendo dois em cada quilômetro, e ao longo de todo o trecho do oleoduto foram instalados extensômetros de corda vibrante num total de dezoito seções, sendo em cada uma delas instalados três sensores, distribuídos dez no quilômetro 48 + 300 e oito no km 48 + 500. O ORBIG transporta petróleo e tem comprimento de 123 km. A Tabela 1.1 mostra um resumo das características físicas e geométricas do ORBIG.

O OLAPA é um oleoduto que transporta derivados de petróleo da REPAR até o terminal da empresa no Porto de Paranaguá. Está situado próximo à rodovia BR-277, município de Morretes – PR, pertence à cadeia de montanhas Serra do Mar e encontra-se no trecho do km 57+200. Esse duto rompeu em consequência de um movimento de massa coluvionar da ordem de 1,4 cm/dia, onde o regime pluviométrico da região é superior a 1800 mm de chuva, segundo relato de SOARES e MUSMAN (2001).

O local ficou conhecido como “Ponto Zero” após esse rompimento ocorrido num período de chuvas intensas. O movimento da encosta foi acelerado, provocando um acréscimo de tensões no duto, levando-o a ruptura. Após esse acidente optou-se por uma instrumentação em tempo real no duto (extensômetros), na encosta (instrumentação geotécnica) e instalação de pluviômetros elétricos. No local da ruptura o duto atravessava uma massa coluvionar com movimentos predominantemente paralelos ao seu eixo.

*“O acréscimo de tensões devido à movimentação provocou a ruptura do duto, chegando a uma distância de afastamento das duas extremidades da tubulação de aproximadamente 30 cm no dia do acidente, o que dá uma idéia do nível de tensões a que o duto estava submetido”* (SOARES e MUSMAN, 2001).

A geomorfologia apresenta relevo montanhoso, com afloramentos rochosos nas cotas mais elevadas. *“Há suscetibilidade a movimentos de massa como corridas de detritos e escorregamentos. Estes movimentos podem ser uma consequência da própria dinâmica de evolução das encostas. Com o aumento do índice pluviométrico, no período que vai de novembro a março, algumas áreas são consideradas como de alto potencial para a ocorrência de escorregamentos translacionais sobre os planos das superfícies de rocha. Estes movimentos envolvem solo e rocha, e podem ocorrer mesmo sem a interferência de fatores externos, como alteração da geometria original das encostas.”* (SUZUKI, 2004).

Na seção geotécnica da encosta foram identificados um depósito de solo coluvionar com SPT variando entre 3 e 10. O material é composto por argila siltosa com espessura variável entre 4 e 21 m. O solo residual apresenta SPT superior a 10 aumentando com

a profundidade, com compacidade variando de média a alta. O solo residual é composto por silte arenoso, com espessura entre 5 e 12 m nas cotas mais elevadas. Sob o solo residual foi encontrada rocha alterada de migmatito. A inclinação média da encosta é de 13°.

No OLAPA foram instalados cinco piezômetros de corda vibrante, dois inclinômetros do tipo eletrônível, e na superfície do oleoduto foram instalados extensômetros de corda vibrante num total de 16 seções, sendo em cada uma delas instalados três sensores. O OLAPA transporta GLD, Diesel, Gasolina e Nafta e tem um comprimento de 93,5 km. As características físicas e geométricas do OLAPA estão descritas na Tabela 1.2.

## 2 Medições de Campo

### 2.1 Relação entre tensão e deformação específica

O valor da deformação específica lido é fornecido em microstrain ( $\mu m$ ), mas esse valor não representa a deformação específica total da peça ou a variação de deformação específica. Existem dois motivos para isso: primeiro porque o fio já se encontra pré-tracionado, e segundo porque pode haver uma deformação específica inicial na peça antes da instalação do medidor de deformação.

Portanto, deve ser realizada uma leitura de referência após a instalação do medidor de deformação. O valor de referência deve ser subtraído dos valores lidos para se calcular as variações de deformação específica da peça, dada por:

$$\Delta \mu \varepsilon = \mu \varepsilon_{\text{lido}} - \mu \varepsilon_{\text{referência}} \quad (2.1)$$

onde

$\Delta \mu \varepsilon$  = variação da deformação específica ( $\mu m$ ) a partir do valor de referência;

$\mu \varepsilon_{\text{lido}}$  = leitura do transdutor específico ( $\mu m$ );

$\mu \varepsilon_{\text{referência}}$  = leitura de referência ( $\mu m$ ).

Os medidores de deformação estão disponíveis em três faixas de deformação: deformação por compressão, deformação por tração e faixa intermediária.

TIMOSHENKO (1944) fornece as expressões para o cálculo das tensões longitudinais e transversais:

$$\sigma_l = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_3) \quad (2.2)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_3 + \nu \varepsilon_1) \quad (2.3)$$

sendo

$\sigma_l$  = tensão longitudinal a tubulação;  
 $\sigma_t$  = tensão transversal a tubulação;  
 $\varepsilon_1$  = deformação específica longitudinal ao duto;  
 $\varepsilon_3$  = deformação específica transversal ao duto;  
 E = módulo de elasticidade do material;  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson do material.

Nesse trabalho são estudados os extensômetros instalados na direção longitudinal do duto, assim serão calculados somente a tensão longitudinal, levando-se em consideração somente as deformações específicas externas, então optou-se por calcular as tensões admitindo-se  $\varepsilon_{ext} = 0$  e  $\varepsilon_c = \varepsilon_{ext}$ , assim:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{ext} E}{1 - \nu^2} \quad (2.4)$$

onde

$\sigma$  = tensão na parede do duto;  
 $\varepsilon_{ext}$  = deformação específica externa (admitindo-se  $\varepsilon_{ext} = \varepsilon_{corrigida}$ );  
 $\varepsilon_{corrigida}$  = deformação específica lida menos a primeira deformação específica lida  
 E = módulo de elasticidade do material;  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson do material.

## 2.2 Tabelas com leituras máximas

Apresentam-se a seguir o resultado das análises das leituras dos extensômetros realizadas no ORBIG nos anos de 2004 a 2009 e no OLAPA nos anos de 2003 a 2010, nas seções posicionadas na língua coluvionar (Tabela 2.1).

**Tabela 1.1** – Características físicas e geométricas do ORBIG.

Parâmetro	Valor
Diâmetro Externo [mm] / Raio (mm)	1016 / 508
Espessura de parede [mm]	11,13
Raio de curvatura [m]	17,5
Tipo de aço	API 5L X52
Tensão de escoamento $f_y$ [MPa]	358
Módulo de Elasticidade E [GPa]	207
Coeficiente de Poisson	0,29
Coeficiente de expansão térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$1,17 \times 10^{-5}$
Temperatura de operação [ $^{\circ}\text{C}$ ]	80 (105)
Pressões máximas de operação:	
Pressão inicial [MPa] / Pressão final [MPa]	5,0 / 3,5

**Tabela 1.2** – Características físicas e geométricas do oleoduto OLAPA.

Parâmetro	Valor
Diâmetro externo [mm] / Raio (mm)	480 / 240
Espessura de parede [mm]: (km 0,0 ao km 36,5 / km 36,5 ao km 75,9 / km 75,9 ao km 93,5)	6,35 / 7,92 / 9,52
Raio de curvatura [m]	17,5
Tipo de aço	API 5L X46
Tensão de escoamento ( $f_y$ ) [MPa]	317
Módulo de Elasticidade (E) [GPa]	207
Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,29
Coeficiente de expansão térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$1,17 \times 10^{-5}$
Pressões máximas de operação:	
– Sentido REPAR (Pressão inicial [MPa] / Pressão final [MPa])	4,1 / 1,25
– Sentido Paranaguá (Pressão inicial [MPa] / Pressão final [MPa])	10,0 / 8,0

**Tabela 2.1** – Posicionamento das línguas coluvionares.

Local	Língua	Seção de início da língua	Seção fim da língua
ORBIG	1	Entre a seção 48.300-03 e 48.300-04	Seção 48.300-10
	2	Entre a seção 48.300-09 e 48.300-10	Entre a seção 48.500-06 e 48.500-07
OLAPA	1	Entre a seção 57.200-05 e 57.200-06	Seção 57.200-13

**Tabela 2.2** – Leituras ORBIG.

Sensor	Data da leitura	$\Delta\mu\varepsilon_{\text{corrigido}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ (MPa)	Pluviosidade (mm)	Tensão
48.300-031	16/12/05	766,84	173,31	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	16,22	3,67	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	16/12/05	766,84	173,31	0	Maior tensão calculada
	18/04/05	-39,39	-8,90	3,05	r tensão calculada
48.300-032	12/01/09	834,45	188,59	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	163,09	36,86	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	12/01/09	834,45	188,59	0	Maior tensão calculada
	18/04/05	50,18	11,34	3,05	Menor tensão calculada
48.300-033	24/10/06	804,65	181,86	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	331,42	74,90	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	15/12/07	808,24	182,67	0,51	Maior tensão calculada
	18/04/05	191,73	43,33	3,05	Menor tensão calculada
48.300-041	01/05/08	776,64	175,53	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	178,73	40,39	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	02/05/09	784,97	177,41	2,79	Maior tensão calculada
	18/04/05	122,63	27,72	3,05	Menor tensão calculada
48.300-042	13/07/09	763,58	172,58	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	510,90	115,47	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	13/07/09	763,58	172,58	0	Maior tensão calculada
	23/03/05	54,47	12,31	19,81	Menor tensão calculada
48.300-043	13/07/09	763,58	172,58	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	374,41	84,62	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	13/07/09	763,58	172,58	0	Maior tensão calculada
	25/11/05	22,29	5,04	10,41	Menor tensão calculada
48.300-091	13/07/09	763,88	172,64	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	438,22	99,04	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	02/05/09	784,97	177,41	2,79	Maior tensão calculada
	24/08/06	113,60	25,68	0	Menor tensão calculada
48.300-092	13/07/09	763,88	172,64	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	195,00	44,07	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	13/07/09	763,88	172,64	0	Maior tensão calculada
	30/11/06	-117,76	-26,61	0,25	Menor tensão calculada
48.300-093	13/07/09	763,88	172,64	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	79,34	17,93	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	13/07/09	763,88	172,64	0	Maior tensão calculada
	19/04/05	-375,58	-84,88	0	Menor tensão calculada

continua...

...continuação

Sensor	Data da leitura	$\Delta\mu\varepsilon_{\text{corrigido}}$ ( $\mu m$ )	$\sigma$ (MPa)	Pluviosidade (mm)	Tensão
48.300-101	13/07/09	763,88	172,64	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	407,73	92,15	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	02/05/09	784,97	177,41	2,79	Maior tensão calculada
	18/04/05	252,74	57,12	3,05	Menor tensão calculada
48.300-102	24/05/08	332,68	75,19	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	237,78	53,74	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	15/04/08	334,47	75,59	2,03	Maior tensão calculada
	18/04/05	159,50	36,05	3,05	Menor tensão calculada
48.300-103	13/05/08	372,11	84,10	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	274,45	62,03	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	18/12/07	385,26	87,07	2,54	Maior tensão calculada
	01/11/07	50,45	11,40	0,76	Menor tensão calculada
48.500-061	23/05/08	882,64	199,48	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	52,62	11,89	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	17/12/07	890,69	201,30	0,25	Maior tensão calculada
	19/04/05	1,00	0,23	0	Menor tensão calculada
48.500-062	21/07/09	848,48	191,76	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	62,31	14,08	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	21/07/09	848,48	191,76	0	Maior tensão calculada
	05/04/07	0,53	0,12	3,56	Menor tensão calculada
48.500-063	21/07/09	842,86	190,49	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	493,63	111,56	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	21/07/09	842,86	190,49	0	Maior tensão calculada
	18/04/05	-27,27	-6,16	3,05	Menor tensão calculada
48.500-071	16/12/05	875,64	197,90	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	785,87	177,61	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	20/12/07	885,80	200,20	7,62	Maior tensão calculada
	27/12/04	524,33	118,50	0	Menor tensão calculada
48.500-072	13/07/09	763,88	172,64	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	328,06	74,14	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	13/07/09	763,88	172,64	0	Maior tensão calculada
	13/11/07	200,83	45,39	2,54	Menor tensão calculada
48.500-073	13/07/09	763,88	172,64	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	24/10/07	452,61	102,29	66,29	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	13/07/09	763,88	172,64	0	Maior tensão calculada
	15/04/05	396,63	89,64	0	Menor tensão calculada

Nas Tabelas 2.2 e 2.3 tem-se a variação da deformação específica corrigida e suas tensões calculadas. Nesse caso tem-se tensão máxima calculada em dia seco (pluviosidade igual a zero), tensão máxima calculada em dia chuvoso (a maior pluviosidade lida no sensor) e a maior e menor tensão calculada.

### 3 Tensões no Duto

#### 3.1 Tensões nos dutos

A razão entre as tensões obtidas com as leituras das deformações específicas nos extensômetros situados a  $120^\circ$  ( $\sigma_{12}$ ) em relação ao sensor  $0^\circ$  ( $\sigma_{11}$ ), é dada por:

**Tabela 2.3** – Leituras OLAPA.

Sensor	Data da leitura	$\Delta\mu\varepsilon_{\text{corrigido}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ (MPa)	Pluviosidade (mm)	Tensão
57.200-051	12/10/07	138,85	31,38209	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-163,52	-36,957	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	12/10/07	138,85	31,38209	0	Maior tensão calculada
	03/10/06	-384,29	-86,8531	0	Menor tensão calculada
57.200-052	01/09/09	84,49	19,0954	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	8,16	1,844918	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	07/10/09	149,46	33,77991	0,25	Maior tensão calculada
	08/10/06	-467,99	-105,77	0,25	Menor tensão calculada
57.200-053	26/09/09	155,70	35,19123	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-6,12	-1,38351	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	08/10/09	163,74	37,00729	0,76	Maior tensão calculada
	11/06/07	-333,58	-75,3936	0	Menor tensão calculada
57.200-061	27/05/07	134,60	30,42068	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-323,61	-73,1392	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	27/05/07	134,60	30,42068	0	Maior tensão calculada
	09/04/03	-456,77	-103,233	-	Menor tensão calculada
57.200-062	01/09/09	28,20	6,373947	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-44,25	-10,001	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	07/10/09	55,41	12,52515	0,25	Maior tensão calculada
	17/02/10	-140,38	-31,7272	5,08	Menor tensão calculada
57.200-063	01/09/2009	32,11	7,258951	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/2006	-54,27	-12,2674	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	07/10/2009	52,32	11,82676	0,25	Maior tensão calculada
	17/06/2007	-180,18	-40,7236	0,25	Menor tensão calculada
57.200-131	07/08/06	28,25	6,384763	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-339,31	-76,6873	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	07/08/06	28,25	6,384763	0	Maior tensão calculada
	09/04/03	-472,83	-106,864		Menor tensão calculada
57.200-132	31/03/06	-289,36	-65,3986	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-251,28	-56,7919	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	01/04/06	-289,63	-65,4585	0,25	Maior tensão calculada
	04/10/07	-33,92	-7,66669	0	Menor tensão calculada
57.200-133	15/06/07	100,92	22,81055	0	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia seco
	17/02/06	-191,44	-43,2687	41,15	$\sigma_{\text{máx}}$ calculada em dia chuvoso
	10/01/05	364,02	82,27215	5,08	Maior tensão calculada
	27/06/07	-480,62	-108,624	0,25	Menor tensão calculada

$$n1 = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} \quad (3.1)$$

$$n2 = \frac{\sigma_{13}}{\sigma_{11}} \quad (3.2)$$

De igual modo tem-se para o extensômetro situado a 240° ( $\sigma_{13}$ ) em relação ao sensor 0° ( $\sigma_{11}$ ):

No ORBIG a razão entre os valores calculados com as leituras fornecidas pelos extensômetros é

pequena, isto é, a razão entre as tensões varia de 1 a 20 com alguns picos. Esses picos são vistos nos três primeiros meses de 2005 onde se verifica que  $\sigma_{12} > 800 \sigma_{11}$  e  $\sigma_{13} > 1400 \sigma_{11}$ . No início do ano de 2005, em janeiro e fevereiro choveu com frequência, com a pluviosidade variando de 0,5 mm a 25,15 mm nesses dois meses. Em agosto e setembro do mesmo ano, temos  $n1 = n2$  (as tensões  $\sigma_{12} > 20 \sigma_{11}$  e  $\sigma_{13} > 20 \sigma_{11}$ ) e  $\sigma_{12} < -2700 \sigma_{11}$  e  $\sigma_{13} < -1000 \sigma_{11}$ . Depois houve um pico em março e abril de 2006 ( $\sigma_{12} > 150 \sigma_{11}$  e  $\sigma_{13} > 300 \sigma_{11}$ ) e outro pico no final de julho de 2006 ( $\sigma_{12} < -2700 \sigma_{11}$  e  $\sigma_{13} < -1100 \sigma_{11}$ ).

Em abril de 2007  $n1 = -2500$  e  $n2 = -1100$  e em outubro do mesmo ano  $n1 = n2 = 200$ . Como explicação tem as chuvas nesse período e essas seções se encontrarem dentro das duas línguas. Para as outras seções essas situações permanecem, porém, com diferenças grandes nos valores. Nesses casos os valores de  $n1$  e  $n2$  passam a ser menores que a unidade inclusive nos picos, somente na seção 48.500-06  $n1 = n2 = 10$  e nos picos  $n1 = 80$  e  $n2 = 20$  (janeiro de 2006),  $n1 = 200$  e  $n2 = 70$  (abril de 2007) e  $n1 = 120$  e  $n2 = 25$  (maio de 2007).

No OLAPA a razão entre as tensões com as leituras obtidas nos sensores é constante e próxima da unidade, durante todo o período das leituras. Em alguns dias os valores de  $n1$  e  $n2$  tiveram picos que variavam entre -5 e 10. Isso mostra que os valores correspondentes a tensão a  $120^\circ$  com relação a  $240^\circ$  e com relação a  $0^\circ$  são semelhantes.

No mês de maio de 2007 ocorreu um pico na seção 57.200-05, quando  $n1 = -5$  e  $n2 = -0,5$ , isso ocorre novamente em junho de 2007, porém, os sinais são positivos e de julho a agosto de do mesmo ano os resultados são  $n1 = 1,5$  e  $n2 = 3$ .

Nos casos de picos, como maio de 2007, as chuvas foram de 0,25 mm a 8,38 mm, em junho de 2007

a máxima de chuva foi de 0,25 (número baixo) e que não influencia no movimento (a não ser uma chuva acumulada, o que não é o caso). De julho a agosto de 2007 a pluviosidade foi de 0,25 a 2,79 mm. Nos anos de 2004 a 2007 a chuva foi de 0,25 mm a 41,15 mm (maior leitura) e de 2008 a 2010 foi de 0,25 a 16 mm, verifica-se que choveu mais no ano de 2003 a 2007, períodos de maiores picos nas tensões.

### 3.2 Análises da interação solo + duto

Para a análise da interação solo + duto será realizado um estudo das forças do solo e dos movimentos longitudinal/lateral do duto.

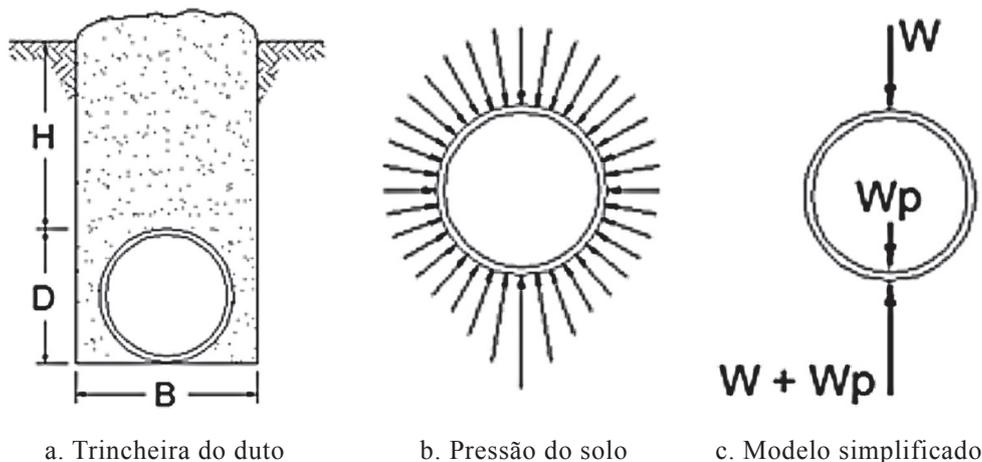
Como os dois dutos em estudo estão enterrados serão analisadas inicialmente, as tensões atuantes sobre o duto (Figura 3.1). A Figura 3.1 (a) mostra uma seção típica dos dutos ORBIG e OLAPA enterrados, e a Tabela 3.1 indica os parâmetros utilizados nos dois casos.

**Tabela 3.1** – Parâmetros de ORBIG e OLAPA.

Dimensões	ORBIG	OLAPA
D (m)	1,016	0,480
H (m)	2,90	3,69
$e_t$ (m)	0,01113	0,00792
Atubo (m <sup>2</sup> )	0,776	0,169

A Figura 3.1(b) mostra a pressão que o solo exerce sobre o duto, originando uma flexão sobre a parede do duto e ao mesmo tempo gerando uma força de atrito contra qualquer movimento axial do duto. A Figura 3.1(c) apresenta um modelo simplificado da força normal para o cálculo da força de atrito.

A força de atrito é a primeira força que afeta o movimento do duto, sendo dada por:



**Figura 3.1** – Distribuição da pressão do solo.

$$f = \mu(W + W + W_p) \quad (3.3)$$

Como a profundidade do solo é cerca de uma a três vezes o diâmetro da tubulação, a força  $f$  é o peso da sobrecarga do solo sobre a tubulação:

$$W = \gamma DH \quad (3.4)$$

Substituindo-se a expressão (3.4) na expressão 3.3 tem-se para a força de atrito:

$$f = \mu(2\gamma HD + W_p) \quad (3.5)$$

onde

$f$  = força de atrito em  $kN/m$ ;

$\mu$  = coeficiente de atrito entre o duto e o solo;

$\gamma$  = peso específico do solo de reaterro em  $kN/m^3$ ;

$D$  = diâmetro externo do duto em  $m$ ;

$H$  = profundidade de cobertura do solo até o topo do duto em  $m$ ;

$W$  = peso da sobrecarga do solo sobre o duto em  $kN/m$ ;

$W_p$  = peso do duto  $P_t$  + peso do revestimento  $P_r$  + peso do seu conteúdo  $P_p$  em  $kN/m$ .

O coeficiente de atrito do solo silte arenoso adotado é 0,35. O peso específico do solo de reaterro adotado será  $18,7 \text{ kN/m}^3$ .

Para dutos enterrados abaixo da superfície da água o empuxo deve ser subtraído do peso do solo e do duto antes de aplicar a expressão 3.3. Nesse caso os dois dutos estão acima da superfície da água.

Para o peso do tubo  $P_t$  seguem-se:

$$P_t = \pi(D - e_t)e_t\gamma_t \quad (3.6)$$

$$P_r = \pi(D + e_r) \cdot e_r \cdot \gamma_r \quad (3.7)$$

onde

$P_t$  = peso unitário do tubo em  $kN/m$ ;

$e_t$  = espessura nominal de parede do tubo em  $m$ ;

$\gamma_t$  = peso específico do aço para tubos, igual a  $78,5 \text{ kN/m}^3$ ;

$P_r$  = peso unitário do revestimento,  $kN/m$ ;

$e_r$  = espessura do revestimento, igual a  $0,004 \text{ m}$  para o polietileno de tripla camada;

$\gamma_r$  = peso específico do revestimento, igual a  $10 \text{ kN/m}^3$  para o polietileno de tripla camada.

Para o peso do produto  $P_p$  tem-se:

$$P_p = \frac{\pi}{4}(D - 2e_t)^2\gamma_p \quad (3.8)$$

onde

$P_p$  = peso unitário do produto transportado em  $kN/m$ ;

$e_t$  = espessura nominal de parede do tubo em  $m$ ;

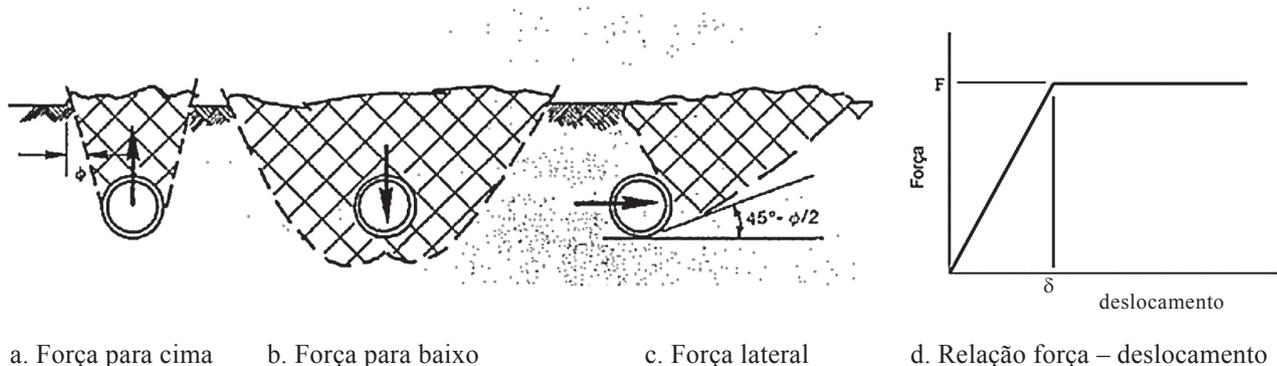
$\gamma_p$  = peso específico do produto transportado em  $kN/m^3$ .

O duto do ORBIG transporta petróleo com peso específico de  $880 \text{ kg/m}^3$  e o OLAPA transporta GLD, Diesel, Gasolina e Nafta com pesos específicos variando entre  $830 \text{ kg/m}^3$  e  $850 \text{ kg/m}^3$ , nesse caso o valor utilizado será de  $850 \text{ kg/m}^3$ , ou  $86 \text{ kN/m}^3$  para o petróleo e  $83 \text{ kN/m}^3$  para o diesel.

A Tabela 3.2 mostra os resultados obtidos com as expressões anteriores.

**Tabela 3.2** – Resultados obtidos para ORBIG e OLAPA.

Forças	ORBIG	OLAPA
$P_t$ (kN/m)	2,76	0,92
$P_r$ (kN/m)	0,13	0,06
$P_p$ (kN/m)	66,70	14,04
$W_p$ (kN/m)	69,59	15,03
$f$ (kN/m)	62,92	28,44



**Figura 3.2** – Forças laterais do solo (PENG, 1978).

A Figura 3.2 mostra três forças laterais (empuxos) geralmente encontradas na análise de dutos. Na Figura 3.2 (a) temos o empuxo vertical, na Figura 3.2 (b) o peso e na Figura 3.2 (c) o empuxo ativo ou passivo. A Figura 3.2 (d) representa a relação força-deslocamento para a reação lateral do solo com dois estágios para as forças laterais: estágio elástico, onde a resistência é proporcional ao deslocamento do duto e estágio plástico, no qual a resistência permanece constante independentemente do deslocamento (PENG, 1978).

Nos dois casos em estudo o duto se movimentou horizontalmente, Figura 5.43 (c), daí surge uma pressão passiva (empuxo passivo) no solo na superfície frontal, e uma pressão ativa (empuxo ativo) do solo da superfície posterior. Devido a ação do arco um vazio se forma atrás do duto quando de um pequeno deslocamento, e nesse caso a pressão acima do solo é desconsiderada (PENG, 1978).

A única força lateral é o empuxo passivo do solo:

$$U = \frac{1}{2} \gamma (H + D)^2 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3.9)$$

onde

$U$  = força lateral ou empuxo do solo em  $kN/m$ ;

$\phi'$  = ângulo de atrito do solo.

A Expressão 3.9 é válida para  $H < D$ , pois superestima a resistência para coberturas de solo mais profundas. Entretanto, para uma cobertura profunda de 3D num solo granular, a estimativa supera a variação em somente 10%. (OVESEN, 1972).

Embora a constante elástica possa ser avaliada diretamente pelos testes ou pelos métodos publicados (TERZAGHI, 1950), são em geral muito sensíveis aos dados coletados, sendo mais confiável o cálculo a partir do empuxo. O deslocamento necessário para se alcançar o empuxo é de aproximadamente 1,5 a 2% da profundidade do fundo da tubulação (OVESEN, 1972).

A constante elástica pode ser calculada a partir do empuxo tomando-se 1,5% da profundidade total como deslocamento de sedimentos. Utilizando-se 1,5% ao invés de 2% se obtém um resultado mais realista que irá subestimar o deslocamento inicial, porém, de algum modo superestimar em maior deslocamento. Para um duto a subavaliação da situação inicial é compensada pela pouca compactação do reaterro que acarreta numa maciez inicial.

Tomando-se 1,5% da profundidade total como deslocamento tem-se para a constante elástica em  $kN/m^2$ :

$$K = \frac{U}{0,015(H + D)} \quad (3.10)$$

Os parâmetros geotécnicos do solo do ORBIG e do OLAPA são mostrados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** – Parâmetros geotécnicos no ORBIG e no OLAPA.

Local	Coesão (c)	Ângulo de atrito ( $\phi'$ )	Fonte
ORBIG	0,8 kPa	18,6°	SUZUKI, 2004
OLAPA	15 kPa	30°	FREITAS, 2004

A análise do movimento longitudinal da tubulação tem como incógnita a flexibilidade que surge com a expansão da tubulação. A primeira etapa de análise da flexibilidade é determinar o movimento longitudinal. Quando o duto começa a se movimentar devido aos movimentos lentos da língua coluvionar, surge nessa região uma força de atrito  $f$ , e ao mesmo tempo uma resistência  $Q$  se desenvolve devido à força acima do solo e da rigidez do duto. A parte móvel do duto se estenderá gradualmente para baixo até um ponto onde o movimento cessa. Nesse caso tem-se o comprimento ativo do movimento  $L$ :

$$L = \frac{F_a - Q}{f} \quad (3.11)$$

**Tabela 3.4** – Tensões máximas (positivas e negativas) no ORBIG e no OLAPA.

Local	Sensor	Data	$\Delta \varepsilon_{\text{corrigida}}$ ( $\mu m$ )	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Pluviosidade (mm)
ORBIG	48.300-023	22/02/08	1210,67	273,62	10,16
	48.300-093	19/04/05	-375,58	-84,88	0
OLAPA	57.200-133	10/01/05	364,02	82,27	5,08
	57.200-022	26/03/10	-538,03	-121,60	2,29

$$F_a = \sigma_1 A_e \quad (3.12)$$

onde

$L$  = comprimento ativo em m;

$F_a$  = força de ancoragem ou força de expansão em  $kN/m$ ;

$Q$  = força de resistência final em  $kN/m$ ;

$f$  = força de atrito em  $kN/m$ ;

$\sigma_1$  = tensão na parede do duto em MPa;

$A_e$  = área do tubo em contato com o medidor de deformação igual a  $5,07 \times 10^{-5}$  em  $m^2$ .

Adotando-se como tensão na parede do duto a maior tensão (negativa e positiva) obtida a partir das deformações específicas lidas em todas as seções, será a maior tensão do ORBIG e do OLAPA (Tabela 3.4). Esses valores não pertencem necessariamente a mesma seção. Os resultados para as forças de expansão  $F$  e do comprimento ativo estão na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5** – Valores da força de expansão e do comprimento ativo no ORBIG e no OLAPA.

Local	$\sigma_{\max}$ (MPa)	F (kN/m)	L (m)
ORBIG	273,62	13,87	-6,32
	-84,88	-4,30	-6,61
OLAPA	82,27	4,17	-21,96
	-121,6	-6,16	-22,33

O comprimento ativo do duto mostra a parte móvel do duto, e nesse caso como a tensão máxima tanto no ORBIG quanto no OLAPA é menor do que a força de resistência do solo tem-se esses valores negativos de comprimento, o que mostra que o movimento lento do talude tem grandes influências sobre o duto.

O deslocamento final  $y$  ocorrido no duto devido aos movimentos lentos das línguas coluvionares é dado por:

$$y = \frac{1}{2AEf} (F - Q)^2 \quad (3.13)$$

Para a força de resistência  $Q$  aplicaremos a fórmula de TERZAGHI, 1943 é dada por:

$$Q = \frac{\gamma}{2} (H + D)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45 + \frac{\varphi'}{2} \right) D + \quad (3.14)$$

$$\frac{(H + D)^3 \gamma K_0 \operatorname{tg} \varphi'}{3 \operatorname{tg} \left( 45 + \frac{\varphi'}{2} \right)}$$

Para o cálculo das expressões 3.9 e 3.14, usaram-se a Tabela 3.3 e as expressões da Teoria de Rankine para terraplenos inclinados, seguindo-se para o coeficiente do empuxo ativo:

$$k_a = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \quad (3.15)$$

e para o coeficiente do empuxo passivo

$$k_p = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \quad (3.16)$$

onde

$\beta$  = ângulo do talude;

$\varphi'$  = ângulo de atrito do solo.

Na Tabela 3.6 apresentam-se os resultados dos coeficientes de empuxo ativo e passivo para ORBIG e OLAPA.

**Tabela 3.6** – Coeficientes do empuxo ativo e passivo no ORBIG e no OLAPA.

Local	$\beta$	$\varphi'$	$k_a$	$k_p$
ORBIG	15°	18,6	0,65	1,43
OLAPA	13°	30°	0,36	2,62

Na Tabela 3.7 temos os resultados para o empuxo do solo  $U$ , a constante elástica do solo  $K$  e da força de resistência final do solo  $Q$  do ORBIG e do OLAPA.

**Tabela 3.7** – Empuxo do solo, constante elástica do solo e força de resistência final do solo.

Local	U (kN/m)	K (kN/m <sup>2</sup> )	Q (kN/m)
ORBIG	277,44	4727,39	411,58
OLAPA	487,76	7797,90	628,86

Como resultados para o deslocamento final  $y$  no duto nas regiões de língua coluvionar tanto no ORBIG como no OLAPA, calculados pela expressão 3.11, tem-se:

- 12 a 13 cm no ORBIG,
- 65 a 68 cm no OLAPA.

Para dutos 100% enterrados a carga de ruptura e sua relação com o empuxo final é dada pela expressão 3.14 dada por MENDONÇA e FARFÁN (2011), assim:

$$P_h = S_u D \left( \frac{\pi}{2} \right) + \left( \frac{1}{8} \pi D^2 \gamma + W_p \right) \quad (3.17)$$

onde

$S_u$  = resistência não drenada ao cisalhamento em  $kN/m^2$ ;

$P_h$  = carga de ruptura em  $kN/m$ ;

$\gamma$  = peso específico do solo em  $kN/m^3$ .

Quando  $H > D$  adota-se  $H_c$  e como nos dois casos estudados isso ocorre, utiliza-se a altura  $H_c$ , que seria 2,90 m e 3,69 m para ORBIG e OLAPA, respectivamente.

Para ORBIG com o solo silte arenoso, NSPT entre 3 e 7, e nesse caso tem-se uma resistência não drenada ao cisalhamento  $S_u$  de 30  $kN/m^2$ , dado obtido de DIAS, 2012. Para OLAPA tem-se uma argila pouco arenosa mole com NSPT entre 4 e 5 e  $S_u$  adotado de 25  $kN/m^2$  (DIAS, 2012). O peso específico do solo  $\gamma$  do ORBIG e do OLAPA são 16  $kN/m^3$  e 15,5  $kN/m^3$  (GODOY, 1972), respectivamente.

Como resultado para a carga de ruptura  $P_h = 123,95$   $kN/m$  para ORBIG e  $P_h = 35,28$   $kN/m$  para OLAPA, neste caso comparando-se com o empuxo passivo  $U$  calculado na Tabela 3.7, tem-se os valores de 2,24 e 13,83 para ORBIG e OLAPA, respectivamente. Nos dois casos a favor da segurança, pois:

$$\frac{U}{P_h} \geq 2 \rightarrow \text{a favor da segurança} \quad (5.18)$$

### 3.3 Variação da tensão em diversas seções

Para os cálculos a seguir adotam-se as tensões máximas e mínimas (separadas por sensor) calculadas a partir das leituras de deformações específicas. Essas tensões são calculadas pelos valores de deformações específicas máximas obtidas de todas as leituras realizadas no ORBIG e no OLAPA menos as tensões mínimas.

Esses valores foram calculados por:

$$\Delta\sigma_h = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (5.19)$$

Os valores utilizados foram os da tensão máxima e mínima em todos os anos de leitura para cada seção, dessa forma é possível analisar a influência do movimento lento das línguas coluvionares no duto.

#### 1.1.1 ORBIG

Os valores de tensões máximas nos extensômetro a 0°, 120° e 240° mostrados nas Figuras 3.3 a 3.5 indicam que todas as tensões máximas foram positivas e com valores que variavam entre 50 e 280 MPa, já as tensões mínimas apresentaram valores positivos e negativos. Nas Figuras 3.4 e 3.5 percebe-se que as tensões máximas e mínimas, na influência da língua

coluvionar, apresentam uma descontinuidade nos valores de algumas seções.

Na Tabela 3.8, tem-se os valores de variação média ( $\bar{\sigma}$ ), o desvio padrão (D.P.) e o coeficiente de variação (CV) para os extensômetros a 0°, 120° e 240° no ORBIG.

**Tabela 3.8** –  $\bar{\sigma}$ , D.P. e CV dos extensômetros a 0°, 120° e 240°.

Parâmetros Estatísticos	0°	120°	240°
$\bar{\sigma}$ (MPa)	161,53	150,08	143,15
D.P. (MPa)	35	50	55
CV (%)	22	34	39

As tensões no sensor a 0° tendem para 161 MPa, enquanto que no sensor a 120° e 240° tendem para 83 MPa e 93 MPa, tem-se que os valores encontrados nos sensores a 120° e 240° são próximos, o que pode ser explicado por sua localização. A tensão no sensor a 0° é menor (CV = 22) do que nos sensores a 120° e 240° (CV = 34 e CV = 39).

#### 1.1.2 OLAPA

Na Tabela 3.9, tem-se os valores de variação média ( $\bar{\sigma}$ ), o desvio padrão (D.P.) e o coeficiente de variação (CV) para os extensômetros a 0°, 120° e 240° no OLAPA.

**Tabela 3.9** –  $\bar{\sigma}$ , D.P. e CV dos extensômetros a 0°, 120° e 240°.

Parâmetros Estatísticos	0°	120°	240°
$\bar{\sigma}$ (MPa)	114,13	82,96	92,58
D.P. (MPa)	27	32	37
CV (%)	24	39	40

Nesse caso tem-se que a tensão no sensor a 0° é maior que nos sensores a 120° e 240°, verificando-se que os valores encontrados nos sensores a 120° e 240° têm uma diferença de 10 MPa, o que pode ser explicado por sua localização. A tensão apresentada no sensor a 0° é continua apresentando valores menores do que nos sensores a 120° e 240° (CV = 39 e CV = 40).

Na Figura 3.6 o valor mais alto verificado foi o da seção 11, dentro da língua coluvionar e somente nas três primeiras seções e na seção 07 apresentaram valores negativos. Já na Figura 3.7 os valores negativos aparecem também nas seções 09, 11 e 13. A variação entre as tensões máximas e mínimas (extensômetro 240°) mostradas na Figura 3.8 têm valores máximos nas seções 10 e 13, dentro da língua coluvionar.

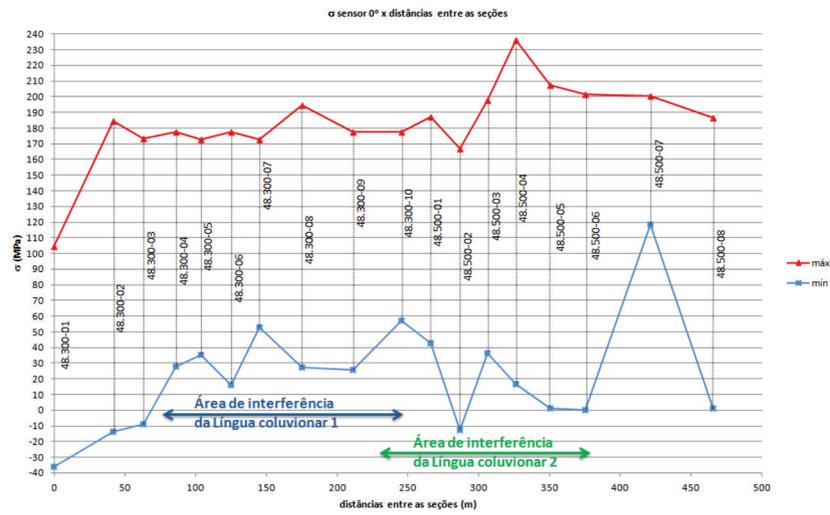


Figura 3.3 – Variação de tensão por seção de instalação do extensômetro no duto, no sensor a 0°.

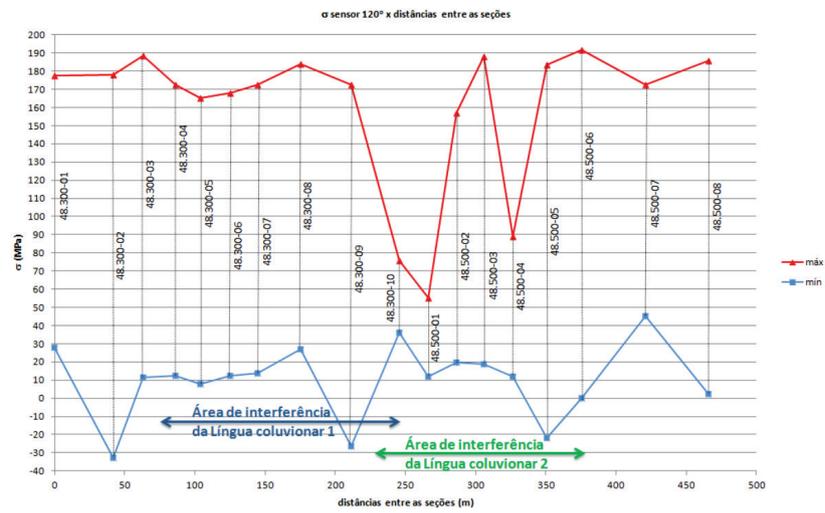


Figura 3.4 – Variação de tensão por seção de instalação do extensômetro no duto, no sensor a 120°.

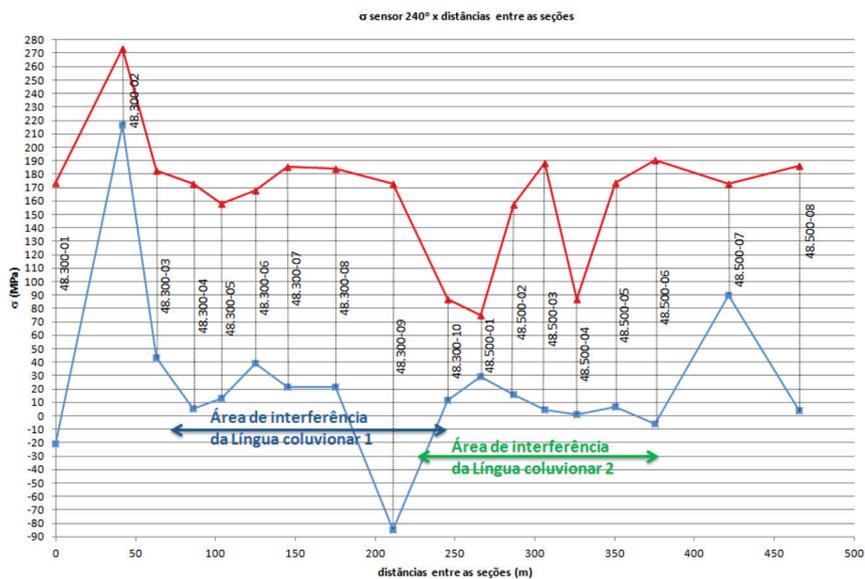


Figura 3.5 – Variação de tensão por seção de instalação do extensômetro no duto, no sensor a 240°.

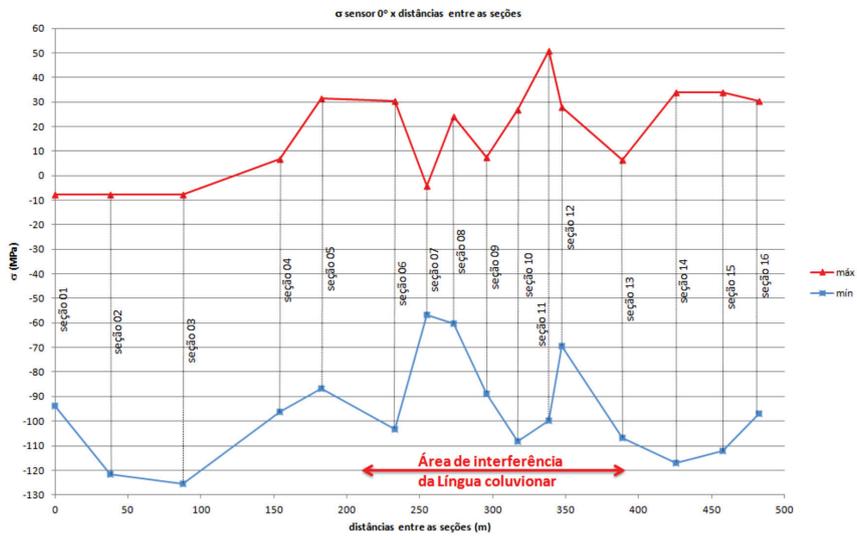


Figura 3.6 – Variação de tensão por seção de instalação do extensômetro no duto, no sensor a 0°.

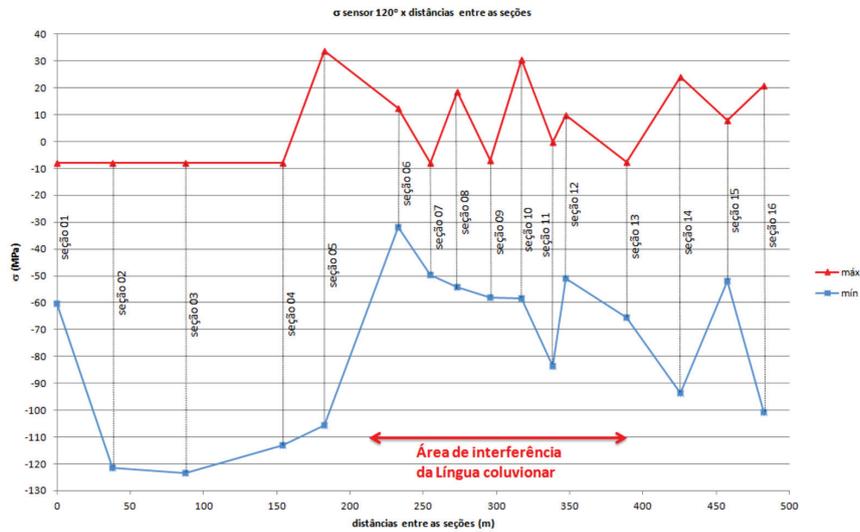


Figura 3.7 – Variação de tensão por seção de instalação do extensômetro no duto, no sensor a 120°.

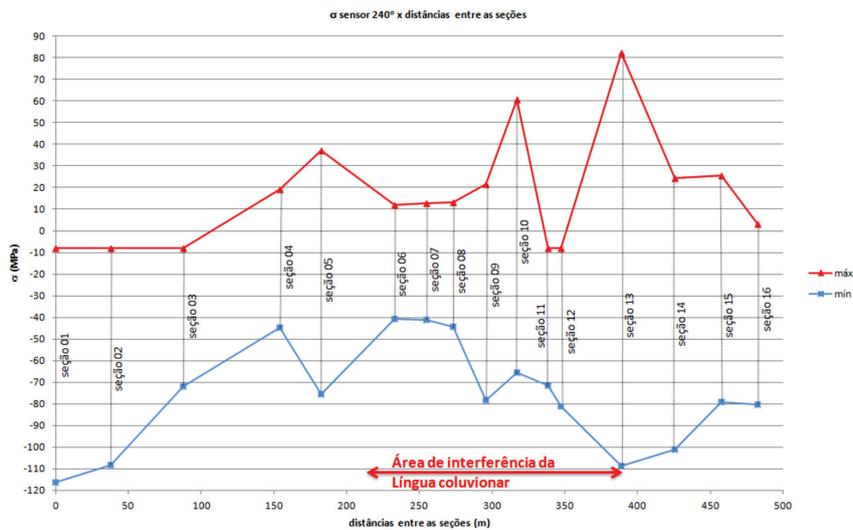


Figura 3.8 – Variação de tensão por seção de instalação do extensômetro no duto, no sensor a 240°.

## 4 Conclusões

Buscou-se neste trabalho analisar as leituras dos extensômetros instalados em seções perpendiculares de dois dutos enterrados, cujo resultado são deformações específicas longitudinais nos dutos.

Apresentou-se uma forma de conversão e análise dessas leituras.

Observou-se que as tensões admissíveis dos solos nos quais foram assentados os dutos variam de 80 a 100 kPa no OLAPA e no ORBIG 40 a 140 kPa, são solos com boa resistência, mostrando que esse movimento lento da encosta é que tem maior influência no movimento do duto. A baixa resistência dos solos leva à possibilidade de deformações (recalques) mais acentuadas.

O oleoduto ORBIG foi solicitado à tração em todas as seções devido ao deslocamento lento da massa instável de solo coluvionar (rastejo), que pode levá-lo à ruptura. NO OLAPA temos compressão nas três primeiras seções e tração nas três últimas, essas seções estão fora da interferência da língua coluvionar. Temos uma relação de que dentro da língua coluvionar verificamos tração no movimento longitudinal do duto e assim entende-se que a língua interfere também nas seções 14, 15 e 16 e não somente até a seção 13 como estudado. Nas seções 04 e 05 o movimento já começa a influenciar nas deformações específicas do duto, conforme verificado na variação entre tração e compressão nos sensores.

No ORBIG as deformações específicas máximas nos três sensores variam entre os valores 700 e 900  $\mu\text{m}$  com exceção de três seções dentro da língua coluvionar, onde nos sensores localizados a 120° e 240° essas deformações declinam para a metade da deformação lida no sensor a 0° (seções que estão no encontro das duas línguas coluvionares). Conclui-se que o movimento do talude interfere no duto por igual.

No OLAPA temos outra situação, os valores variam muito, em algumas seções temos leituras positivas (tração) e negativas (compressão). Nesse caso o duto tem deformações que podem não estar ligadas somente ao movimento do talude, mas também com a sua geometria. No ORBIG tem-se um diâmetro de 1,0 m e no OLAPA de 0,5 m.

Com relação ao estudo das forças laterais, verifica-se que mesmo com o movimento lento do talude, essas forças estão a favor da segurança. Nesse caso é necessário que continuar acompanhando os deslocamentos finais dos dutos, principalmente no OLAPA.

O desvio padrão indica que o grau de variação nos valores das tensões do ORBIG e do OLAPA foi maior no sensor a 0°.

O coeficiente de variação mostrou que a variabilidade dos dados foi muito alta nos sensores a 240° e 120° do ORBIG e OLAPA, respectivamente. Nos sensores a 0° a variabilidade cai a mais ou menos a metade da variação dos sensores a 240° e 120° do ORBIG e OLAPA. O conjunto de dados do sensor a 0° é mais homogêneo que os dos outros sensores.

Nos períodos de chuvas percebe-se uma pequena influência, na maioria das seções do ORBIG, na variação das tensões em dias secos e dias chuvosos, neste caso temos  $\sigma_{\text{seco}} > 5 \sigma_{\text{chuva}}$ . No OLAPA essa influência é maior  $\sigma_{\text{seco}} > 30 \sigma_{\text{chuva}}$ . Nos dias de chuva as tensões diminuem nos dois casos.

## Referências

- ALMEIDA, M. S. S.; ALMEIDA, M. C. F.; LACERDA W. A.; MARQUES, M. E. S.; OLIVEIRA, J. R. M. S. e FREITAS, N. C. – Projeto CT-Petro – GEODUTO – **Estudos Geotécnicos de Dutos Enterrados**. 2003.
- DIAS, R. R. CLÁUDIO. **Notas de aula – Prospecção do Solo**. Internet em <http://www.fag.edu.br/professores/deboraf/Funda%E7%F5es/2%20Bimestre/CAPTULO%201-Prospec%E7%E3o%20do%20Subsolo.pdf> em 27/02/2012 às 11:45 horas.
- FREITAS, N. C. **Estudos dos Movimentos de um Colúvio no Sudeste Brasileiro**. Dissertação (Mestrado). Orientador Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D. COPPE/UFRJ. 2004.
- MENDONÇA, T. M.; FARFÁN, A. D. **Análise geotécnica de deslocamentos horizontais em tubulações enterradas e semi-enterrados**. 1º Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás. 2011.
- PENG, L. **Stress Analysis Methods for Underground Pipe Lines**. Part 2 – Pipe Line Industry. 1978.
- SOARES, J. P.; MUSMAN, J. V. R. **Estabilização e monitoramento da encosta em solo coluvionar na Serra do Mar**. Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – III COBRAE, Rio de Janeiro, p. 571-577. 2001.
- SUZUKI, S. **Propriedades Geomecânicas de Alguns Solos Residuais e Coluviais ao Longo do Oleoduto Curitiba-Paranaguá**. Tese (Mestrado). Orientador Willy Alvarenga Lacerda. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.
- TERZAGHI, K. **Mechanism of Landslides in From Theory to Practice in Soil Mechanics**. Ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 202-245, 1950.
- TIMOSHENKO, S. P., LANCASTER. **Strength of Materials**, Partes 1 e 2. 1944 e 1945.