

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Fernanda Munaretti Michaelsen

**RISCOS GEOTÉCNICOS EM DUTOS: INSTRUMENTAÇÃO
PARA MONITORAMENTO DE OLEODUTOS E GASODUTOS
EM ENCOSTAS INSTÁVEIS**

Porto Alegre
dezembro 2011

FERNANDA MUNARETTI MICHAELSEN

**RISCOS GEOTÉCNICOS EM DUTOS: INSTRUMENTAÇÃO
PARA MONITORAMENTO DE OLEODUTOS E GASODUTOS
EM ENCOSTAS INSTÁVEIS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani

Porto Alegre
dezembro 2011

FERNANDA MUNARETTI MICHAELSEN

**RISCOS GEOTÉCNICOS EM DUTOS: INSTRUMENTAÇÃO
PARA MONITORAMENTO DE OLEODUTOS E GASODUTOS
EM ENCOSTAS INSTÁVEIS**

Porto Alegre, 12 de dezembro de 2011

Luiz Antônio Bressani
PhD pelo Imperial College, University of London, UK
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eng. Hudson Régis Oliveira
M. Sc. pela Universidade Federal de Santa Catarina

Fabio Bertuol
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Marcelo Heidmann
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a todos aqueles que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Antônio Bressani, orientador deste trabalho, pela disponibilidade e participação em todas as etapas de elaboração do mesmo, e principalmente pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço aos familiares e amigos – em especial a meu namorado e minha irmã –, que estiveram ao meu lado durante o desenvolvimento do trabalho, apoiando e colaborando sempre que possível.

Agradeço também a toda equipe da Transpetro, que sempre se dispôs prontamente a colaborar com o trabalho e sanar dúvidas, e também pela disponibilização dos dados e materiais para a pesquisa.

Agradeço ainda a todos aqueles que me auxiliaram de alguma forma na conclusão de mais esta etapa.

A persistência é o menor caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

Dutos destinados ao transporte de petróleo e seus derivados podem apresentar falhas por fatores operacionais – manutenções, corrosão e falhas na operação –, ação de terceiros e fatores naturais – sendo de grande relevância a ação de movimentos de terra. Rupturas ocasionadas por processos de dinâmica superficial geralmente estão associadas a grandes prejuízos sociais, econômicos e ambientais, além de exigirem maior tempo de reparo devido à extensão do dano, postergando a operação do duto. O conhecimento e compreensão dos riscos de origem geotécnica aos quais as tubulações enterradas estão expostas permitem o desenvolvimento de ações que garantam a operação segura das instalações. A partir dos anos 1980, sistemas de gerenciamento da integridade de oleodutos e gasodutos, com foco na influência de fatores geológicos/geotécnicos passam a ser implementados nas principais operadoras de transportes por dutos, com intuito de classificar e quantificar os principais modos de falha e desenvolver ações capazes de mitigar a ação desses fenômenos. A instrumentação geotécnica surge neste contexto como uma ferramenta capaz de monitorar dutos instalados em terrenos suscetíveis a movimentação, controlar deslocamentos ou acréscimos de tensões excessivos e até mesmo alertar, através do acompanhamento de dados obtidos com os equipamentos implantados, a necessidade de obras de adequação ou interrupção de operação dos dutos. Este trabalho visa apresentar as principais técnicas de instrumentação geotécnica empregadas para monitoramento de tubulações. Através da análise de resultados obtidos ao longo do tempo, de uma encosta instrumentada, localizada em Guaratuba, Paraná, na qual estão instalados dutos destinados ao transporte de petróleo e derivados, apresenta-se como os equipamentos de instrumentação podem ser utilizados de modo a garantir a operação segura de oleodutos e gasodutos em encostas instáveis. A avaliação das leituras de deslocamento acumulado permite compreender o processo de movimentação associado à encosta, e, em conjunto com a investigação geotécnica do local, possibilitam a determinação de camadas principais de deslocamento. A evolução do movimento em função do tempo pode ser verificada através do monitoramento dos inclinômetros, indicando a estabilização do movimento e eficiência de obras executadas.

Palavras-chave: Dutos. Georiscos. Instrumentação. Modos de Falhas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de delineamento da pesquisa	17
Figura 2 – Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e derivados	20
Figura 3 – Representação das instalações da TBG no Sul do Brasil	21
Figura 4 – Representação do relevo da região Sul do País	21
Figura 5 – Porcentagem de acidentes em dutos dos Estados Unidos devido a fatores naturais, segundo dados do PHMSA	25
Figura 6 – Volume médio bruto de vazamento em relação ao modo de falha para dutos da Europa, operados entre 1971-2009	26
Figura 7 – Modelo de classificação de georiscos	30
Figura 8 – Diferentes orientações do duto em relação ao movimento do solo: (a) transversal, (b) longitudinal, (c) oblíquo.....	33
Figura 9 – Ruptura de tubulação por tração.....	34
Figura 10 – Ruptura de tubulação por flambagem.....	34
Figura 11 – Dano no duto por puncionamento.....	34
Figura 12 – Vista aérea do local da ruptura no duto OLAPA	38
Figura 13 – Ruptura por tração no duto OLAPA.....	39
Figura 14 – Sistemas de Aquisição e Transmissão de Dados de Instrumentação Geotécnica.....	46
Figura 15 – Abraçadeira para monitoramento de deslocamentos em dutos.....	48
Figura 16 – Localização da encosta de estudo.....	49
Figura 17 – Seção transversal da encosta estudada.....	50
Figura 18 – Fendas de tração em decorrência do rompimento do muro.....	52
Figura 19 – Fendas de tração devido ao movimento coluvionar	53
Figura 20 – Localização dos inclinômetros e extensômetros	56
Figura 21 – Localização dos drenos e piezômetros	56
Figura 22 – Perfil geotécnico apresentado por Tonus (2009)	57
Figura 23 – Perfil geotécnico da encosta	58
Figura 24 – Localização dos inclinômetros na encosta de estudo	59
Figura 25 – Deslocamento acumulado por profundidade para os inclinômetros 1 a 7	60
Figura 26 – Deslocamento acumulado por profundidade para os inclinômetros 8 a 13...	61
Figura 27 – Precipitação em função do tempo.....	62
Figura 28 – Pontos de investigação geotécnica e instrumentação	65
Figura 29 – Perfil adotado para cada seção de análise	66
Figura 30 – Análise inclinômetros: seção 1	67

Figura 31 – Análise inclinômetros: seção 2	69
Figura 32 – Comparação entre as leituras de deslocamento acumulado obtidas nos anos de 2001 e 2011, para o inclinômetro 4.....	70
Figura 33 – Análise inclinômetros: seção 3	71
Figura 34 – Análise inclinômetros: seção 4	72
Figura 35 – Comparação entre as leituras de deslocamento acumulado obtidas nos anos de 2001 e 2011, para o inclinômetro 9.....	73
Figura 36 – Velocidade <i>versus</i> profundidade para os inclinômetros 1 a 6	75
Figura 37 – Velocidade <i>versus</i> profundidade para os inclinômetros 7 a 12.....	76
Figura 38 – Velocidade <i>versus</i> profundidade para o inclinômetros 13.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Detalhamento de incidentes significativos ocorridos entre 1991-2000 nos EUA.....	24
Quadro 2 – Causas de ruptura de tubulações européias no período de 1971 a 1995.....	25
Quadro 3 – Detalhamento das causas naturais, devido à movimentação do terreno, no período de 1971 a 2009	26
Quadro 4 – Distribuição percentual das falhas no duto OSSA-1 por causa da ocorrência.....	27
Quadro 5 – Distribuição das causas de acidentes com dutos em São Paulo	27
Quadro 6 – Mecanismos de interação solo-duto	35
Quadro 7 – Critérios preliminares de segurança para dutos	47
Quadro 8 – Características de instalação e operação dos inclinômetros.....	58
Quadro 9 – Precipitação acumulada e valores adotados	63

LISTA DE SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONCAWE – *Conservation of Clean Air and Water in Europe*

GASBOL – Gasoduto Bolívia-Brasil

GIS – *Geographic Information System*

IPA – Índice de Precipitações Antecedentes

MNA – Medidor de nível da água

NSPT – Índice de resistência a penetração

OPASC – Oleoduto Paraná/Santa Catarina

OSPAR – Oleoduto São Francisco do Sul/Araucária

PHMSA – *Pipeline and Hazardous Materials Safe Administration*

TBG – Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil

TSB – *Transportation Safety Board of Canada*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivo secundário	15
2.3 DELIMITAÇÕES	16
2.4 LIMITAÇÕES	16
2.5 DELINEAMENTO	16
3. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE DUTOS	19
3.1 CONCEITOS BÁSICOS	19
3.2 OLEODUTOS E GASODUTOS NO BRASIL	20
3.3 MODOS DE FALHA	22
3.3.1 Modos de falhas em dutos	22
3.3.2 Estatísticas de falha	23
4 RISCOS GEOTÉCNICOS EM DUTOS	29
4.1 PROCESSOS DE DINÂMICA SUPERFICIAL	31
4.1.1 Escoamentos	31
4.1.2 Escorregamentos	31
4.1.3 Subsidiências	32
4.2 INTERAÇÃO SOLO-DUTO	32
4.3 GERENCIAMENTO GEOTÉCNICO	36
4.4 RUPTURAS EM DUTOS DEVIDO A EVENTOS GEOTÉCNICOS	38
5 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA	41
5.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIDA.....	42
5.1.1 Métodos topográficos.....	42
5.1.2 Níveis de água e poro-pressões	43
5.1.3 Deslocamentos subterrâneos.....	44
5.2 APLICAÇÕES PARA MONITORAMENTO DE DUTOS.....	45
6 MONITORAMENTO DE DUTOS NA ENCOSTA DE ESTUDO	49
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA ENCOSTA.....	50
6.2 HISTÓRICO.....	52
6.3 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO.....	54

6.3.1 Caracterização dos instrumentos.....	55
6.3.2 Dados da investigação e instrumentação geotécnica	57
6.3.2.1 Investigação geotécnica.....	57
6.3.2.2 Inclinômetros.....	58
6.3.2.3 Dados pluviométricos.....	61
7 ANÁLISE DE DADOS	64
7.1 ADEQUAÇÕES PARA REPRESENTAÇÃO DA ENCOSTA	64
7.2 DESLOCAMENTO ACUMULADO	66
7.3 RELAÇÃO ENTRE MOVIMENTO E PRECIPITAÇÃO.....	74
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Uma das formas mais seguras e econômicas para transporte de petróleo e seus derivados é o modal dutoviário. Conforme Nogueira Júnior e Marques (1998, p. [475]), dutovias são:

[...] obras de engenharia muito superficiais, envolvendo quase sempre apenas o horizonte de solo e a rocha decomposta, que têm uma das suas dimensões significativamente maior do que as demais, ou seja, a sua principal característica é a linearidade. Num país de grande extensão territorial como o Brasil, este aspecto adquire maior relevância, sendo comuns os traçados com centenas e até milhares de quilômetros, que atravessam regiões de grande diversidade morfológica [...].

Segundo dados divulgados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), o Brasil possui mais de 15 mil quilômetros de oleodutos e gasodutos (BRASIL, 2010, p. 113). Muitos trechos destas instalações encontram-se em terrenos suscetíveis a escorregamentos, abatimentos e outros fenômenos de origem geotécnica, como por exemplo, as tubulações instaladas nas Serras Geral e do Mar, região Sul e Sudeste brasileira.

Estatísticas indicam que o principal fator causador de acidentes em dutos é a corrosão – interna e externa –, seguido por incidentes ocasionados por ação de terceiros, como escavações e perfurações no terreno. Apesar de não ser o modo de falha mais frequente em dutos, os acidentes geotécnicos geralmente representam grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

De acordo com Sandroni (2004, p. 233), os acidentes de ordem geotécnica relacionados a dutos podem ocorrer em situações nas quais a tubulação está instalada:

- a) em trechos sujeitos a recalque do terreno;
- b) em áreas de falhas geológicas ativas;
- c) em trechos sujeitos a deslizamentos de encostas;
- d) nas proximidades de regiões com erosão ativa.

Para reduzir os riscos aos quais as tubulações estão expostas, as operadoras da rede dutoviária empregam sistemas de gerenciamento da integridade dos dutos. Medidas como inspeções regulares, manutenções e planos de comunicação com intuito de prevenir acidentes fazem parte deste sistema de gerenciamento.

O monitoramento geotécnico de áreas sujeitas a movimentos de terra é uma das ferramentas adotadas nos sistemas de integridade a fim de avaliar e quantificar os riscos aos quais a tubulação está exposta. Através do acompanhamento dos resultados é possível estabelecer critérios para inspeções específicas e até mesmo definir níveis de alerta para interromper a operação dos dutos em situações emergenciais. O uso da instrumentação permite ainda, segundo Oliveira (2005, p. 87), monitorar a tubulação durante a execução de obras, bem como verificar o desempenho de medidas de proteção da tubulação em casos de estabilização de encostas e suporte de dutos.

Esta pesquisa busca apresentar os principais riscos geotécnicos aos quais as tubulações de transporte e distribuição de derivados de petróleo estão expostas, com destaque para instalações sujeitas a deslizamento de encostas e os métodos de monitoramento utilizados. A partir de resultados obtidos através da instrumentação geotécnica de uma encosta localizada em Guaratuba, Paraná, busca-se analisar as formas de aplicação dos dados como método de controle, com intuito de garantir a operação segura dos dutos enterrados.

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos. Após a **Introdução** ao tema, são apresentadas as **Diretrizes da Pesquisa**, evidenciando a questão alvo do trabalho, os principais objetivos a serem alcançados, limitações e metodologia do estudo.

A seguir, uma breve revisão bibliográfica é realizada, com intuito de abordar o tema objeto da pesquisa e padronizar nomenclaturas e termos utilizados no decorrer do trabalho. Fazem parte da revisão bibliográfica três capítulos, sendo:

- a) **Operação e Manutenção de Dutos:** no qual se apresenta o modal dutoviário, sua distribuição no País e os principais modos de falha das tubulações destinadas ao transporte de derivados de petróleo;
- b) **Riscos Geotécnicos em Dutos:** salientando como os processos de dinâmica superficial interagem com dutos enterrados, apresentando os Planos de Integridade seguidos a fim de mitigar os danos às tubulações e alguns casos de ruptura em dutos existentes na literatura;
- c) **Instrumentação Geotécnica:** no qual as principais técnicas de instrumentação geotécnica são apresentadas, bem como sua aplicação para monitoramento de oleodutos e gasodutos.

Após a revisão bibliográfica, apresenta-se o capítulo fruto da aquisição de dados da instrumentação geotécnica da encosta objeto de estudo, na qual existem gasodutos e oleodutos instalados. A caracterização da encosta, bem como a dos instrumentos geotécnicos ali

instalados e seus respectivos dados integram esse capítulo, denominado **Monitoramento de Dutos na Encosta de Estudo**. A análise dos dados obtidos na etapa de aquisição de dados e sua aplicação para monitoramento de dutos encontram-se no capítulo seguinte, **Análise de Dados**.

Por fim, apresentam-se as **Considerações Finais**, capítulo no qual se avalia o uso dos resultados da instrumentação geotécnica obtidos na encosta objeto do estudo, de modo a garantir que os mesmos operem em segurança. Para tal, faz-se uso dos conceitos introduzidos na revisão bibliográfica.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo tem como objetivo descrever as diretrizes do presente projeto de pesquisa, apresentando a questão principal a ser elucidada e os objetivos finais do trabalho. Serão apresentadas também as delimitações, limitações e o delineamento da pesquisa.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho pode ser formulada da seguinte maneira: como são utilizados os resultados da instrumentação geotécnica, colhidos ao longo do tempo, para monitoramento de oleodutos e gasodutos instalados em uma encosta específica, monitorada por instrumentos, localizada em Guaratuba, Paraná, com histórico de movimentações do terreno?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho, tanto o principal quanto o secundário, são apresentados nos itens a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é analisar a aplicação dos resultados obtidos através de instrumentação geotécnica, a fim de monitorar oleodutos e gasodutos, tendo como base a análise dos dados de uma encosta instrumentada, sujeita a movimentação do terreno, localizada no município de Guaratuba, Paraná.

2.2.2 Objetivo secundário

É objetivo secundário do trabalho a descrição geotécnica da encosta estudada, caracterizando a dutovia ali instalada, assim como os instrumentos que a monitoram e os resultados obtidos ao longo do tempo.

2.3 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de uma encosta visando à análise dos resultados da instrumentação geotécnica que a monitora, em função da dutovia ali instalada.

2.4 LIMITAÇÕES

O presente trabalho possui as seguintes limitações:

- a) a análise dos resultados da instrumentação fica restrita aos equipamentos previamente instalados no local de estudo;
- b) serão analisados os resultados obtidos através da leitura dos inclinômetros e dados pluviométricos, durante o período registrado na base de dados – entre 2000 e 2011 para os inclinômetros e de 2006 a 2011 para o pluviômetro analisado;
- c) os resultados da instrumentação serão obtidos através de base de dados específica, chamada Geodados, plataforma do *software* Georisco¹, desenvolvido pela PUC-RJ.

2.5 DELINEAMENTO

O trabalho está dividido nas etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) levantamento dos principais riscos geotécnicos em dutos;
- c) apresentação de Planos de Integridade;
- d) levantamento de acidentes de origem geotécnica em dutos;
- e) análise do monitoramento de uma encosta;
- f) considerações finais.

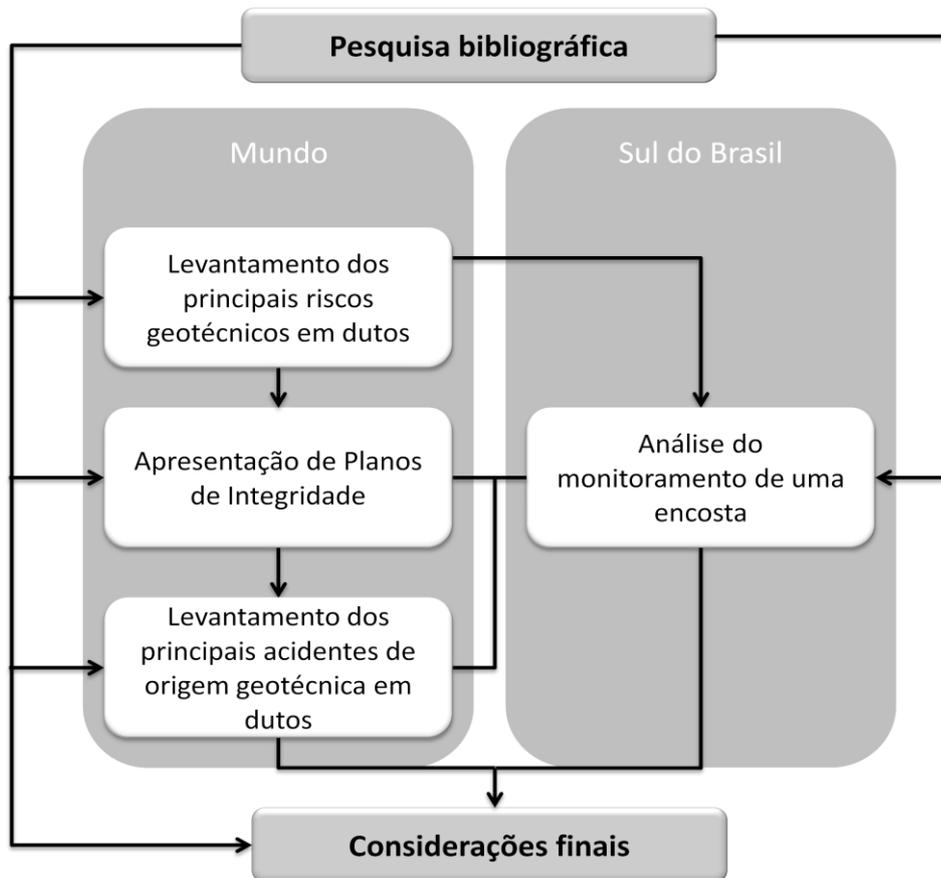
As etapas elencadas acima estão apresentadas na figura 1, sendo as mesmas descritas nos parágrafos a seguir.

A **pesquisa bibliográfica** compreende o estudo dos diversos tópicos da presente pesquisa. Através desta etapa, busca-se obter as informações pertinentes ao estudo, situar o problema explicitado na questão de pesquisa no contexto mundial, partindo então para uma análise

¹ Software desenvolvido para uso exclusivo da Petrobras e Transpetro.

específica dos problemas de natureza geotécnica associados a oleodutos e gasodutos do sul do País.

Figura 1 – Diagrama de delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

Inicialmente são apontados os principais riscos geotécnicos aos quais dutos enterrados podem estar expostos. Esta etapa tem como objetivo a compreensão e descrição dos diversos tipos de movimentação do terreno responsáveis por danos às instalações destinadas a transporte e distribuição de petróleo e seus derivados. Através do **levantamento dos principais riscos geotécnicos em dutos** e sua categorização, é dada ênfase aos riscos associados à movimentação de encostas.

Com intuito de garantir a operação segura de oleodutos e gasodutos, as operadoras destas instalações possuem diversos métodos de controle, que são descritos na etapa de **apresentação de planos de integridade**. Dentre os diversos parâmetros de controle, enfatiza-se a utilização da instrumentação geotécnica para monitoramento de dutos enterrados,

apresentando os equipamentos, formas de utilização e aplicação dos resultados obtidos através da instrumentação, de forma a avaliar as condições da tubulação.

A fim de ilustrar o tema desta pesquisa, a quinta etapa consiste em um **levantamento de acidentes de origem geotécnica em dutos**, no âmbito mundial. Os acidentes apresentados têm suas causas e consequências apontadas, bem como as ações empregadas pelas operadoras após a ocorrência do evento.

A **análise do monitoramento de uma encosta** compreende o estudo de uma encosta, localizada no município de Guaratuba, Paraná, na qual a tubulação está exposta a riscos de natureza geotécnica, devido ao histórico de escorregamentos e trincas de tração registradas no terreno. O trecho da tubulação em análise tem sua caracterização e histórico apresentados, bem como as ações corretivas e de acompanhamento empregadas. Como foco principal apresenta-se a análise da monitoração ali instalada e a forma de utilização dos dados obtidos para definição de critérios de operação da tubulação. Por fim, apresentam-se as **considerações finais** da pesquisa.

3 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE DUTOS

Serão apresentados a seguir alguns conceitos básicos sobre a operação e manutenção de oleodutos e gasodutos, bem como um panorama das principais instalações no Brasil. Através da identificação dos principais modos de falhas em tubulações e da análise de dados relativos à ocorrência dos mesmos, busca-se avaliar a relevância dos riscos geotécnicos em casos de danos ou rupturas em dutos.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Oliveira (2005, p. 5), dutos podem ser definidos como estruturas utilizadas para transporte tanto de produtos líquidos como gasosos, entre os pontos de produção e os consumidores finais. Os dutos podem estar enterrados, instalados sobre suportes – configurando instalações aéreas –, ou mesmo em travessias com corpos de água.

Geralmente as tubulações ficam expostas aos processos que envolvem os horizontes de solo nos quais estão instaladas. Devido às grandes unidades geomorfológicas as quais as dutovias atravessam, devem ser consideradas, segundo Soares et al. (2006, p. [1]), uma obra geotécnica.

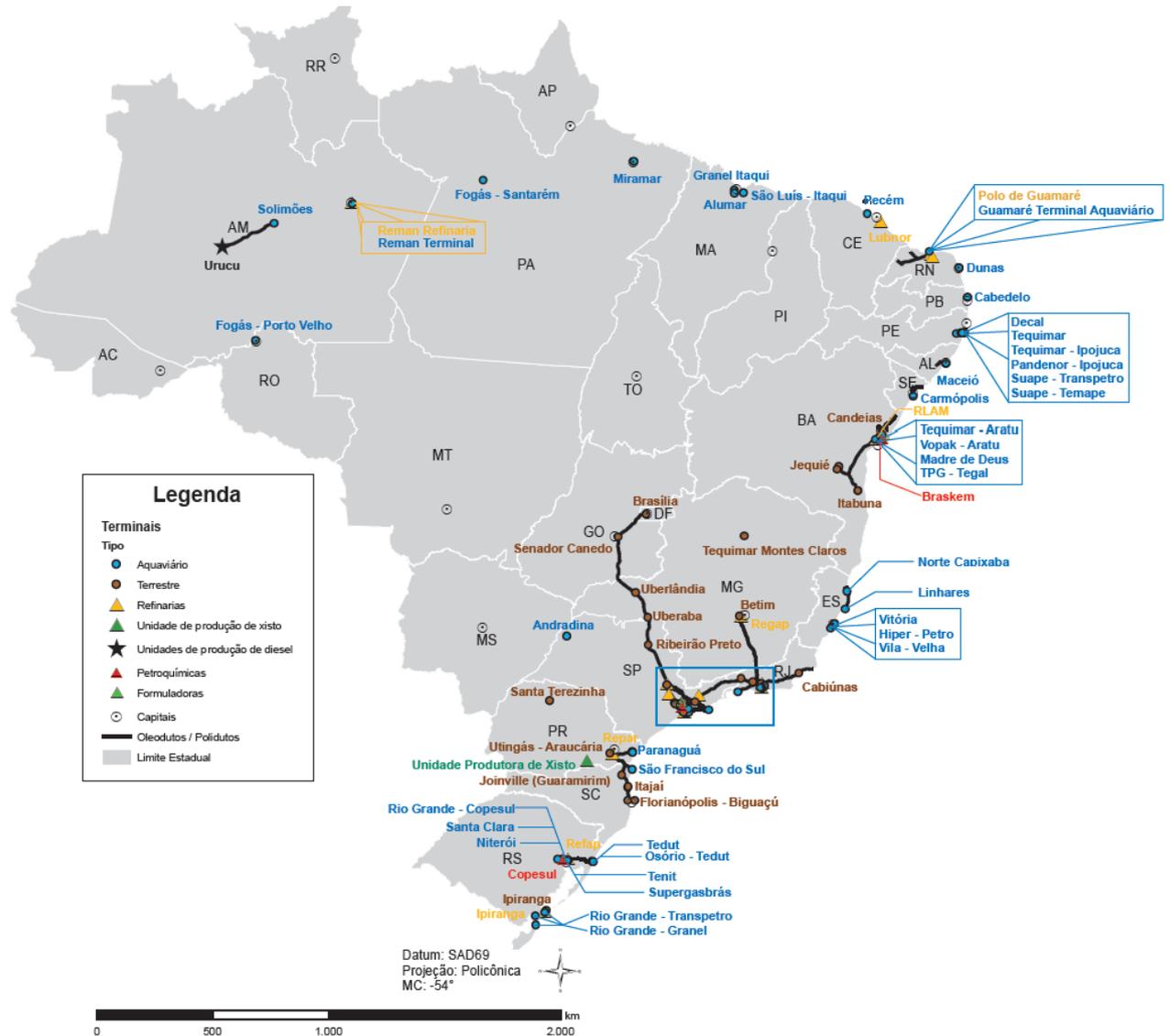
As tubulações estão subdivididas quanto a sua função em dutos de transmissão e de distribuição. Conforme a NBR 12712 – Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível – as instalações de transmissão interligam as fontes de produção do produto a ser transportado até o sistema de distribuição. Já os dutos de distribuição têm como objetivo o fornecimento do produto aos consumidores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, p. 4).

Conforme Oliveira (2005, p. 6), as tubulações destinadas à distribuição geralmente ocupam faixas de domínio de rodovias ou ruas existentes. Já as instalações do sistema de transmissão possuem faixas de domínio próprias. A largura destas faixas de domínio geralmente é da ordem de 20 m, podendo variar de 10 a 50 m.

3.2 OLEODUTOS E GASODUTOS NO BRASIL

Segundo dados publicados no anuário da Agência Nacional do Petróleo (ANP), a infraestrutura dutoviária nacional era composta, até 2009, por mais de 500 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos, somando aproximadamente 17 mil km de extensão. Deste total, cerca de 10 mil km se destinam à movimentação de gás natural, 2 mil km fazem a movimentação de petróleo, com cerca de 32 dutos em operação, sendo as demais extensões destinadas a movimentação de outros produtos, tais como etanol e solventes (BRASIL, 2010, p. 113). A figura 2 ilustra a infraestrutura dutoviária brasileira no ano de 2009.

Figura 2 – Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e derivados – 2009



(fonte: adaptada de BRASIL, 2010, p. 114)

Segundo Oliveira (2005, p. 8-9), as principais operadoras destas tubulações são a Petrobras Transportes S.A (Transpetro) – empresa subsidiária da Petrobras –, e a Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG), cuja malha dutoviária instalada no sul do País é apresentada na figura 3. O Gasoduto Bolívia-Brasil é o maior gasoduto da América Latina, tendo mais de 2500 km instalados no Brasil, sendo sua extensão total superior a 3100 km.

Figura 3 – Representação das instalações da TBG no Sul do Brasil



(fonte: adaptada de TRANSPORTADORA BRASILEIRA GASODUTO BOLÍVIA BRASIL, 2011)

Através da análise das figuras 2 e 3, pode-se observar a grande concentração de instalações nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Estas regiões apresentam uma grande incidência de problemas de natureza geotécnica, sendo que muitas tubulações encontram-se implantadas nas Serras Geral e do Mar. A figura 4 traz a representação do relevo da região Sul do País.

Figura 4 – Representação do relevo da região Sul do País



(fonte: adaptado de BRASIL, 2011)

3.3 MODOS DE FALHA

As dutovias podem apresentar falhas, e até mesmo romper, devido às condições de operação ou influência de fatores externos nas instalações. Em decorrência do produto transportado, eventuais vazamentos implicam em grandes prejuízos sociais e econômicos. Este capítulo inicialmente apresenta os principais modos de falha aos quais os oleodutos e gasodutos estão expostos, para então analisar as estatísticas de ruptura disponibilizadas por órgãos nacionais e internacionais.

3.3.1 Modos de falha em dutos

Segundo Muhlbauer² (2004 apud OLIVEIRA, 2005, p. 13), o conceito de falha em dutos restringe-se a situações em que ocorre vazamento significativo do produto transportado pela tubulação, de forma não intencional. Geralmente os pequenos vazamentos devido à operação dos equipamentos não são considerados, exceto em casos nos quais a toxicidade do produto seja de extrema relevância.

Papadaski³ (2000 apud CORTELETTI, 2009, p. 1) ressalta que, apesar de ser um dos modais com maior segurança para transporte de produtos perigosos, as tubulações eventualmente podem apresentar falhas. Geralmente vazamentos de derivados de petróleo estão associados a acidentes de grandes proporções, seja pelo impacto econômico, ambiental ou social vinculados.

Os principais modos de falha que gasodutos e oleodutos apresentam, segundo Esford et al. (2004, p. 5), são devido a fatores que podem ser agrupados em cinco categorias:

- a) georiscos;
- b) corrosão e fadiga;
- c) falha humana ou operação incorreta;
- d) ação de terceiros;
- e) roubos e sabotagens.

² MUHLBAUER, W.K.. **Pipeline Risk Management Manual: ideas, techniques, and resources**. 3rd ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004.

³ PAPANASKI, G. A. Assessment of requirements on safety management systems in EU regulations for the control of major hazards pipelines. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 78, p. 63-89, 2000.

Savigny et al. (2005, p. 1) colocam que os georiscos aos quais as tubulações estão submetidas são devido a fatores geotécnicos, hidrológicos ou ações tectônicas. Conforme Vasconcellos e Oliveira (2006, p. [2]), no Brasil, os problemas vinculados a ações tectônicas não apresentam relevância, estando às tubulações sujeitas a influência das grandes inundações e movimentação do terreno.

Os dutos estão submetidos a dois tipos de corrosão: interna – geralmente devido a produtos corrosivos em contato com água, ou em situações de falta de uso –, e externa – em casos de revestimento inadequado ou proteção catódica ineficiente – (CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 1998, p. 5). Segundo Souza (2004, p. 28), a fadiga pode ocorrer em função do tempo de uso do duto, ou ainda em situações em que a exposição a pressões, temperaturas ou carregamentos é superior as inicialmente consideradas, causando fadiga do material ou da solda.

As falhas humanas ou operações incorretas de equipamentos podem ocasionar danos à tubulação. Devido ao acúmulo de experiência da indústria na operação das instalações de transporte de petróleo e derivados, este modo de falha tem sido reduzido, sendo cada vez menos responsável por vazamentos (CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 1998, p. 5).

Os acidentes que ocorrem por ações de terceiros são, na grande maioria, causados por escavações ou obras civis realizadas sobre ou sob as tubulações. As intervenções podem não causar vazamentos ou problemas imediatos, mas as consequências dos danos aparecem anos depois, devido à fadiga do material ou redução das condições de operação. Roubo e sabotagens também são fatores de risco à tubulação, mas em menor proporção (CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 2006, p. 21).

3.3.2 Estatísticas de falhas

A seguir, são apresentadas algumas estatísticas que correlacionam casos de rompimento da tubulação com o respectivo modo de falha. Seguem dados publicados pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos, pelo *Conservation of Clean Air and Water in Europe* (CONCAWE) – órgão responsável por pesquisas nas áreas de meio ambiente, saúde e segurança –, pela operadora de rede dutoviária boliviana *Transredes S.A*, além de estatísticas

disponibilizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que apresentam os modos de falhas mais frequentes em tubulações instaladas no estado de São Paulo.

O Departamento de Transportes dos Estados Unidos, através de órgão responsável pela administração segura de dutos e transporte de materiais perigosos – *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration* – PHMSA – apresenta uma vasta base de dados, com registros das informações relativas ao modal dutoviário norte-americano. No quadro 1, pode-se observar o número de vazamentos ocorridos em relação ao modo de falha causador do evento, além do prejuízo associado, em dólares, a partir de dados coletados pelo Órgão entre 1991-2010. Os dados referem-se a todo sistema de dutos dos Estados Unidos, incluindo o transporte de produtos perigosos e os sistemas de transmissão e distribuição de gás natural, com uma vasta rede distribuída em todo país. Os modos de falha foram agrupados em cinco categorias, sendo:

- a) corrosão;
- b) escavações;
- c) falhas mecânicas e operacionais;
- d) fatores naturais;
- e) outras causas.

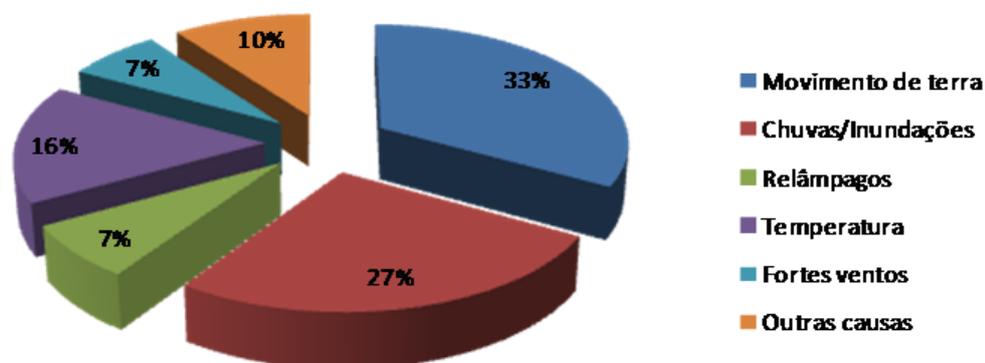
Quadro 1 – Detalhamento de incidentes significativos ocorridos entre 1991-2000 nos EUA

Modo de falha	Nº de vazamentos	Danos à propriedade
Corrosão	1043	\$587,458,517
Escavações	1370	\$528,133,41
Falha operacional/mecânica	1324	\$821,012,807
Fatores naturais	453	\$1,850,259,739
Outras causas	5932	\$5673731398

(fonte: adaptado de UNITED STATES OF AMERICA, 2010)

A partir dos dados apresentados nesse quadro, pode-se observar que, apesar de não ser o modo de falha mais frequente, os fatores naturais envolvem altos custos devido aos danos causados a propriedades. A figura 5 representa graficamente, em relação ao mesmo período, os diversos fatores que compõe o modo de falha devido a fatores naturais, apresentado no quadro 1.

Figura 5 – Porcentagem de acidentes em dutos dos Estados Unidos devido a fatores naturais, segundo dados do PHMSA



(fonte: baseado em UNITED STATES OF AMERICA, 2010)

Partindo para a apresentação de dados publicados referente a dutos europeus, o quadro 2 apresenta as principais causas de rupturas em linhas de dutos na Europa, entre os anos 1971 e 1995, segundo dados publicados pelo CONCAWE.

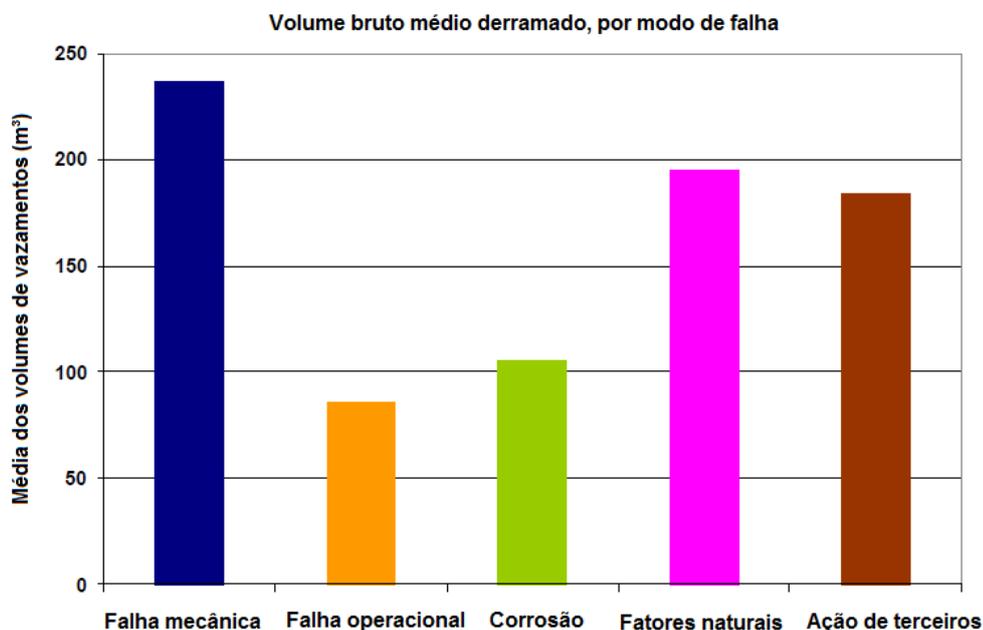
Quadro 2 – Causas de ruptura de tubulações europeias no período de 1971 a 1995

Causas	Causas de incidentes por número	% Volume bruto
Falha mecânica	27%	35%
Falha operacional	7%	3%
Corrosão	30%	19%
Fatores naturais	4%	4%
Ação de terceiros	33%	39%

(fonte: adaptado de CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 1998, p. 4)

O CONCAWE apresenta também um resumo dos incidentes e acidentes em dutos da Europa no período de 1971 a 2009 (CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 2011, p. 20). A figura 6 indica volume médio de vazamentos para cada categoria causadora de ruptura.

Figura 6 – Volume médio bruto de vazamento em relação ao modo de falha para dutos da Europa, operados entre 1971-2009



(fonte: adaptado de CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 2011, p. 20)

Observa-se que os danos devido à corrosão e falhas operacionais resultam em vazamentos menores. Ainda segundo o mesmo órgão, dos 474 derramamentos relatados durante o período, os fatores naturais são apontados como causadores de cerca de 3% dos casos ocorridos (CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 2011, p. 32). Dentre os fatores naturais, o mais representativo foi o deslizamento de terra, conforme quadro 3.

Quadro 3 – Detalhamento das causas naturais, devido à movimentação do terreno, no período de 1971 a 2009

Número de vazamentos devido a movimentos do terreno				
Deslizamentos	Subsidências	Terremotos	Inundações	Não identificados
5	3	1	3	1

(fonte: adaptado de CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE, 2011, p. 32)

O quadro 4 apresenta a relação entre o número de rupturas e os modos de falha, para o duto OSSA-1, operado pela *Transredes S.A*, interligando Santa Cruz e Cochabamba, na Bolívia. Os dados apresentados referem-se ao período entre 1983-2003.

Quadro 4 – Distribuição percentual das falhas no duto OSSA-1 por causa da ocorrência

Causa do incidente	Porcentagem de falha
Georiscos	52,5%
Corrosão/Fadiga	15,0%
Falha humana	15,0%
Roubo/Sabotagem	10,0%
Ação de terceiros	7,5%

(fonte: adaptado de ESFORD et al., 2004, p. 3)

Segundo Esford et al. (2004, p. 2), a grande diferença observada entre a contribuição dos fatores naturais entre os dutos europeus, americanos e a tubulação boliviana OSSA-1, é resultado da configuração geológica do terreno no qual o mesmo encontra-se instalado. Cerca de 50% da tubulação está localizada em terreno de baixa capacidade de suporte ou em travessias de rios e lagos, sendo que nestes trechos são implantados acima do terreno.

A relação modo de falha e ruptura da tubulação para o caso brasileiro, encontra-se no quadro 5. Os dados publicados pela CETESB são referentes às tubulações instaladas no estado de São Paulo, com operação entre 1980 e 2006.

Quadro 5 – Distribuição das causas de acidentes com dutos no estado de São Paulo

Causas	1980-1989	1990-1999	2000-2006
Corrosão	13	10	4
Ação de terceiros	5	9	12
Fatores naturais	4	0	0
Falha operacional	8	9	6
Falha mecânica	3	6	4
Não apurada	2	56	21

(fonte: adaptado de SÃO PAULO, 2011)

A partir dos dados apresentados nos quadros 4 e 5, constata-se que, em relação ao número de vazamentos, os fatores naturais são pouco representativos, quando comparados aos demais modos de falha. Já a análise do gráfico ilustrado na figura 6, permite observar que as rupturas devido a estes fatores geralmente representam vazamentos de maiores proporções.

Conforme Porter e Savigny (2002, p. 5), é importante observar que as estatísticas disponíveis geralmente abrangem um período próximo a 25 anos. Grandes chuvas e enchentes, causadoras de desastres naturais, têm seu tempo de recorrência geralmente de cem anos. A contribuição indireta dos fatores naturais para outros tipos de falhas também é apontada pelos autores. A ação de movimentos geotécnico-geológicos podem agravar a corrosão sobre tensão ou mesmo danificar o revestimento anti-corrosivo da tubulação.

O levantamento dos principais agentes causadores de falhas na tubulação é de extrema importância, devendo ser analisada a configuração específica a que cada trecho está submetido para subsidiar o desenvolvimento de ações visando à integridade da instalação. Segundo Vasconcellos e Oliveira (2006, p. [3]), “Análises quantitativas do risco geológico-geotécnico em dutos, serão cada vez mais necessárias para permitir estabelecimento de planos de ação adequados durante a operação de dutos.”.

4 RISCOS GEOTÉCNICOS EM DUTOS

Conforme observado por Savigny et al. (2005, p. 1), durante muitos anos a indústria de dutos teve uma postura reativa em relação aos danos em suas instalações causados por fatores naturais. A partir dos anos 1980, programas de gerenciamento de riscos geológicos e geotécnicos começaram a ser implantados, permitindo avaliar como a tubulação era afetada por estes fatores, antes considerados imprevisíveis, e o quanto efetivamente eles representavam.

Conforme colocado por Oliveira (2005, p. 36), “[...] risco é considerado como sendo o produto da possibilidade de ocorrência de um acidente vezes os danos que este acidente cause [...]”. O autor salienta também a diferença entre a definição de acidente – fato ocorrido com perdas e/ou danos associados –, do termo evento – em que não há perdas ou danos de causa direta em função do ocorrido.

Cerri e Amaral (1998, p. 301) definem risco geológico/geotécnico como situações de perigo, perdas ou danos – tanto ao homem quanto as suas propriedades –, em função da possibilidade de ocorrência de processos geológicos. O impacto causado por vazamentos de produtos em eventuais rupturas é avaliado na análise quantitativa de risco de dutos.

Costa (2005, p. 72-76) apresenta um resgate bibliográfico das conceituações de risco geotécnico/geológico, ressaltando a ausência de unicidade do conceito. Ressalta ainda que as palavras risco e ameaça muitas vezes são utilizadas como sinônimos, sendo que a principal diferença entre elas é que no primeiro caso a probabilidade de ocorrência de um desastre (ameaça) está associada aos prejuízos decorridos em função da perda de vidas ou danos.

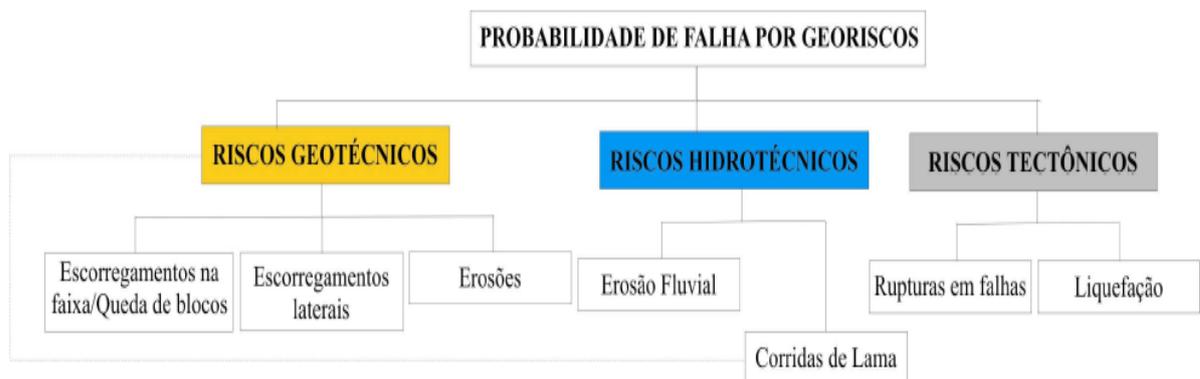
Acidentes de origem geológico/geotécnica geralmente apresentam grandes prejuízos associados. Como afetam maiores trechos da tubulação, causam vazamentos de maiores proporções, majorando a área atingida e expondo ao risco o meio ambiente e a população. Além disso, as rupturas devido à movimentação do terreno demandam geralmente um maior tempo para recomposição das condições da instalação, interrompendo a operação por longos períodos (PORTER et al., 2004, p. 3).

Segundo Savigny et al. (2005, p. 1), os georiscos podem ser divididos em três grandes grupos, em relação à origem, sendo:

- a) tectônicos: devido ao movimento do solo, ruptura, liquefação, erupções ou tsunamis causados por movimentação de placas;
- b) hidrotécnicos: ocasionados por inundações, erosão de margens ou grandes precipitações;
- c) geotécnicos: causados por deslizamentos de terra, compactação do solo, subsidências, soerguimento do solo, entre outros.

Uma classificação da probabilidade de falha devido a georiscos é apresentada por Esford et al. (2004, p. 6), conforme modelo representado na figura 7. No Brasil, as tubulações estão sujeitas principalmente a riscos de origem geotécnica ou hidrotécnica. Este trabalho tem como propósito analisar os riscos de origem geotécnica aos quais as tubulações podem estar submetidas.

Figura 7 – Modelo de classificação de georiscos



(fonte: adaptado de ESFORD et al., 2004, p. 6)

De acordo com Sandroni (2004, p. 233), os acidentes de origem geotécnica devido à interação entre o solo e o duto ocorrem em trechos em que a tubulação está instalada:

- a) em terrenos submetidos a recalque;
- b) em áreas com falhas geológicas ativas;
- c) em locais sujeitos a ação de avalanches;
- d) próxima a pontos de erosões ativas;
- e) em regiões de deslizamento de encostas.

Soares et al. (2006, p. [1]) indicam a erosão, quedas de blocos, escorregamentos, corridas de detritos como algumas das ocorrências com maior frequência nas faixas de dutos da Transpetro. Vasconcellos e Oliveira (2006, p. [3]) indicam os movimentos de massa e as subsidências como os processos de dinâmica superficial mais representativos.

Para permitir o gerenciamento dos riscos geológicos/geotécnicos aos quais a tubulação está submetida, é necessário compreender a interação entre os processos de movimentação do terreno e a tubulação sujeita a estes processos. Serão apresentados nos próximos itens alguns processos correntes de dinâmica superficial, a interação solo-duto e as medidas de gerenciamento geotécnico adotadas visando à integridade da instalação. Por fim, alguns acidentes envolvendo riscos geotécnicos serão expostos.

4.1 PROCESSOS DE DINÂMICA SUPERFICIAL

A importância do conhecimento dos processos de dinâmica superficial que envolvem as áreas nas quais as tubulações estão instaladas é ressaltada por Vasconcellos e Oliveira (2006, p. [3]). Nos itens a seguir serão apresentados brevemente alguns destes processos.

4.1.1 Escoamentos

De acordo com Guidicini e Nieble (1976, p. 4), escoamentos caracterizam-se pela continuidade do movimento ou da deformação. São subdivididos em rastejos (escoamento plástico) e corridas (escoamento fluido-viscoso).

Os rastejos caracterizam-se pelo movimento de materiais de encostas, de forma lenta, contínua e de limites indefinidos, causados principalmente pela ação da gravidade. Já as corridas – movimentos de caráter essencialmente hidrodinâmicos –, conforme definido por Guidicini e Nieble (1976, p. 9), são movimentos de alta velocidade, causados pela diminuição do atrito interno. Solos e rochas podem fluir em determinadas situações, como em casos de amolgamento de argilas, ação de vibrações ou pela simples adição de água, ocasionando o deslocamento da massa envolvida.

4.1.2 Escorregamentos

Guidicini e Nieble (1976, p. 15-16) definem escorregamentos como movimentos rápidos, de curta duração e geralmente bem definidos quanto ao volume deslocado. Podem ser rotacionais, mobilizando o manto de alteração do solo de forma súbita, ou translacionais, podendo ocorrer em taludes mais abatidos e atingir áreas de grande extensão.

As quedas de blocos de rocha ou detritos podem ser enquadradas na classificação de escorregamentos. A ação da gravidade pode causar a queda de blocos de rocha, desmembrados do maciço devido ao intemperismo, em taludes íngremes ou penhascos verticais. Caracteriza-se pela queda livre, sem superfície de movimentação. Já a queda de detritos ocorre de forma relativamente livre, sendo composta por movimentos de menor magnitude de fragmentos pouco consolidados de rocha (GUIDICINI; NIEBLE, 1976, p. 28).

4.1.3 Subsidiências

Conforme definição apresentada por Guidicini e Nieble (1976, p. 31), “Subsidiências são a expressão, em superfície, do efeito do adensamento ou afundamento de camadas, consequências da remoção de alguma fase sólida, líquida ou gasosa do substrato.”. Dentre as diversas causas geradoras do fenômeno está a ação antrópica, devido a extração de minérios, exploração de depósitos petrolíferos e bombeamento de águas subterrâneas.

Ainda, conforme Guidicini e Nieble (1976, p. 32), os recalques e os desabamentos são subtipos de subsidiências. Ambos são movimentos verticais, sendo que no recalque a movimentação é causada pelo peso próprio da estrutura ou deformação do subsolo por outro agente, enquanto que os desabamentos envolvem áreas mais reduzidas, em que a ruptura é ocasionada pela remoção total ou parcial do substrato.

4.2 INTERAÇÃO SOLO-DUTO

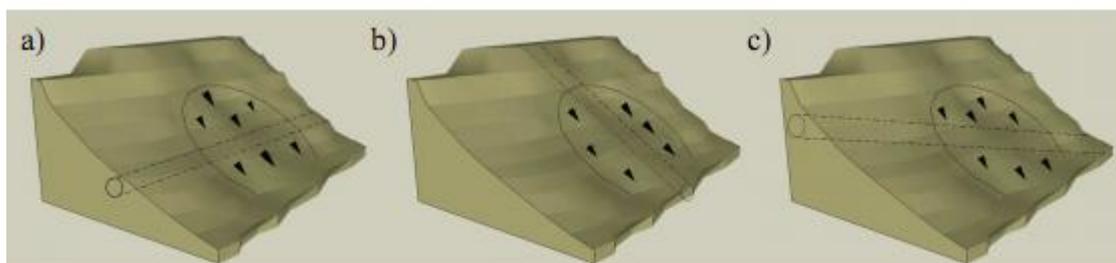
Vasconcellos e Oliveira (2006, p. [4]) apontam as principais formas de danos na tubulação devido aos processos de dinâmica superficial, sendo:

- a) impacto direto: amassamento, surgimento de mossas ou até o puncionamento da tubulação devido ao deslocamento de blocos;
- b) deslocamento por empuxo: deslocamento do duto devido ao empuxo do solo, gerando concentração de tensões em trechos em que a tubulação esteja fixada;
- c) acréscimo de tensão devido ao atrito: a movimentação do solo ao redor do duto gera atrito, aumentando as tensões na parede do mesmo.

Pereira et al. (2011, p. 3) apresenta um esquema ilustrativo – figura 8 –, representando os principais movimentos aos quais um duto instalado em regiões instáveis está suscetível.

Dependendo da orientação da instalação frente à movimentação do terreno, a tubulação pode sofrer esforços de tração, compressão e/ou flambagem.

Figura 8 – Diferentes orientações do duto em relação ao movimento do solo:
(a) transversal, (b) longitudinal, (c) oblíquo



(fonte: PEREIRA et al., 2011, p. 3)

Movimentos transversais ocasionam flambagem na tubulação, sendo que nos extremos os esforços podem resultar em amassamentos e dobramentos. Em movimentos longitudinais podem ocorrer rupturas por tração na parte superior da instalação, e por compressão na parte inferior. Já nos oblíquos, a possibilidade de ruptura devido ao acréscimo de tensões na parte inferior acaba sendo reduzida pela componente axial, sendo uma combinação dos movimentos transversais e longitudinais (PEREIRA et al., 2011, p. 3-4).

Sandroni (2004, p. 238) observa que as configurações anteriormente apresentadas geralmente não representam as condições reais em que a tubulação está instalada. O movimento do solo pode ser inclinado horizontal ou verticalmente em relação ao duto. O traçado da dutovia apresenta curvaturas em sua extensão, não sendo apenas caracterizada por trechos retilíneos.

Nas figuras 9 a 11 são apresentadas tubulações que sofreram ações de tração, flambagem e amassamento, respectivamente, em escorregamentos do tipo língua coluvial. Segundo definição de Sandroni (2004, p. 233), línguas coluviais caracterizam-se pela mobilização de massas de solo de pequena espessura, grande comprimento e largura em inclinações suaves.

Figura 9 – Ruptura de tubulação por tração



(fonte: adaptada de SANDRONI, 2004, p. 236)

Figura 10 – Ruptura de tubulação por flambagem



(fonte: adaptada de SANDRONI, 2004, p. 235)

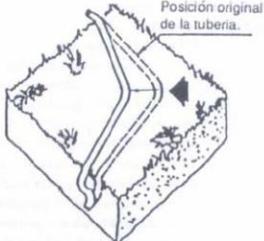
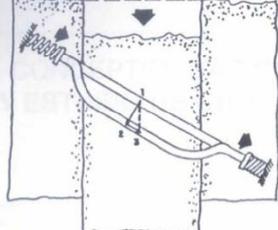
Figura 11 – Dano no duto por puncionamento



(fonte: SANDRONI, 2004, p. 234)

Oliveira (2005, p. 45-46) também descreve os processos de interação solo-duto. O quadro 6 ilustra alguns tipos de movimentação do terreno e apresenta as principais tensões a que a tubulação está submetida em cada caso.

Quadro 6 – Mecanismos de interação solo-duto

Escorregamento paralelo	Escorregamento transversal	Subsídências e recalques
		
<p>A parte superior do duto é tracionada e a parte instalada no pé da encosta é comprimida.</p>	<p>Tracionamento na zona central da tubulação, enquanto que as zonas engastadas são comprimidas.</p>	<p>Duto submetido a tensões de tração e compressão. No caso de tubulação inclinada aparecem também esforços de flexão.</p>

(fonte: adaptado de INGENIERIA Y GEOTECNIA LTDA, 1991, p. 17)

Oliveira (2005, p. 48) ressalta ainda o risco que erosões podem ter quando em áreas próximas as tubulações. A retirada de material devido à erosão ocasiona uma diminuição da cobertura de solo, aumentando a exposição do duto. Pode ocorrer ainda acréscimo de carga nas situações em que o duto se encontra na área de deposição do material erodido.

Soares et al. (2006, p. [1]) apontam que as erosões nas faixas de dutos podem ser de natureza superficial ou interna. As erosões superficiais caracterizam-se pela formação de sulcos ou ravinas, devido à falta de tratamento de margens de travessias ou drenagens mal dimensionadas. A erosão interna, por sua vez, é ocasionada principalmente pela má compactação de reaterros quando da abertura de valas para reparo da tubulação, originando caminhos preferenciais para passagem de água.

Segundo o mesmo autor, os recalques, geralmente ocasionados devido ao aterro de regiões com solo mole, provocam grandes deformações no terreno e conseqüentemente na tubulação ali instalada. A queda de blocos e a corrida de detritos também são de alto risco à tubulação,

sendo que a influência é mais representativa nos casos de instalações aéreas (SOARES et al., 2006, p. [2]).

O rastejo é indicado como o principal evento, quanto à gravidade, observado nas faixas de dutos da Transpetro. Conforme relatado por Soares et al. (2006, p. [2]), é um movimento de difícil identificação, que pode levar a tubulação à ruptura devido ao acréscimo progressivo de tensões.

4.3 GERENCIAMENTO GEOTÉCNICO

Oliveira (2005, p. 49) define o processo de gerenciamento geotécnico como “[...] o conjunto de ações preventivas, de avaliação/análise e corretivas que são implementadas na fase de operação e de manutenção de dutos, com o objetivo de reduzir o risco de falha por eventos geotécnicos.”, sendo parte integrante do sistema de Gerenciamento da Integridade de Dutos. Este ramo do sistema de Gerenciamento contempla medidas preventivas, ações de avaliação e análise, ações corretivas e também ações diretas sobre a tubulação.

As atividades de **prevenção de falhas**, conforme Oliveira (2005, p. 49), têm por finalidade indicar pontos que exponham a tubulação a algum risco para que possam receber o devido tratamento. As medidas preventivas compreendem basicamente as seguintes etapas:

- a) manutenção da faixa de dutos – obras de recomposição, limpeza, roçada, manutenção de instrumentos e equipamentos, com intuito de garantir a funcionalidade da instalação;
- b) inspeções – a pé, aéreas ou através de equipamentos, objetivando um acompanhamento da tubulação e região no entorno;
- c) desenvolvimento de cartas temáticas capazes de identificar áreas sujeitas a riscos geológicos e alimentar banco de dados.

A atividade de inspeção a pé, realizada por inspetores treinados, apesar de ser uma etapa de rotina, é de extrema importância. É através da análise visual em campo que muitas situações de risco são detectadas (OLIVEIRA, 2005, p. 50).

Vasconcellos e Oliveira (2006, p. 1-2) também avaliam como fundamental a etapa de inspeção por andarilhos. Ressaltam, porém, a necessidade de capacitação dos mesmos para que a etapa seja produtiva:

[...] é de fundamental importância, principalmente para inspetores de campo, conhecer os principais eventos geotécnicos que podem prejudicar a integridade de dutos, tais como, instabilidade de encostas naturais ou de taludes de escavação e aterro, fundações sobre solos moles, erosões, corridas de lama, etc, e a interação desses eventos com os dutos enterrados e estruturas auxiliares, como por exemplo, válvulas de bloqueio.

Segundo Moura e Lázaro (2004, p. 302), “A revisão D da Norma N-2098⁴ da Petrobras, publicada em dezembro de 2002, estabeleceu a necessidade de inspeção geológico-geotécnica das faixas dos dutos e áreas adjacentes.”. O principal objetivo destas inspeções é prevenir prejuízos sociais, econômicos e ambientais que possam ser causados devido a uma falha na operação da tubulação.

Após a identificação de pontos de risco, as situações relatadas passam a ser gerenciadas pela etapa de **ações de avaliação e análise**. Nesta etapa, medidas adicionais são empregadas com intuito de avaliar as situações que podem representar alguma ameaça a integridade da tubulação. A avaliação é realizada a partir dos métodos de medição de tensões a que a tubulação está submetida, do uso de equipamentos e instrumentos para acompanhamento das movimentações do terreno ou da posição da tubulação além do estudo da interação solo-duto.

Com a investigação realizada na etapa de análise, selecionam-se pontos que necessitam de **ações de intervenção ou corretivas**. Conforme Oliveira (2005, p. 96), em situações em que a tubulação está submetida a sobrecargas externas, como em casos de tráfego ou aterros, medidas de proteção devem ser tomadas, pois nem sempre o solo de fundação do duto é capaz de suportar o carregamento transferido. Nestes casos, análises específicas das tensões na tubulação e de soluções alternativas de proteção devem ser providenciadas, em uma ação conjunta entre a operadora e parte responsável pela interferência com a instalação.

Oliveira (2005, p. 102) indica ainda que **ações diretas de correção do duto** ocorrem em situações em que se faz necessária a intervenção direta na tubulação para restabelecer a integridade da mesma. Para tal, faz-se uso de ações visando o alívio de tensões nos dutos, a troca do trecho afetado ou até mesmo a relocação da linha dutoviária.

A necessidade de substituição de trechos da instalação ocorre, segundo Oliveira (2005, p. 106), em casos de danos localizados, em que a diretriz original é preservada. Nos casos em que não é possível a interrupção da operação do duto, a troca de trecho é realizada através de

⁴ PETROBRAS. N-2098: inspeção de dutos terrestres em operação. Rio de Janeiro, 2002.

sistema de *by-pass*, no qual o produto transportado é desviado através de um trecho alternativo, ligado em pontos a montante e a jusante do local de defeito, sendo reconectado após o concerto.

A utilização de instrumentação geotécnica de áreas de risco é de grande importância nas diversas etapas citadas acima. Conforme apontado por Amaral et al. (2004, p. [1]), é necessário mapear as áreas sujeitas a movimentação do terreno e demais áreas instáveis, de modo que seja possível avaliar a interação com a tubulação. Para quantificar o efeito do movimento de solo em movimento na tubulação, a modelagem da situação através de técnicas baseada em elementos finitos vem sendo utilizada.

4.4 RUPTURAS EM DUTOS DEVIDO A EVENTOS GEOTÉCNICOS

Serão dispostos a seguir alguns casos históricos de acidentes de origem geotécnica envolvendo dutos. Busca-se aqui exemplificar brevemente os impactos dos riscos geológicos/geotécnicos e as ações tomadas pelas empresas operadoras.

Lacerda (2006, p. 21-22) relata um acidente ocorrido em uma encosta no Paraná, região da Serra do Mar, ocorrido em 2001, cuja representação encontra-se na figura 12. A encosta apresentava processo de rastejo, com uma camada coluvionar movimentando-se sobre a camada inferior de solo residual.

Figura 12 – Vista aérea do local do acidente



(fonte: LACERDA, 2006, p. 21)

Sandroni (2004, p. 238) aponta a forte relação da velocidade dos movimentos de colúvio com as épocas de chuva. No caso específico, durante um evento de chuvas fortíssimas (cerca de 4 dias consecutivos com acumulados de 140 mm, 20 mm, 90 mm e 80 mm/dia respectivamente) o deslocamento total foi da ordem de 15 cm, ocasionando a ruptura por tração da tubulação ali instalada, representada na figura 13.

Figura 13 – Ruptura por tração no duto OLAPA



(fonte: LACERDA, 2006, p. 22)

Conforme descrito por Oliveira (2005, p. 26), a tubulação estava enterrada a profundidades médias de 3,5 metros, sendo que a camada coluvionar apresentava espessuras variando de 11 a 21 metros. De modo a estabilizar a encosta após o acidente, foi instalado sistema de drenagens profundas e um plano de instrumentação para acompanhamento dos movimentos foi elaborado.

Já Micucci e Barbagelata (2002, p.[1-2]) descrevem um acidente de origem geotécnica – ocorrido em janeiro de 2002 –, em que uma tubulação de 20” de diâmetro, destinada ao transporte de gás rompeu nas proximidades da cidade de Orán, Argentina. Com cerca de 400 km de extensão, o gasoduto atravessa regiões de terreno bastante acidentado e trechos em locais predispostos a movimentação de taludes.

Segundo os autores, pequenos movimentos do talude – de geologia composta por uma capa de solo argilo siltoso sobre uma camada arenosa –, já haviam sido detectados no ano anterior, mas em 2002, novos movimentos desencadearam a ruptura e posterior explosão do gasoduto

ali instalado. Cerca de três meses após a explosão, movimentações ainda maiores foram retratadas, porém com o duto já fora de operação (MICUCCI; BARBAGELATA, 2002, p. [2]).

Estudos realizados após o evento indicam a redução das forças de sucção devido à saturação do terreno como uma das principais causas da movimentação. Os autores buscaram ainda, sem sucesso, obter uma correlação direta com as chuvas registradas, passando então a analisar o Índice de Precipitações Antecedentes (IPA). Tal índice considera além da precipitação diária, as precipitações dos dias anteriores multiplicadas por um coeficiente de redução exponencial dependente do tempo decorrido, permitindo constatar movimentos massivos a partir de picos de IPA superiores a 100 mm (MICUCCI; BARBAGELATA, 2002, p. [11]).

Outra ruptura em dutos é relatada pelo *Transportation Safety Board of Canada* (TSB), situação na qual uma tubulação de 8” de diâmetro, destinada ao transporte de gás, rompeu e posteriormente entrou em ignição, em British Columbia, Canadá. O rompimento da tubulação ocorreu devido ao deslizamento de uma massa de terra em uma área de escorregamentos pré-existentes, tendo tensionado a tubulação além de seu limite de escoamento. Segundo relatórios emitidos, a massa de solo deslocou-se como um bloco, tendo seu movimento reativado provavelmente em função das altas precipitações registradas nos 3 anos anteriores, além do completo derretimento da espessa camada de neve sobre o solo (TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA, 1998).

A dutovia pertencente à *Westcoast Energy Inc.* havia sido recentemente inspecionada, mas nenhum ponto próximo ao local do deslizamento teria sido identificado como área de risco. Modificações nos programas de monitoramento geotécnico foram implementadas pela operadora, incluindo ampliação do monitoramento aéreo e instalação de instrumentação geotécnica no local a fim de gerenciar ações na região, além da execução de um *by-pass* possibilitando a continuidade de operação do gasoduto (TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA, 1998).

5 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

Muitas são as aplicações dos instrumentos para monitoramento do comportamento do solo. Desde a obtenção de parâmetros iniciais para subsidiar projetos, no acompanhamento de obras e de regiões sujeitas à movimentação do terreno, o monitoramento geotécnico permite compreender a interação do solo e da estrutura. A abordagem deste capítulo limita-se a análise dos planos de instrumentação dedicados ao monitoramento de áreas com histórico de movimentação, apesar de os conceitos iniciais de planejamento serem comuns as diversas áreas de aplicação.

A instrumentação geotécnica é uma combinação entre a capacidade de mensuração dos equipamentos e a capacidade das pessoas. A utilização da mesma não é meramente o ato de selecionar instrumentos, mas um processo de planejamento que deve abordar desde a definição de objetivos até a implementação dos dados (DUNNICLIFF, 1988, p. 3).

Bressani (2009, p. 1), ressalta que “[...] quando se discute instrumentação, a maioria dos técnicos pensa imediatamente em instrumentos e técnicas. Entretanto, para o sucesso de um programa de instrumentação, quatro etapas principais devem ser bem executadas [...]”. Essas etapas consistem em planejar adequadamente a instrumentação, definir o local de instalação e o tipo de equipamento a ser utilizado, definir responsabilidades na equipe de trabalho, além de realizar uma análise crítica dos resultados. Conforme indica Dunicliff (1988, p. 38), todo instrumento pertencente ao projeto deve ser escolhido e instalado de forma a responder uma pergunta específica, se não há a pergunta, não há propósito na instrumentação.

Outra falha corrente nos programas de instrumentação é a não definição de um Plano de Ação, isto é, devem ser estabelecidas previamente as ações necessárias para o caso de as variáveis medidas ultrapassarem os limites aceitáveis. A definição dos níveis de alerta – valores que diferenciam um valor conforme e uma desconformidade – é uma etapa sensível, muitas vezes dependente da experiência pessoal de profissionais (BRESSANI, 2009, p. 7).

O autor define ainda, como ponto de partida para planejar um programa de instrumentação geotécnica, o desenvolvimento de um Modelo Geomecânico capaz de representar adequadamente a situação a ser estudada (BRESSANI, 2009, p. 10). O levantamento de informações pertinentes ao projeto tais como geometria do local, condições do solo – resistência, permeabilidade, compressibilidade –, e o estado de tensões do mesmo, permitem

prever o comportamento e as variáveis que devem ser medidas com a instrumentação de campo (HANNA, 1985, p. 691).

A etapa de seleção dos equipamentos deve considerar o tipo e magnitude do movimento, além das velocidades esperadas (BRESSANI, 2009, p. 14). A etapa de previsão do comportamento deve possibilitar a estimativa do intervalo de valores a serem medidos, permitindo a compatibilização com o equipamento selecionado. Deve permitir ainda definir o mínimo valor de interesse a ser medido com o equipamento, fator que determinará a sensibilidade requerida para o mesmo (HANNA, 1985, p. 693).

Conforme exposto por Dunicliff (1988, p. 41), o preço não deve ser fator determinante para seleção dos instrumentos, sendo importante considerar custos referentes à calibração, instalação, manutenção e processamento de dados. Bressani (2009, p. 14) salienta que um programa de instrumentação adequado não é necessariamente o de maior custo, “O importante na instrumentação é ter medidas significantes ao problema que permitam entender o fenômeno com confiabilidade e precisão necessária a análise [...]”.

Serão apresentados, a seguir, de forma sucinta, os instrumentos de utilização corrente para monitoramento geotécnico de regiões sujeitas à movimentação do terreno, com objetivo de resgatar brevemente suas características e aplicações. Uma visão mais restrita, com foco na utilização de técnicas para monitoramento de dutos, é abordada na sequência do capítulo.

5.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIDA

São apresentados a seguir alguns instrumentos para monitoramento geotécnico frequentemente utilizados. Vale lembrar que existem diversas variações de cada um dos equipamentos, além de diversos sensores – dos mais sofisticados aos mais simples –, que podem ser escolhidos em função da necessidade do projeto. Descrições mais completas dos equipamentos, ilustrações, além de outros métodos de instrumentação podem ser encontradas nas obras de Hanna (1985) e Dunicliff (1988).

5.1.1 Métodos topográficos

Os métodos topográficos são largamente utilizados para monitoramento de deslocamentos de superfície na área geotécnica. São empregadas diversas técnicas, que em geral baseiam-se em

fixar um ponto de referência, bem ancorado ao solo, que possibilite o acompanhamento através de nivelamento ou medições topográficas. Para tal são utilizados pilares de referência, estações de nivelamento, conjuntos de placas e hastes – para casos de monitoramento mais profundo –, e até mesmo os chamados *bench marks* – utilização de prédios ou outros pontos permanentes de referência para acompanhamento da movimentação do terreno. É fundamental que sejam estáveis, robustos, de fácil acesso do operador para obtenção de medidas e que não estejam suscetíveis a danos causados por terceiros (HANNA, 1985, p. 261-268).

Segundo Bressani (2009, p. 2), a facilidade e a rapidez da operação, associadas a uma grande confiabilidade e baixos custos, são vantagens do método. São empregados também de forma auxiliar, seja como meio de controle do deslocamento de tubos de inclinômetros ou mesmo na verificação de recalques. O autor salienta ainda a utilidade dos métodos de medida direta em situações emergenciais. Em ocasiões em que são necessárias respostas rápidas, a precisão esperada muitas vezes tem menor importância frente ao tempo de obtenção de medidas.

5.1.2 Níveis de água e poro-pressões

Os medidores de nível da água (MNA) têm como função verificar o nível de saturação em um perfil do sub-solo, através da medição direta do nível de água em um tubo perfurado – geralmente instalado em furo de sondagem com revestimento permeável (BRESSANI, 2009, p. 3). São realizadas leituras do nível da água interno ao tubo através de dispositivos com sensores elétricos, mangueiras com fluxo de ar ou som, sendo a profundidade do nível da água a diferença entre a superfície do terreno e a de água encontrada.

Já os piezômetros têm como objetivo a obtenção da pressão de água nos locais em que são instalados, em uma região delimitada. A diferença entre esse equipamento e o medidor de nível de água é ressaltada por Bressani (2009, p. 3). Enquanto os piezômetros obtêm medidas pontuais de pressão – a área em que a medida é feita deve ser selada –, os MNA “[...] determinam um nível médio de água que chega a um equilíbrio dentro de um poço de pequeno diâmetro ou furo de sondagem com revestimento permeável.”

Os medidores pontuais de pressão da água podem ser de tubo aberto – piezômetro de Casagrande –, ou ainda elétricos, hidráulicos e pneumáticos, em função dos sensores de medida utilizados. Os equipamentos de tubo aberto são muitas vezes considerados mais

confiáveis, tendo como vantagem a instalação simplificada, e como desvantagem o tempo de resposta do instrumento em função do volume de água necessário para causar uma variação na leitura. Geralmente são compostos por tubo de PVC perfurado na extremidade, envolvida por camadas filtrantes – geossintéticos e areia –, e camada de baixa permeabilidade para isolar hidráulicamente a pressão de água (DUNNICLIFF, 1988, p. 118-120).

Nos casos de solos não-saturados é necessário fazer uso de aparelhos capazes de medir poro-pressões negativas. Nestes casos são utilizados tensiômetros, que conseguem captar valores de sucção na massa de solo (BRESSANI, 2009, p. 4).

5.1.3 Deslocamentos subterrâneos

Os inclinômetros são, segundo Bressani (2009, p. 3), sensores de grande precisão para monitoramento de movimentos do sub-solo, mensurando a variação da inclinação de tubos-guia instalados no terreno. A medição de deslocamentos horizontais do tubo é realizada através da diferença entre a leitura feita e a leitura inicial, ou zero, do equipamento. As principais aplicações deste dispositivo são descritas por Dunicliff (1988, p. 251), sendo:

- a) determinar a região de influência de um escorregamento;
- b) monitorar a extensão e a taxa de movimentação horizontal de aterros em geral;
- c) avaliar a deflexão de obras de contenção.

Há uma grande dificuldade, apontada por Bressani (2009, p. 11), em determinar o ponto de ancoragem de inclinômetros instalados em taludes de grande espessura de solo e/ou geologia variável. Para assegurar que a extremidade inferior está estável, é necessário realizar leituras do equipamento e controle do tubo, garantindo o bom funcionamento do instrumento.

Existem diversos modelos de inclinômetros no mercado, podendo variar o tipo de torpedo, de tubo externo e modo de instalação. Muitos fazem uso de servos-acelerômetros sensíveis a inclinações, apresentadas em relação ao desvio angular ou deslocamento horizontal (HANNA, 1985, p. 323).

Outro equipamento frequentemente utilizado para mensurar deslocamentos profundos é o extensômetro. Existem diversos tipos e aplicações para o uso deste instrumento. No caso de deslocamentos profundos o sistema é composto por hastes de aço ancoradas em pontos

determinados do subsolo, permitindo a leitura direta do deslocamento relativo através de medidas de superfície (BRESSANI, 2009, p. 2).

5.2 APLICAÇÕES PARA MONITORAMENTO DE DUTOS

Amaral et al. (2008, p. 1) aponta a necessidade da utilização de tecnologias que permitam a avaliação de riscos geológicos/geotécnicos, devido a grande extensão de instalações atravessando regiões de características geotécnicas complexas. Segundo Oliveira (2005, p. 87), “Sempre que houver suspeita de movimentos de massa interferindo em dutos, é recomendável, além das investigações geotécnicas, que seja instalada uma instrumentação geotécnica e mecânica.”. A instrumentação permite analisar a interação entre o solo e o duto, monitorar obras ou alívio de tensões além de permitir, após a execução de obras de proteção e estabilização, a verificação do desempenho das mesmas.

De forma a quantificar o efeito da movimentação do terreno na tubulação e avaliar a necessidade de intervenção na instalação são utilizados sistemas de monitoramento – compostos de piezômetros, inclinômetros, extensômetros, ente outros –, muitas vezes associadas a técnicas numéricas para análise da integridade (AMARAL et al., 2004, p. [1]). Conforme salienta Sandroni (2004, p. 246), a utilização da instrumentação geotécnica permite calibrar os modelos numéricos de modo que representem de modo mais fiel a realidade. Entretanto, a modelagem numérica apresenta algumas dificuldades, conforme apontado também por Sandroni (2004, p. 242), na avaliação de instalações sobre línguas coluviais, sendo:

- a) definição de parâmetros do solo;
- b) simulação da interface, onde há fluxo de solo em relação à tubulação;
- c) difícil definição do comportamento dos limites da massa deslocada;
- d) consideração tridimensional do problema;
- e) correta consideração do movimento, já que as línguas coluviais não se comportam como corpo rígido.

Para que seja possível avaliar a tensão transmitida ao duto em função do movimento do terreno ao qual está submetido, é necessária a instalação de equipamentos de medida diretamente na superfície do duto. A instrumentação é composta por extensômetros – fios de aço tensionados dentro de um tubo –, soldados na parede do duto e capazes de medir a

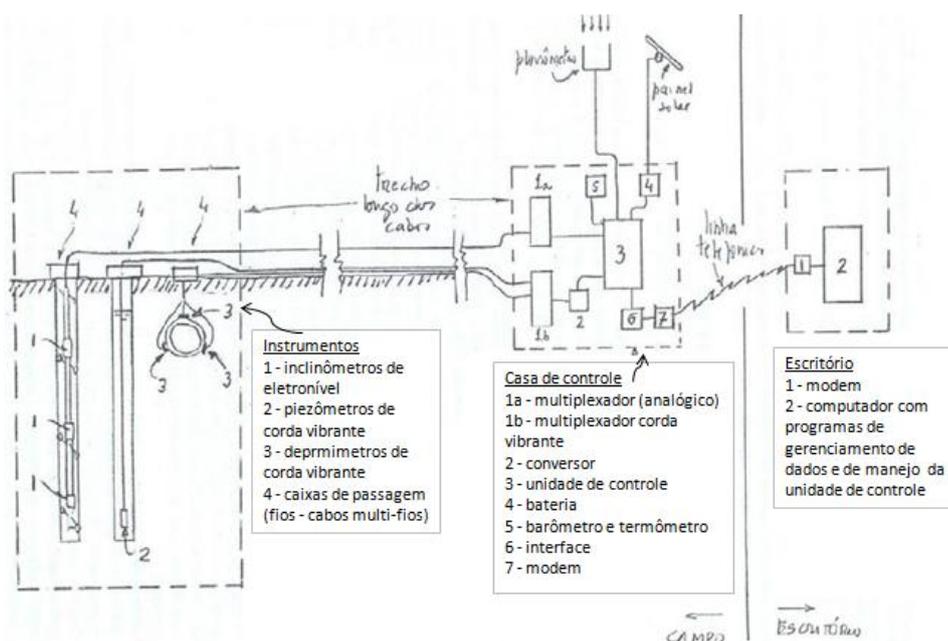
deformação do aço através da frequência de vibração captada por um sensor (AMARAL et al., 2004, p. [3]).

No caso de extensômetros de corda vibrante, Oliveira (2005, p. 82) ressalta a necessidade de medir inicialmente a tensão, previamente a instalação do equipamento, já que o mesmo trabalha com diferença de tensões, sendo necessário adicionar ou subtrair a leitura obtida a tensão inicial medida.

Amaral et al. (2004, p. [5]) expõe a necessidade de acompanhamento permanente em trechos instalados em regiões de rastejo. Nestes casos, faz-se uso de instrumentos capazes de detectar as condições climáticas, variações na massa de solo e na própria tubulação. A correta determinação do intervalo entre as leituras também é ressaltada pelo autor, já que devem ser condizentes com o tipo de problema geotécnico a ser detectado.

Além das técnicas explicitadas acima, Sistemas de Aquisição e Transmissão de Dados de Instrumentação Geotécnica (SATADIG), já utilizadas internacionalmente, vêm sendo também implementadas no Brasil. O sistema, representado na figura 14, é capaz de coletar, de forma contínua, os dados obtidos através da instrumentação geotécnica e transmiti-los diretamente para o escritório, juntamente com dados meteorológicos de pluviômetros, barômetros e termômetros (SANDRONI, 2004, p. 244).

Figura 14 – Sistemas de Aquisição e Transmissão de Dados de Instrumentação Geotécnica



(fonte: adaptado de SANDRONI, 2004, p. 245)

Um sistema eletrônico é responsável pela leitura e registro das mesmas em intervalos pré-estabelecidos que são então transmitidos para um computador, com um programa de gerenciamento agregado. O programa permite acessar as leituras, arquivar dados e até mesmo emitir alertas prefixados. O quadro 7 mostra critérios predefinidos para avaliar a segurança em locais onde o sistema está sendo implantado (SANDRONI, 2004, p. 244-246).

Quadro 7 – Critérios preliminares de segurança para dutos

Situação		Parâmetros da Instrumentação				Frequência das Leituras (leitura/dia)	Posturas
Denominação	Nível	Intensidade das Chuvas	Nível dos Piezômetros (cm)	Velocidade nos Inclinômetros (cm/dia)	Deformação nos Extensômetros (%)		
Verde (Normal)	A	< 2 mm/dia < 50mm/25 dias	Aumento < 5cm em rel. à média dos ult. 25 dias	Aumento < 10% em rel. à média dos ult. 25 dias	Variação < 0,01% (< 100 µε)	1	1
	B	< 3 mm/dia < 75mm/25 dias	Aumento < 10cm em rel. à média dos ult. 25 dias	Aumento < 25% em rel. à média dos ult. 25 dias	Variação < 0,02% (< 100 µε)	2	2
Amarela (Alerta)	A	< 4 mm/dia < 100 mm/25 dias	Aumento < 20cm em rel. à média dos ult. 25 dias	Aumento < 50% em rel. à média dos ult. 25 dias	Variação < 0,05% (< 100 µε)	4	3 4 5
	B	< 6 mm/dia < 150 mm/25 dias	Aumento < 30cm em rel. à média dos ult. 25 dias	Aumento < 100% em rel. à média dos ult. 25 dias	Variação < 0,1% (< 100 µε)	8	6 7 8
Vermelha (Emergência)	A	< 8 mm/dia < 200 mm/25 dias	Aumento < 50cm em rel. à média dos ult. 25 dias	Aumento < 200% em rel. à média dos ult. 25 dias	Variação < 0,2% (< 100 µε)	24	6 8 9
	B					A definir (> 24)	10

1. Acompanhamento diário por técnico no escritório.
2. Acompanhamento por técnico no escritório duas vezes ao dia.
3. Acompanhamento contínuo por técnico.
4. Visita ao local por técnico.
5. Aviso para a engenharia.
6. Acompanhamento contínuo por engenharia.
7. Visita ao local por especialista.
8. Permanência de técnico no local.
9. Contingenciar ações para situação vermelha B.
10. Interromper a operação.

(fonte: SANDRONI, 2004, p. 247)

De acordo com Amaral et al. (2004, p. [2]), para o monitoramento de gasodutos e oleodutos, são instalados equipamentos que permitem mensurar variáveis relevantes para análise do problema, sendo normalmente utilizados:

- a) equipamentos de medição de fatores climáticos como temperatura, pressão e índices pluviométricos;
- b) piezômetros e inclinômetros verticais para acompanhamento do movimento do terreno;

c) instrumentação na parede do duto para avaliação de tensões.

Oliveira (2005, p. 84) apresenta outro método de acompanhamento de deslocamentos em dutos que vem sendo utilizado no Sul do País. Através da instalação de abraçadeiras em torno da tubulação, conforme figura 15, se torna possível o acompanhamento topográfico do equipamento e a avaliação dos deslocamentos.

Figura 15 – Abraçadeira para monitoramento de deslocamentos em dutos



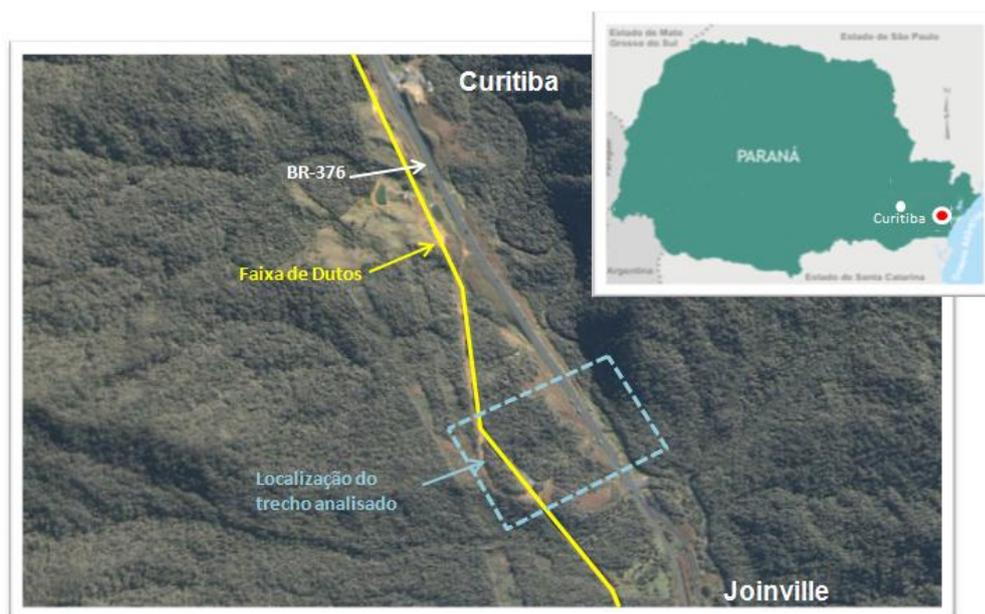
(fonte: OLIVEIRA; VASCONCELOS, 2005, p. 7)

Oliveira (2005, p. 60) indica a vantagem na utilização do monitoramento pluviométrico para determinação de inspeções específicas, após a ocorrência de períodos críticos. O autor aponta porém alguns fatores limitantes na calibração de inspeções em função da monitoração de leituras de pluviômetros, como a necessidade de delimitar a análise em trechos – em função da linearidade da instalação podem haver características distintas em cada trecho –, e a dificuldade de acessos em muitas regiões, dificultando identificar a chuva crítica associada ao processo de movimentação.

6. CASO DE ESTUDO

Com intuito de analisar como a instrumentação geotécnica e seus resultados podem ser utilizados para monitoramento de oleodutos e gasodutos instalados em encostas instáveis, optou-se por estudar uma situação real em que um trecho da dutovia está exposto às ações de movimentação do terreno. A encosta objeto deste trabalho situa-se em região da Serra do Mar, no município de Guaratuba, estado do Paraná, estendendo-se ao longo de um trecho da rodovia BR-376, nas proximidades do km 673.

Figura 16 – Localização da encosta de estudo



(fonte: adaptado de GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM, 2011)

A região de estudo delimita-se as proximidades do km 55+800 m da faixa de dutos chamada OSPAR, onde estão instaladas três tubulações destinadas ao transporte de petróleo e seus derivados, além de uma linha de transmissão elétrica de alta tensão e rede de fibra óptica, sendo:

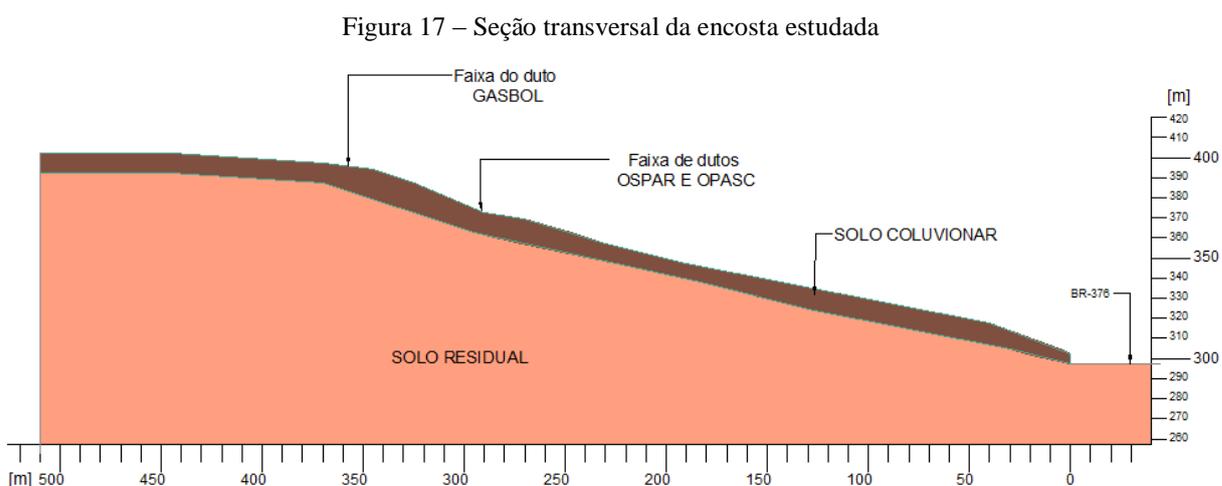
- a) oleoduto São Francisco do Sul/Araucária (OSPAR) – interliga a Refinaria de Araucária ao Terminal de São Francisco do Sul –, com diâmetro de 30”;
- b) oleoduto Paraná/Santa Catarina (OPASC) – interliga a Refinaria de Araucária as bases de distribuição de Guarimirim, Itajaí e Biguaçu –, com diâmetro de 10”;
- c) gasoduto Brasil-Bolívia (GASBOL) – com mais de 2500 km em solo brasileiro, ligando Corumbá, Mato Grosso do Sul, a Canoas, Rio Grande do Sul.

Os oleodutos OSPAR e OPASC encontram-se instalados em uma mesma plataforma na encosta, distando cerca de 4 metros entre si, com profundidades de instalação próximas a 2,5 m. O gasoduto GASBOL é instalado em faixa compartilhada com os oleodutos, em grande parte de sua extensão. Porém, no trecho de estudo, devido às constantes movimentações do terreno e problemas de instabilidade, o GASBOL teve seu traçado alterado de forma a majorar a segurança da instalação, trecho chamado de variante, sendo um caminho alternativo passando pela cumeeira da encosta.

Nas próximas seções serão apresentadas a caracterização da encosta, o histórico de movimentações da mesma e o plano de instrumentação aplicado. Será dada ênfase aos equipamentos para monitoramento geotécnico da encosta e ainda para os dados obtidos através da instrumentação, priorizando inclinômetros e pluviômetros.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA ENCOSTA

Localizada na Serra do Mar paranaense, com cerca de 100 m de altura, a encosta apresenta uma espessa camada de solo coluvionar – entre 9 e 12 m – de baixa declividade. Os dutos encontram-se instalados em plataformas no talude, com distâncias próximas a 300 e 400 m entre os limites da rodovia BR-376 e as plataformas nas quais estão os oleodutos e gasodutos, respectivamente (TONUS, 2009, p. 57). A figura 16 representa a seção transversal do talude em questão.



(fonte: adaptado de TONUS, 2009, p. 57)

Conforme relatórios técnicos de investigação geotécnica, o subsolo do local é classificado como coluvionar, residual e de alteração de rocha, sendo o perfil composto por solos argilo-arenosos e areno-siltosos. Segundo Guidicini e Nieble (1976, p. 23-24), escorregamentos com características típicas da Serra do Mar, envolvem geralmente também blocos rochosos, alterados ou não, constituintes das camadas de alteração.

A Serra do Mar, resultado do processo de falhamento regional, registro do evento responsável pela separação da América do Sul e África e a formação do Oceano Atlântico Sul possui grande parte de seu relevo atual originado através de processos erosivos. Suas elevações configuram-se como divisor de água em diversos e pequenos cursos que drenam para o litoral e aqueles que correm para o interior (MINEROPAR, 2001, p. 87)

Segundo Almeida e Carneiro (1998, p. [135]), estendendo-se pela costa, desde o Espírito Santo a Santa Catarina, a Serra do Mar teve seu embasamento na era pré-cambriana, a cerca de 4,5 bilhões de anos, com extensão próxima a 1000 km. No trecho paranaense, constitui uma serra de limites bem definidos, elevando-se de 500 a 1000 m acima do primeiro planalto. Tendo como limites o planalto meridional e a planície costeira, caracteriza-se por serras marginais descontínuas e formação de escarpa, resultado de processos erosivos. Os autores indicam ainda a influência dos movimentos de massa nas feições recentes da evolução da Serra do Mar (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998, p. 142):

Os processos naturais no atual domínio da Serra do Mar, uma região submetida a altas pluviosidades médias anuais e episódios prolongados de chuvas, envolvem intensa participação de movimentações de massa. Os escorregamentos e deslocamentos de solos e rochas acontecem mormente ao longo de superfícies planas e inclinadas. As discontinuidades, como juntas e falhas antigas, são aproveitadas, pela água e pelos lentos processos de denudação associados, para desenvolver em profundidade as massas de solo e rocha decomposta que acabam sendo afetadas pela atividade erosiva incessante.

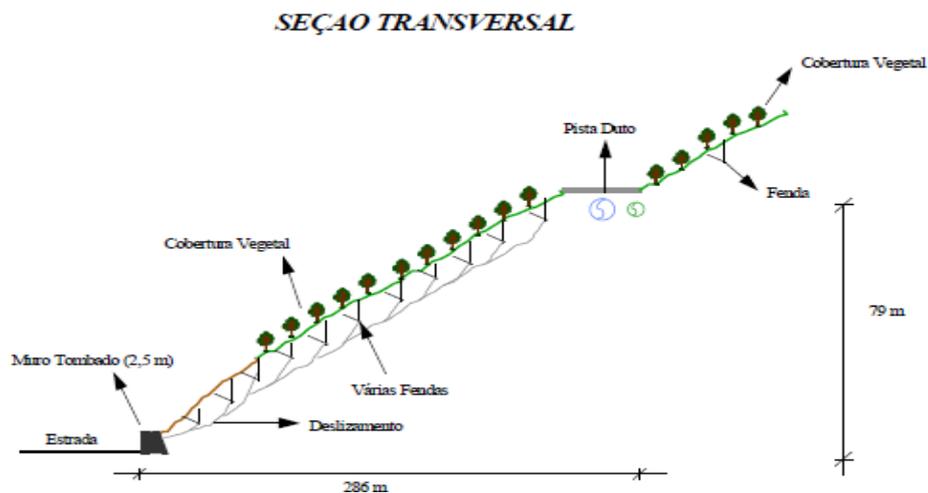
A ocorrência de altas pluviosidades em curtos períodos – poucas horas ou dias –, é associada à ocorrência de escorregamentos por Moreira e Pires Neto (1998, p. 76). Os autores ressaltam, porém que a chuva nem sempre é um fator suficiente na ocorrência de escorregamentos, apesar de estar vinculada ao processo.

6.2 HISTÓRICO

A encosta objeto de estudo encontra-se na Serra do Mar. Caracterizada por camada coluvionar sobre solo residual, e movimentos vinculados a precipitações acentuadas, a encosta possui um histórico de movimentações iniciado em 1995, durante a duplicação da rodovia BR 376, quando ocorreram movimentos de massa devido à escavação do sopé da encosta natural existente. Apesar de as plataformas onde os dutos estão instalados não terem sido atingidas, a movimentação ocasionou diversas trincas no terreno, que foi estabilizado através da construção de um muro de concreto ciclópico com dimensões aproximadas de 2 m de altura e 50 m de comprimento, junto à base do talude.

Em janeiro de 1997, durante um forte período chuvas, houve uma nova movimentação do terreno, desta vez na parte inferior do talude, resultando no rompimento da estrutura de proteção e desencadeando diversos escorregamentos, inclusive na faixa de dutos. Após o escorregamento, através de inspeções e topografia do local, foram identificadas trincas de tração resultantes do rompimento do muro e a influência no entorno das tubulações. A figura 17, apesar de não representar corretamente a escala da encosta – com inclinações próximas a 21° –, ilustra a localização das fendas de tração, representadas também na figura 18, através de fotografia do local.

Figura 18 – Fendas de tração em decorrência do rompimento do muro



(fonte: PETROBRAS⁵, 1997)

⁵ Obtido através de relatório interno sobre a instabilidade encosta km 55 + 800 da faixa de dutos OSPAR.

Teixeira (2008, p. 52) descreve a surgência de água em um dos lados do escorregamento na região da faixa de dutos e abaixo da mesma, apesar de, nos processos de investigação da integridade do oleoduto, não ter sido detectado o lençol d'água. Tonus (2009, p. 60) aponta também a evolução diária constatada no tamanho das trincas, “[...] indicando que o movimento da massa de colúvio era contínuo e passível de ser acelerado por chuvas intensas com a subida do lençol d'água.”. A autora classifica ainda o movimento como escorregamento rotacional raso, sendo o peso da própria cunha de solo responsável pelo início do movimento.

Figura 19 – Fendas de tração devido ao movimento coluvionar



(fonte: LACERDA, 2006, p. 19)

Como medidas de estabilização foram instalados drenos sub-horizontais profundos e drenagem superficial para rebaixamento do lençol freático, além da instalação de instrumentação geotécnica – inclinômetros e piezômetros – que, segundo Lacerda (2006, p. 18), possibilitaram a confirmação da natureza coluvionar do solo, com cerca de 10 metros de espessura, seu movimento no contato com o solo residual e a posição elevada do lençol, que aflorava na região central do movimento. Como solução final, junto à rodovia foi construída uma cortina atirantada, com cerca de 5m de altura, com reaterro colocado sobre colchão drenante, além de ancoragens no trecho logo abaixo da plataforma dos oleodutos.

A cortina instalada abaixo da faixa dos oleodutos possui três linhas de ancoragem, com espaçamento horizontal entre as mesmas de aproximadamente 2,5 m, e comprimento próximo

a 30 m. Os tirantes instalados possuem carga de trabalho de 300 kN, sendo que cada um deles recebeu uma placa de concreto além do concreto projetado com espessura de 0,10 m e tela metálica (TEIXEIRA, 2008, p. 53).

Conforme relatado por Tonus (2009, p. 63), após o acidente, a Transpetro iniciou o desenvolvimento de diversos estudos sobre o comportamento da encosta em conjunto com instituições de ensino. A autora resgata vários destes estudos, desenvolvidos na área de estabilidade de taludes, para então iniciar o desenvolvimento de sua pesquisa, apresentando a análise – tanto por métodos convencionais, quanto probabilísticos – da estabilidade da encosta.

6.3 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

Inicialmente, logo após os escorregamentos de 1997, foram instalados 67 drenos sub-horizontais com intuito de rebaixar o lençol freático no local. Além das investigações do subsolo, piezômetros e inclinômetros foram instalados.

Com o decorrer dos anos, o plano de instrumentação foi sendo aperfeiçoado, com a instalação de novos instrumentos e adoção de técnicas mais sofisticadas de aquisição de dados. Hoje instrumentação é gerenciada através do *software* Georisco, desenvolvido pela PUC-RJ, permitindo o monitoramento dos instrumentos diretamente do escritório. Através de um banco de dados capaz de armazenar os resultados obtidos de cada equipamento (Geodados), o usuário pode consultar as leituras dos instrumentos desde a implantação do programa, com filtros que permitem selecionar o período, empresa responsável pela leitura, além de gerar gráficos específicos do comportamento dos mesmos de acordo com os critérios selecionados.

O *software* permite ainda a definição de valores críticos para a instrumentação, sendo emitidos alertas automáticos – divididos em amarelos ou vermelhos, de acordo com a criticidade – quando as leituras ultrapassam estes limites. A partir do acompanhamento do plano de monitoramento são programadas inspeções ou até mesmo obras emergenciais a fim de minimizar a ação nas tubulações e estabilizar a encosta.

6.3.1 Caracterização dos instrumentos

Conforme Amaral et al. (2008, p. 5), a Transpetro geralmente utiliza monitoramento convencional, com piezômetros e inclinômetros de áreas instáveis. Para avaliação de tensões são utilizados ainda extensômetros de corda vibrante instalados na parede da tubulação.

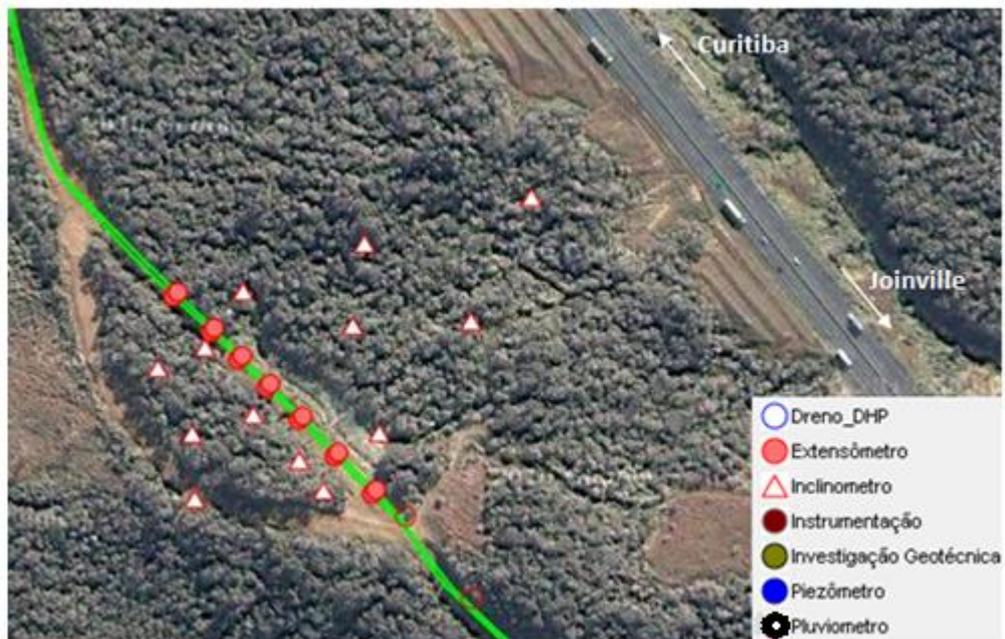
A instrumentação da encosta é composta por diversos equipamentos, distribuídos de forma a acompanhar a movimentação do terreno e a respectiva influência nas tubulações enterradas, sendo:

- a) 90 drenos sub-horizontais profundos;
- b) 3 medidores de nível da água;
- c) 21 piezômetros;
- d) 13 inclinômetros;
- e) 42 extensômetros do tipo corda vibrante, sendo 3 extensômetros em cada uma das 7 seções instrumentadas nos trechos dos oleodutos OSPAR 30” e OPASC 10”.

As figuras 19 e 20 permitem identificar o local de instalação dos instrumentos. Para uma melhor visualização dos mesmos foram utilizadas imagens de satélite integradas com a locação dos equipamentos, através da interface do programa GIS – *Geographic Information System*.

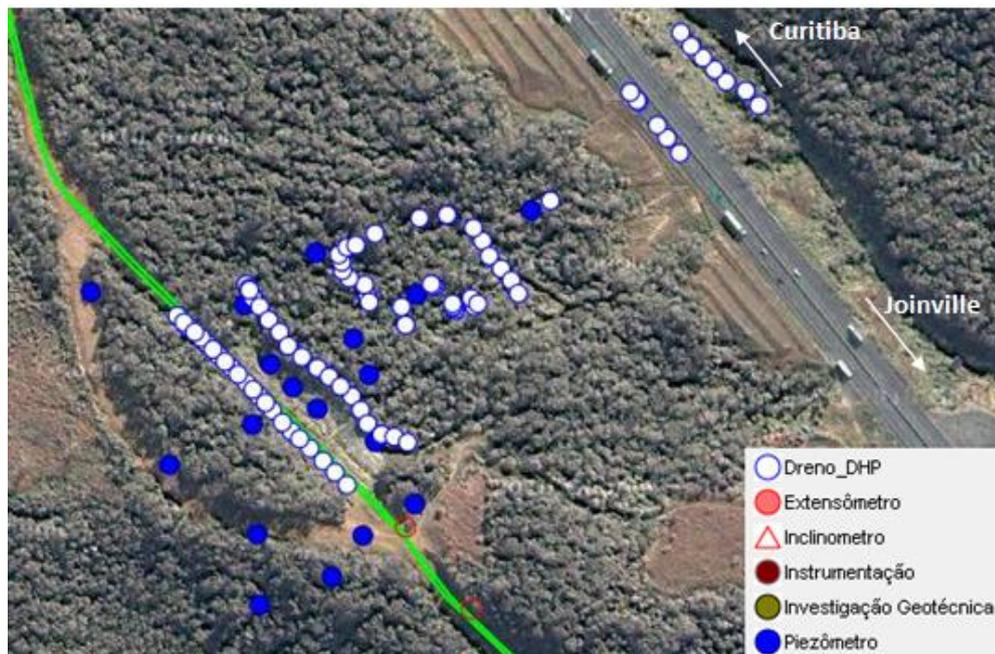
Além dos pontos instrumentados, a caracterização da encosta conta ainda com diversos pontos de sondagem para reconhecimento do subsolo. Nas proximidades existe ainda a estação pluviométrica de Itararé – cerca de 2 km do ponto analisado –, permitindo a correlação dos resultados obtidos com dados climáticos da região.

Figura 20 – Localização dos inclinômetros e extensômetros



(fonte: GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM, 2011)

Figura 21 – Localização dos drenos e piezômetros



(fonte: GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM, 2011)

6.3.2 Dados da investigação e instrumentação geotécnica

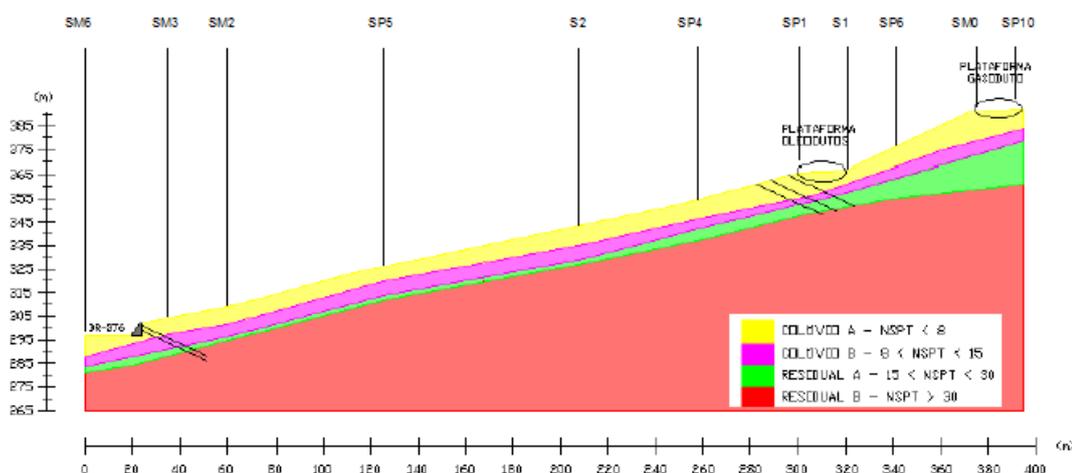
O acesso às leituras obtidas através da instrumentação geotécnica do trecho de estudo foi realizado através da plataforma Geodados.⁶ Foram coletadas informações referentes a todo período de instrumentação cadastrado na base de dados para os equipamentos listados no item anterior deste trabalho.

De forma a reduzir a abrangência do estudo e a complexidade do mesmo em função da vasta base de dados, optou-se por analisar o comportamento da encosta em função da monitoração dos inclinômetros ali instalados. A disposição dos dados se dará de forma gráfica para facilitar visualização e compreensão dos dados, logo após a caracterização da encosta em função da investigação do terreno. Por fim serão apresentados os dados pluviométricos obtidos na estação de Itararé.

6.3.2.1 Investigação geotécnica

Para caracterização da seção transversal típica da encosta, adotou-se o perfil geotécnico do subsolo apresentado por Tonus (2009, p. 67) de maneira simplificada, agrupando as classes Colúvio A e B – divididas pela autora em função do NSPT (índice de resistência a penetração) do solo – em uma só camada, elaborados em função dos laudos de sondagem realizados no local. A figura 21 ilustra o perfil obtido por Tonus (2009), indicando os pontos de investigação do terreno.

Figura 22 – Perfil geotécnico apresentado por Tonus (2009)

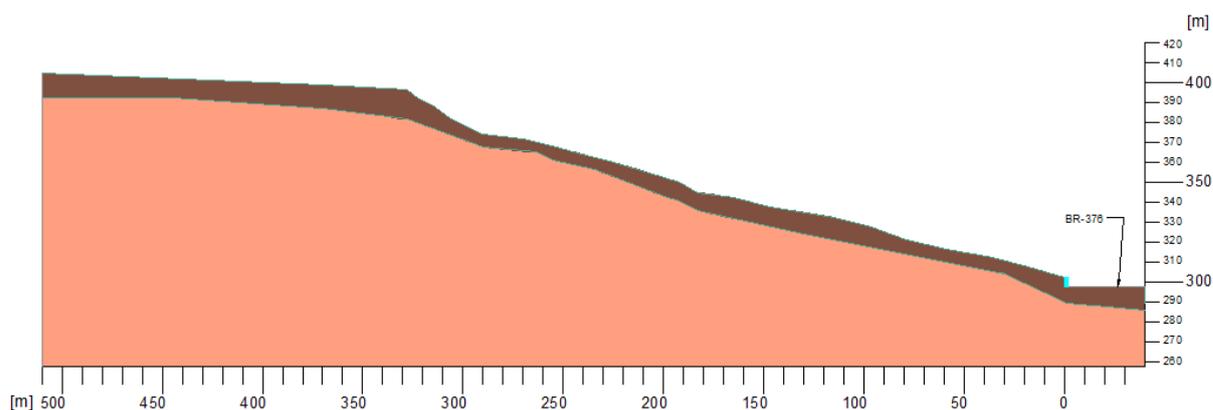


(fonte: adaptado de TONUS, 2009, p. 66-67)

⁶ Base de dados integrante do *software* Georisco, desenvolvido pela PUC/RJ para uso da Petrobras e Transpetro.

O perfil geotécnico da seção típica da encosta, considerado neste trabalho, é apresentado através da figura 22, em que as dimensões estão representadas em metros. Observa-se a adaptação do modelo proposto por Tonus, considerando camadas únicas de solo residual, inferior, e colúvio, superior.

Figura 23 – Perfil geotécnico da encosta



(fonte: elaborado pela autora)

6.3.2.2 Inclinômetros

A encosta de estudo possui 13 inclinômetros instalados de modo a acompanhar a movimentação do terreno. As características de instalação e operação dos equipamentos estão dispostas no quadro 8.

Quadro 8 – Características de instalação e operação dos inclinômetros

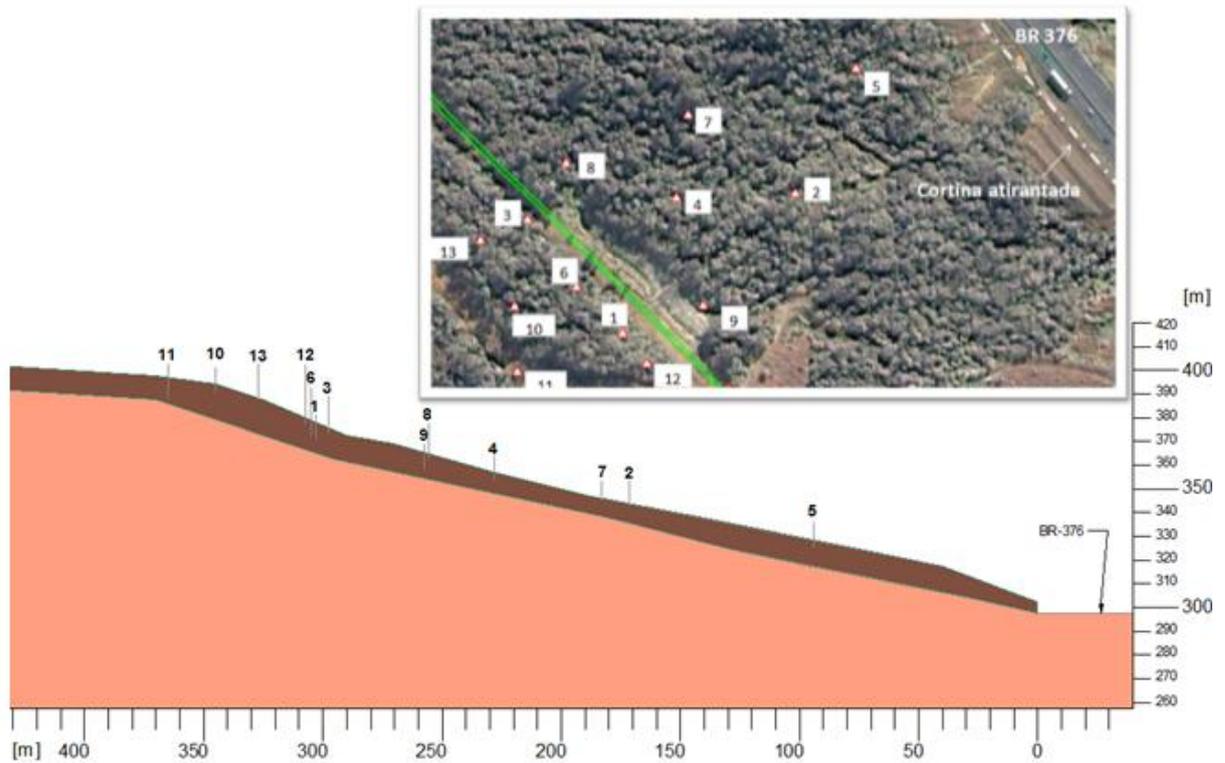
Nome	Nº de leituras	Coordenadas (N)*	Coordenadas (E)*	Cota terreno (m)	Cota topo inst. (m)	Comprimento (m)	Azimute
INC-4350.02-055.800-001	37	7133350,1	707718,44	370,505	370,8	22	205º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-002	35	7133433,36	707824,69	342,378	342,693	21	51º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-003	36	7133419,91	707661,88	377,595	377,875	22,5	195º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-004	36	7133431,81	707752,44	353,406	353,746	19,5	240º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-005	36	7133508,56	707862,76	325,29	325,68	22	90º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-006	36	7133378,44	707690,81	372,013	372,333	19,5	244º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-007	37	7133481,98	707760,33	346,419	346,879	18,5	36º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-008	36	7133453,85	707685,75	368,371	368,681	16,5	37º 0' 0"
INC-4350.02-055.800-009	36	7133366,03	707767,59	358,378	358,693	19,5	22º 0' 00"
INC-4350.02-055.800-010	37	7133367,38	707653,22	390,971	391,391	22	267º 0' 00"
INC-4350.02-055.800-011	34	7133327,63	707654,16	387,45	387,88	38	216º 0' 00"
INC-4350.02-055.800-012	38	7133331,39	707732,87	379,968	380,378	25	338º 0' 00"
INC-4350.02-055.800-013	35	7133407,77	707632,89	396,764	397,169	38	38º 0' 00"

* Coordenadas UTM zona 22S

(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

A figura 23 representa a localização dos mesmos em planta e na seção do talude. De modo a preservar ao máximo as características da instrumentação, para a locação dos mesmos na seção foram consideradas tanto a posição no talude quanto a cota em que os instrumentos foram instalados. O traçado em verde representa a diretriz dos oelodutos, sendo a rodovia

Figura 24 – Localização dos inclinômetros na encosta de estudo

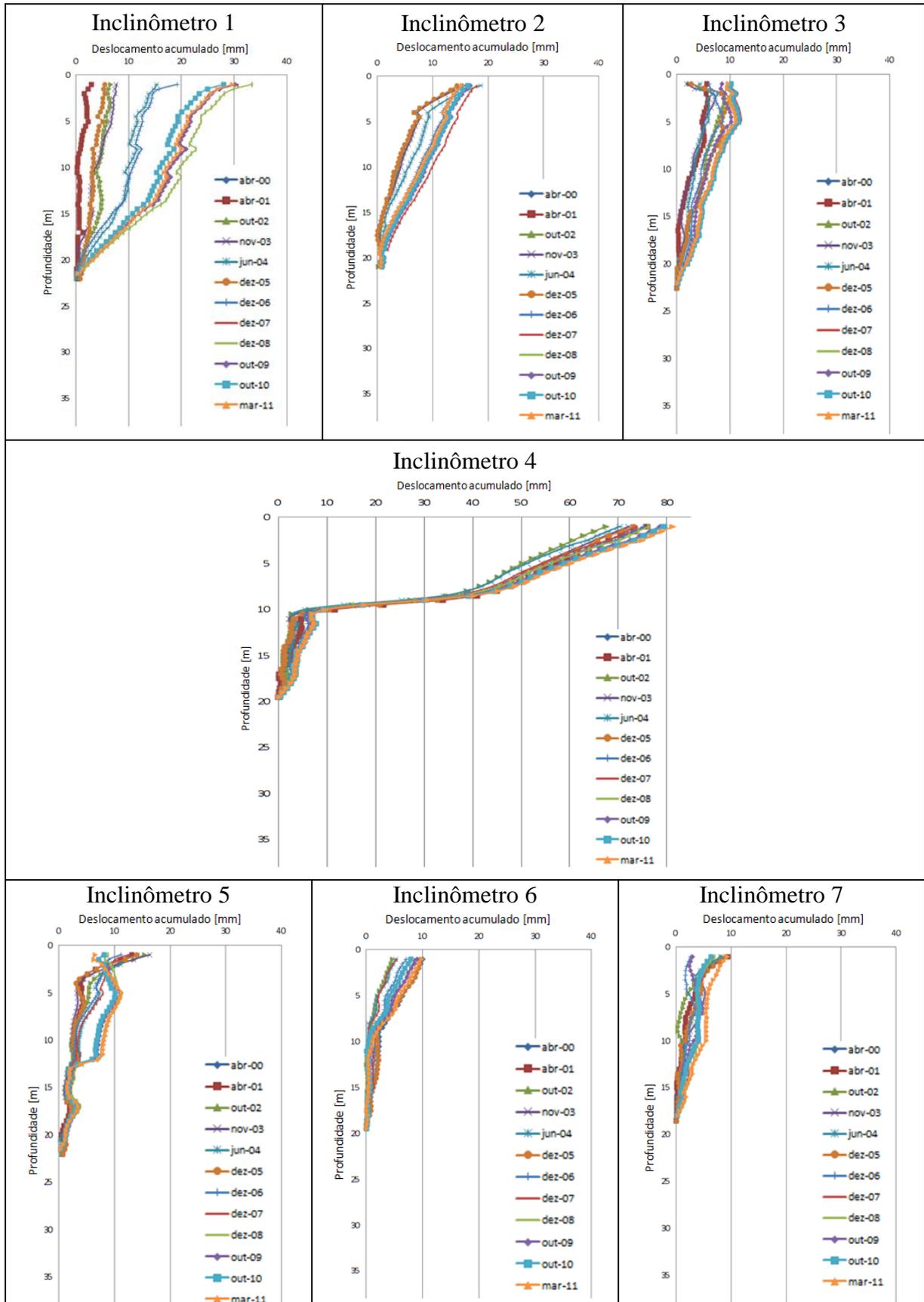


(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos através da leitura dos inclinômetros. Cabe ressaltar que a quantidade de equipamentos instalados foi sendo acrescida com o passar dos anos, motivo pelo qual nem todos os instrumentos possuem o mesmo período de monitoração.

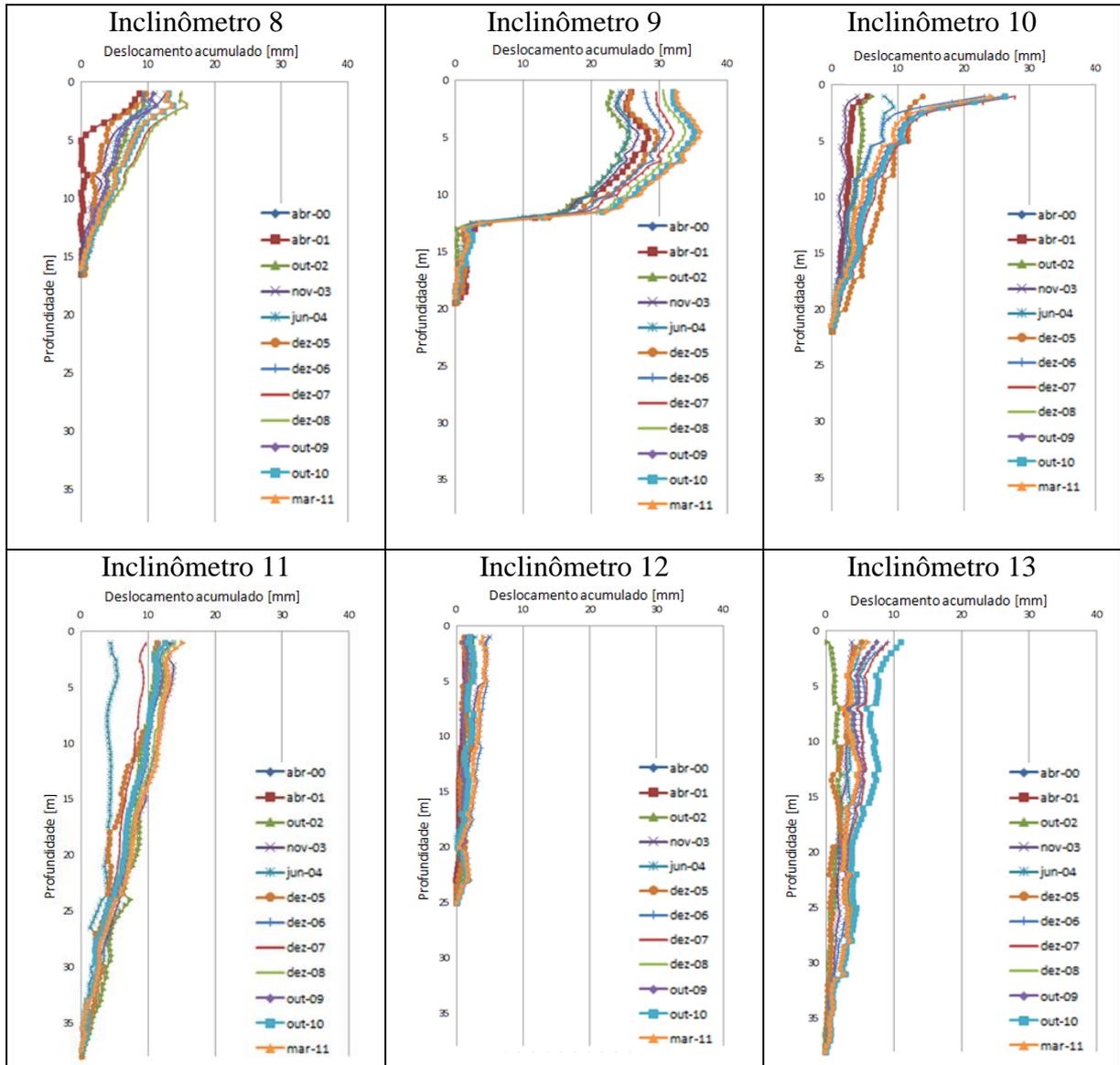
Os gráficos dispostos nas figuras 24 e 25 apresentam a evolução dos deslocamentos em função da profundidade. Trata-se de dados acumulados, sendo necessário, portanto, descontar a leitura anterior para valorar o deslocamento em um determinado ano.

Figura 25 – Deslocamento acumulado por profundidade para os inclinômetros 1 a 7



(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Figura 26 – Deslocamento acumulado por profundidade para os inclinômetros 8 a 13

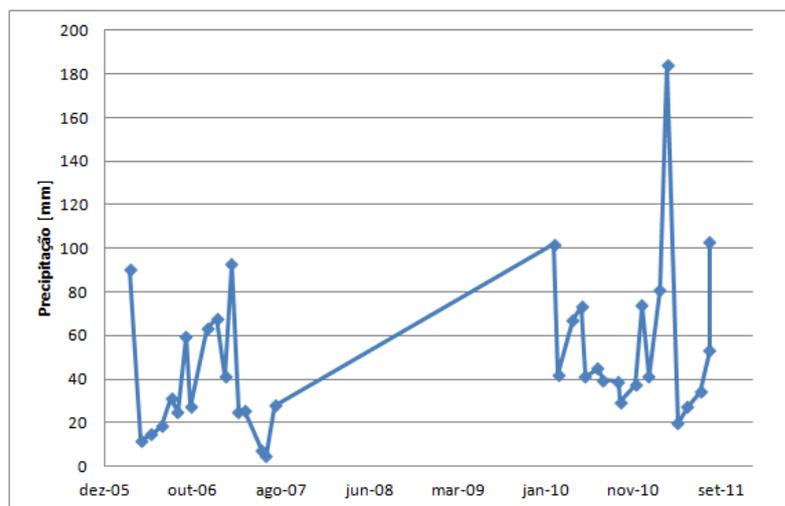


(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

6.3.2.3 Dados Pluviométricos

A Estação Itararé está localizada cerca de 2 km de distância do trecho analisado neste trabalho. Em operação desde 2006, a estação conta com aparelhagem capaz de mensurar a intensidade da precipitação diariamente. Os dados são disponibilizados através da plataforma Geodados, sendo que o *software* apresenta ainda dados de precipitação acumulada em 25 dias ou anualmente. A figura 26 ilustra os resultados de medição durante o período monitorado, considerando como critério a precipitação máxima a cada mês analisado.

Figura 27 – Precipitação mensal em função do tempo



(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Cabe salientar que o período compreendido entre julho de 2007 e fevereiro de 2010 não foi monitorado, devido a problemas ocorridos na estação. A ausência de dados é representada através da linha reta unindo a última medição anterior ao período não monitorado e a imediatamente posterior a retomada de operação.

Diversos autores apontam critérios para definição de chuvas críticas, que podem ser relacionadas à ocorrência de deslocamentos em encostas. Conforme Moreira e Pires Neto (1998, p. 69), chuvas curtas e de grande intensidade podem ser responsáveis por ações mais danosas do que chuvas distribuídas em um maior intervalo, com a mesma precipitação total. Os autores apontam ainda a criticidade da ocorrência das mesmas no final de períodos chuvosos, em que o solo geralmente encontra-se saturado. Já Sandroni (2004, p. 238), relaciona a movimentação com períodos consecutivos de grandes precipitações acumuladas.

Desta forma, optou-se por utilizar o critério de acumulação de 25 dias, disponibilizado pela base de dados. O quadro 9 dispõe os dados de precipitação acumulada conforme o critério estabelecido, sendo adotada a maior precipitação acumulada registrada anualmente.

Quadro 9 – Precipitação acumulada e valores adotados

Período	Precipitação Acumulada* [mm]	Precipitação Adotada [mm]**	Período	Precipitação Acumulada [mm]	Precipitação Adotada [mm]**
mar-06	363,0	394,2	fev-10	266,0	459,2
abr-06	372,0		mar-10	456,0	
mai-06	42,2		abr-10	280,0	
jun-06	69,2		mai-10	320,8	
jul-06	90,4		jun-10	340,0	
ago-06	96,8		jul-10	222,0	
set-06	187,6		ago-10	312,4	
out-06	225,4		set-10	149,4	
nov-06	368,2		out-10	243,0	
dez-06	394,2		nov-10	206,6	
jan-07	420,2	420,2	dez-10	459,2	761,6
fev-07	395,8		jan-11	409,0	
mar-07	372,0		fev-11	468,2	
abr-07	153,2		mar-11	761,6	
mai-07	9,0		abr-11	594,4	
jun-07	27,8		mai-11	113,6	
jul-07	72,2		jun-11	128,0	

* critério de acumulação: 25 dias

** considerando a maior precipitação acumulada registrada durante o ano

(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

7 ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar a análise dos dados anteriormente expostos, buscando compreender o movimento ao qual a encosta está submetida e as possíveis influências desta movimentação nas tubulações ali instaladas. A utilização da instrumentação como meio de verificar as condições aos quais os dutos estão expostos será ressaltada, indicando a sua aplicabilidade.

Primeiramente, porém, serão abordadas as adequações que se fizeram necessárias para correta interpretação dos dados. A consideração inicial de um perfil transversal único representando a encosta não permitiu a análise dos dados em função das divergências encontradas entre a seção idealizada e a situação real, dificultando a correlação entre leituras, características operacionais dos equipamentos e geometria da encosta.

A seguir serão apresentadas as alterações realizadas na seção representativa da encosta, em função de levantamentos topográficos e perfis de sondagem, além da análise do comportamento do talude através da interpretação de dados de deslocamento acumulado. Por fim, a velocidade de movimentação das camadas de solo será correlacionada com os dados pluviométricos da região.

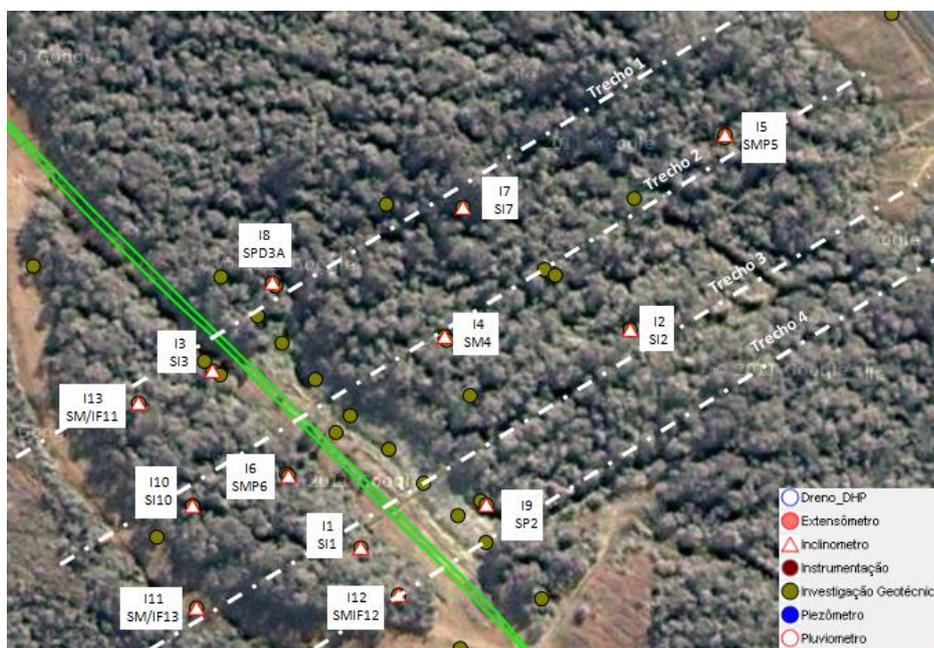
7.1 ADEQUAÇÕES PARA REPRESENTAÇÃO DA ENCOSTA

Com intuito de possibilitar uma análise mais precisa dos dados, seções transversais adicionais da encosta foram geradas, adaptando o perfil típico inicial baseado em Tonus (2009). Para tal foram utilizadas informações obtidas através de relatórios de investigação geotécnica – cuja consulta foi realizada através do software Geodados –, e levantamento topográfico disponibilizado pela Transpetro. Buscou-se, com isso, preservar ao máximo as características locais observadas, tanto em relação à posição quanto à cota de instalação dos inclinômetros. Assim, a encosta foi dividida em quatro seções, compostos pelos seguintes equipamentos:

- a) seção 1: inclinômetros 13, 3, 8 e 7;
- b) seção 2: inclinômetros 10, 6, 4 e 5;
- c) seção 3: inclinômetros 11, 1 e 2;
- d) seção 4: inclinômetros 12 e 9.

A divisão das seções buscou respeitar o alinhamento dos inclinômetros no terreno. A figura 27 permite observar os pontos de investigação geotécnica no local, a correlação com os inclinômetros e a delimitação das seções consideradas.

Figura 28 – Pontos de investigação geotécnica e instrumentação



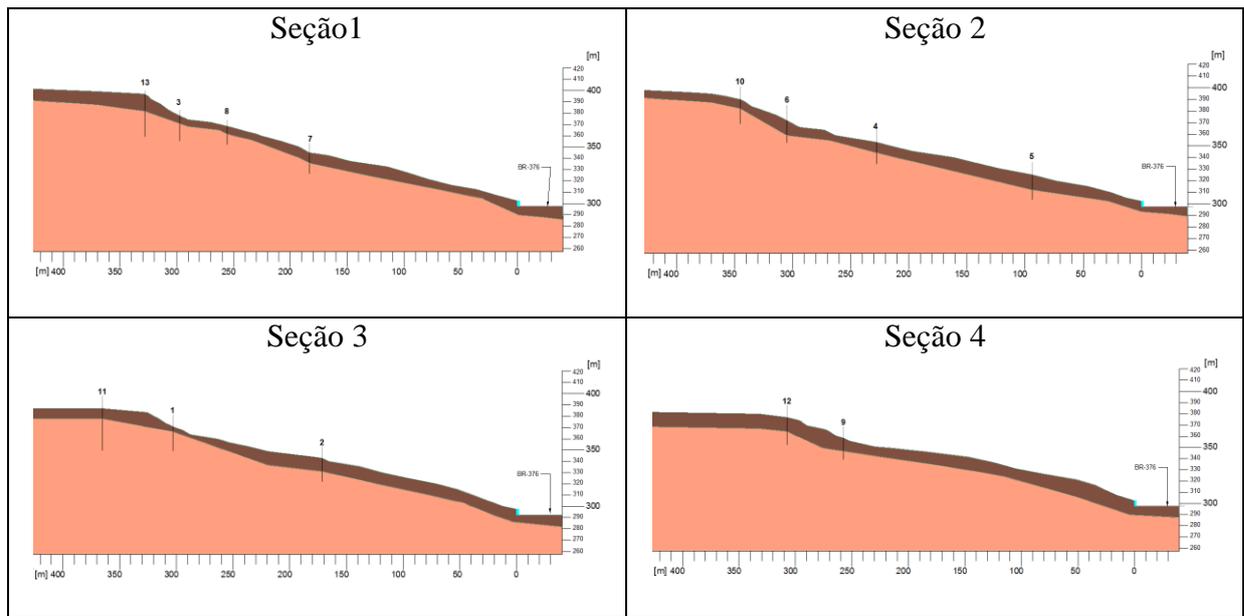
(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Salienta-se que, para construção do perfil utilizado na análise de cada trecho, foram priorizadas as cotas de instalação e de terreno associadas a cada instrumento, sendo as demais cotas aproximadas em função das curvas de nível. A consideração simplificada do perfil de subsolo, distinguindo camadas residuais e coluvionares, foi mantida.

A determinação da espessura de colúvio teve como base a caracterização do material, indicada no relatório de sondagem, para cada furo representativo de cada um dos inclinômetros. As demais espessuras foram estimadas através da sondagem mais próxima, ou mantendo a espessura entre dois pontos de medidas subsequentes. Ressalta-se ainda que, em função da inexistência de dados acima da plataforma do gasoduto, a espessura da camada coluvionar adotada no inclinômetro mais próximo foi mantida.

A figura 28 apresenta as seções adotadas para cada um dos quatro trechos de análise estabelecidos. A diferença entre as mesmas consiste, basicamente, na espessura da camada superior e geometria adotada.

Figura 29 – Perfil adotado para cada seção de análise



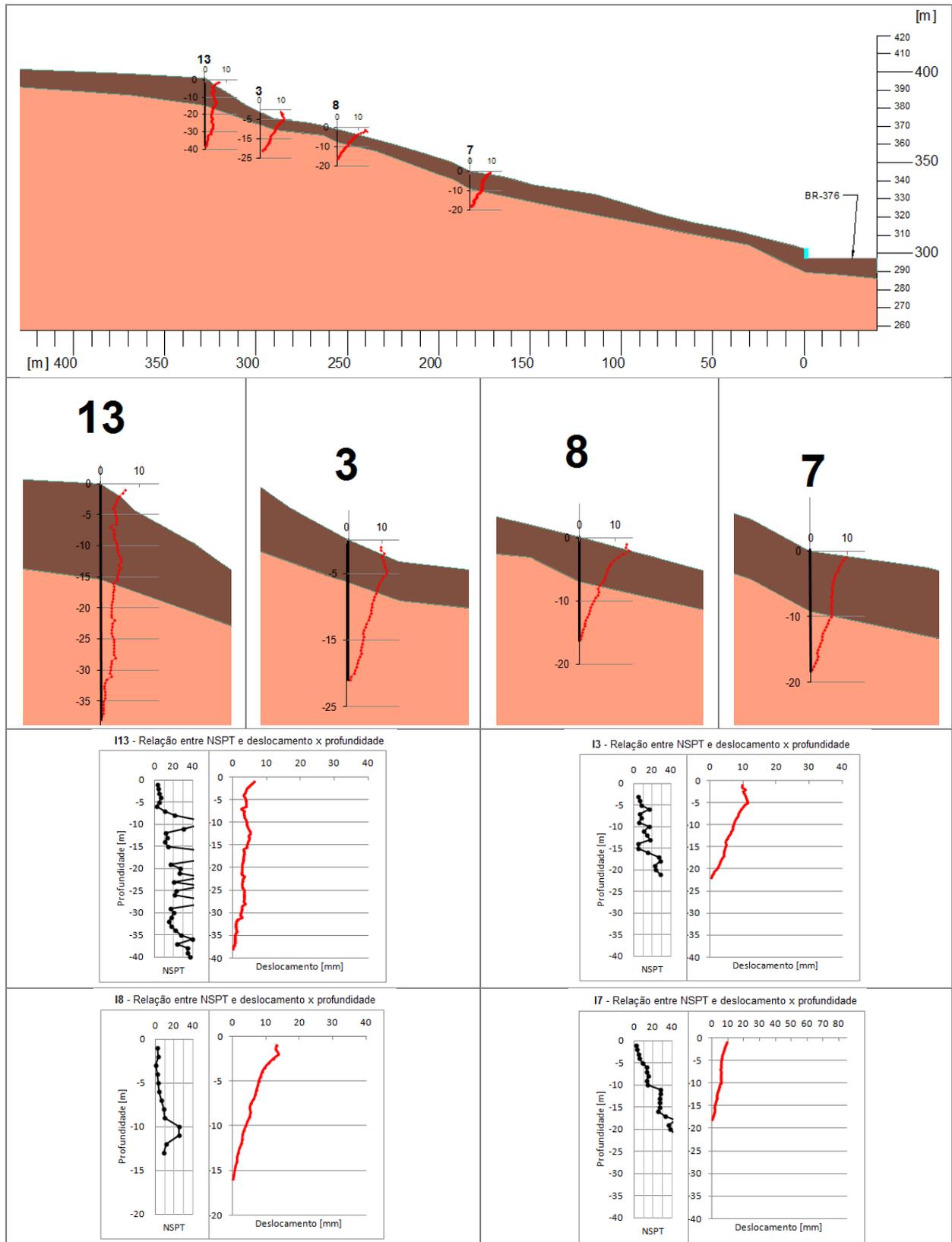
(fonte: elaborado pela autora)

7.2 DESLOCAMENTO ACUMULADO

Após a adequada representação da encosta, considerando as particularidades de cada seção a ser analisada, passou-se para a interpretação dos dados obtidos através das leituras dos inclinômetros. A utilização de dados de deslocamento acumulado, relacionados à profundidade de instalação com intervalos de meio metro, possibilita a visualização de camadas preferenciais de deslocamento e da evolução do mesmo nas camadas mais profundas, permitindo avaliar as condições de ancoragem do instrumento.

Na sequência serão apresentados os valores de deslocamento acumulado, obtidos através da leitura dos inclinômetros, para o ano de 2011. Nas figuras 29 a 34, as leituras encontram-se plotadas diretamente no perfil da encosta, permitindo relacionar os deslocamentos com a posição no talude, profundidades e respectivas camadas de solo, além de apresentar a comparação com o respectivo perfil de sondagem. Salienta-se que, para permitir uma melhor visualização dos dados, os deslocamentos – plotados no eixo x, em milímetros –, tiveram sua escala ampliada. A profundidade de instalação dos equipamentos está representada no eixo y, sendo dada em metros.

Figura 30 – Análise inclinômetros: seção 1

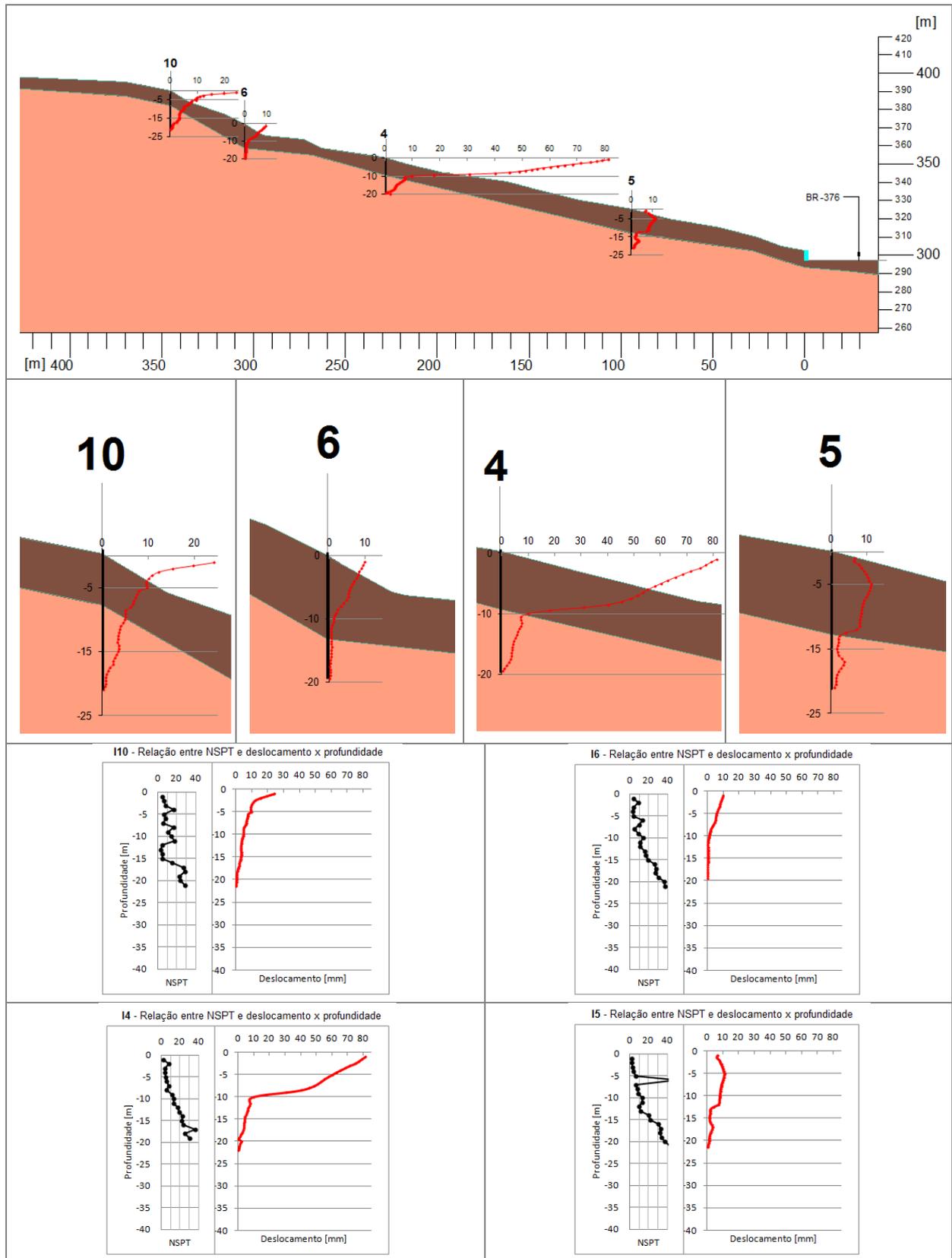


(fonte: elaborado pela autora)

Através da análise da figura 29 pode-se observar a acentuação dos deslocamentos no contato entre a camada de solo residual e coluvionar, com espessura média na seção 1 entre 7 e 15 m. A espessura da camada de colúvio foi representada na seção da encosta de acordo com a caracterização do solo, conforme consta nos relatórios de investigação utilizados, sendo o mesmo procedimento adotado nos demais trechos.

O perfil geotécnico associado ao inclinômetro 13, próximo a faixa do gasoduto, indica a presença de matacões de gnaiss e a sobreposição de camadas mais alteradas e rijas de solo, representadas por picos nos gráficos. Já a zona central da encosta – inclinômetro 7 – apresenta camadas de areia siltosa, intercaladas com argila nos primeiros 10 metros de profundidade, apresentando resistência a penetração crescente a partir deste ponto, sendo evidenciada a presença de rocha alterada a partir dos 28 metros.

Figura 31 – Análise inclinômetros: seção 2



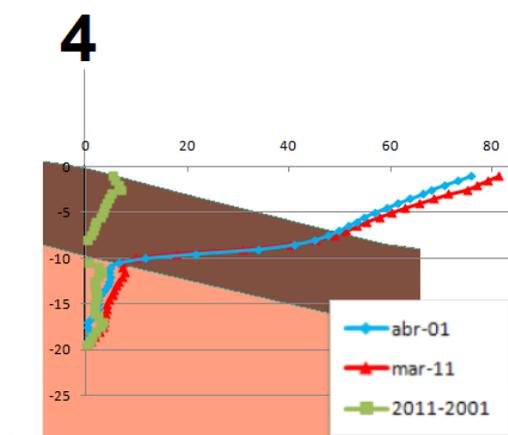
(fonte: elaborado pela autora)

Assim como na seção 1, percebe-se uma amplitude de deslocamento a partir da camada de solo residual, com espessuras variando entre 8 e 13 m nesta seção do talude. A caracterização do material encontrado, disposta nos relatórios de sondagem, indica a camada residual iniciando a cerca de 4 m de profundidade nos pontos de instalação dos inclinômetros 10 e 4. Observa-se, porém, que a camada subsequente possui NSPT inferior a 8 golpes, associada a deslocamentos de mesma ordem dos registrados nas camadas coluvionares. Nestes casos a espessura da camada de colúvio foi estendida na representação gráfica do trecho 2 da seção do talude.

O inclinômetro 4, instalado aproximadamente na zona central do movimento, apresenta deslocamentos bastante acentuados, em comparação com as leituras obtidas nos demais instrumentos. Ressalta-se que a escala de leituras deste equipamento foi distorcida, a fim de representá-lo. O perfil de sondagem neste ponto mostra uma extensão próxima a 10 m de camadas compostas basicamente por argilas arenosas, de consistência mole a média, apesar de o material ser classificado como residual a partir dos 4 m de profundidade.

É importante salientar que o equipamento apresenta incrementos anuais de deslocamento variando entre 1 a 2 mm, sendo o mesmo comportamento apresentado pelos demais instrumentos. Justifica-se o maior valor de deslocamento registrado neste inclinômetro como função do uso de medidas acumuladas, já que o mesmo foi instalado em uma zona que apresentou maior movimentação inicial, conforme demonstra a figura 31.

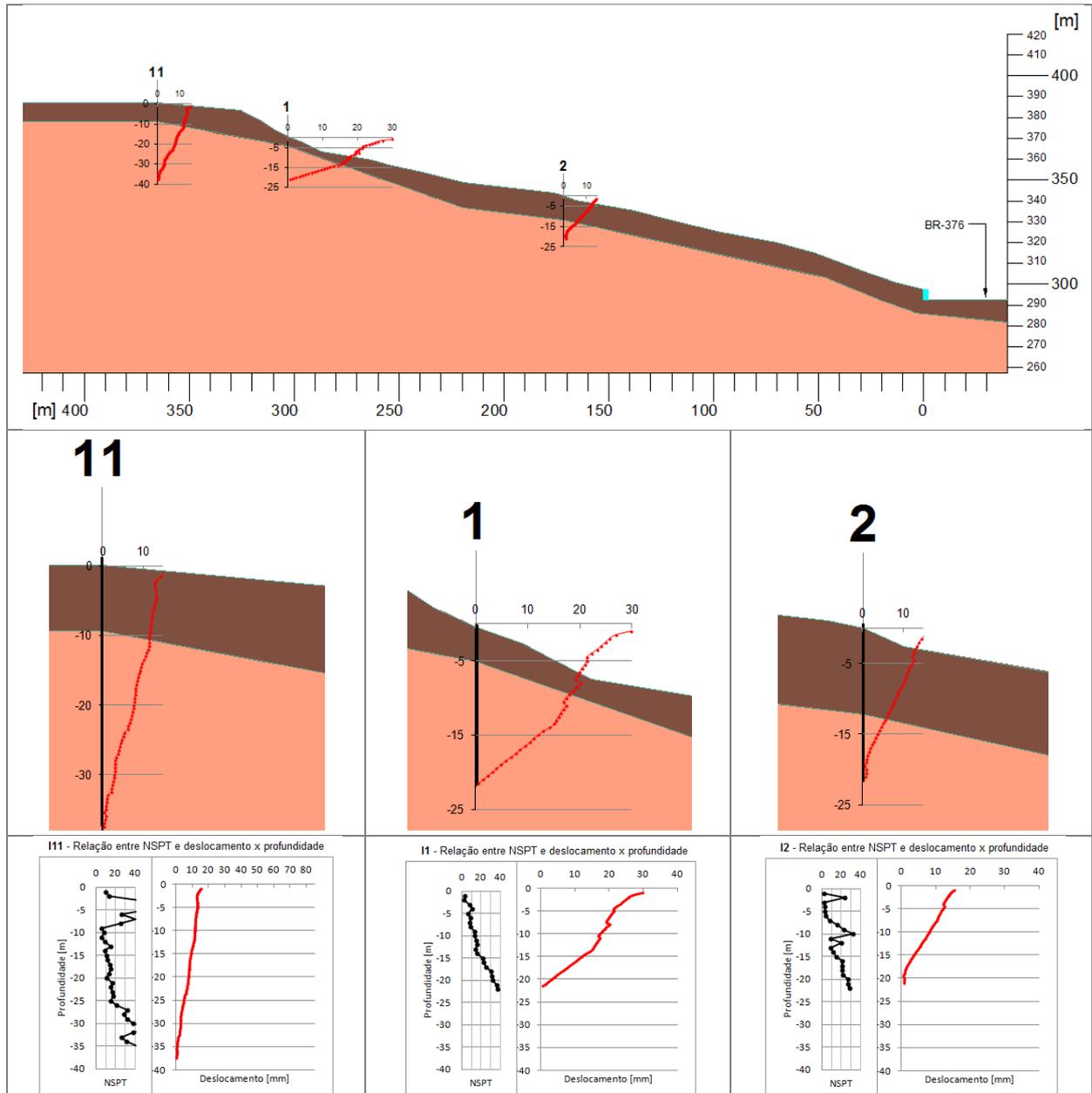
Figura 32 – Comparação entre as leituras de deslocamento acumulado obtidas nos anos de 2001 e 2011, para o inclinômetro 4



(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

A figura 31 evidencia o grande deslocamento inicial registrado em abril de 2001, a leitura acumulada para o ano de 2011 e destaca o pequeno movimento horizontal de aproximadamente 5 mm ocorrido nos dez anos seguintes, obtido através da diferença entre as leituras de 2001 e 2011. Percebe-se a estabilização no movimento do inclinômetro, com deslocamentos da ordem de milímetros.

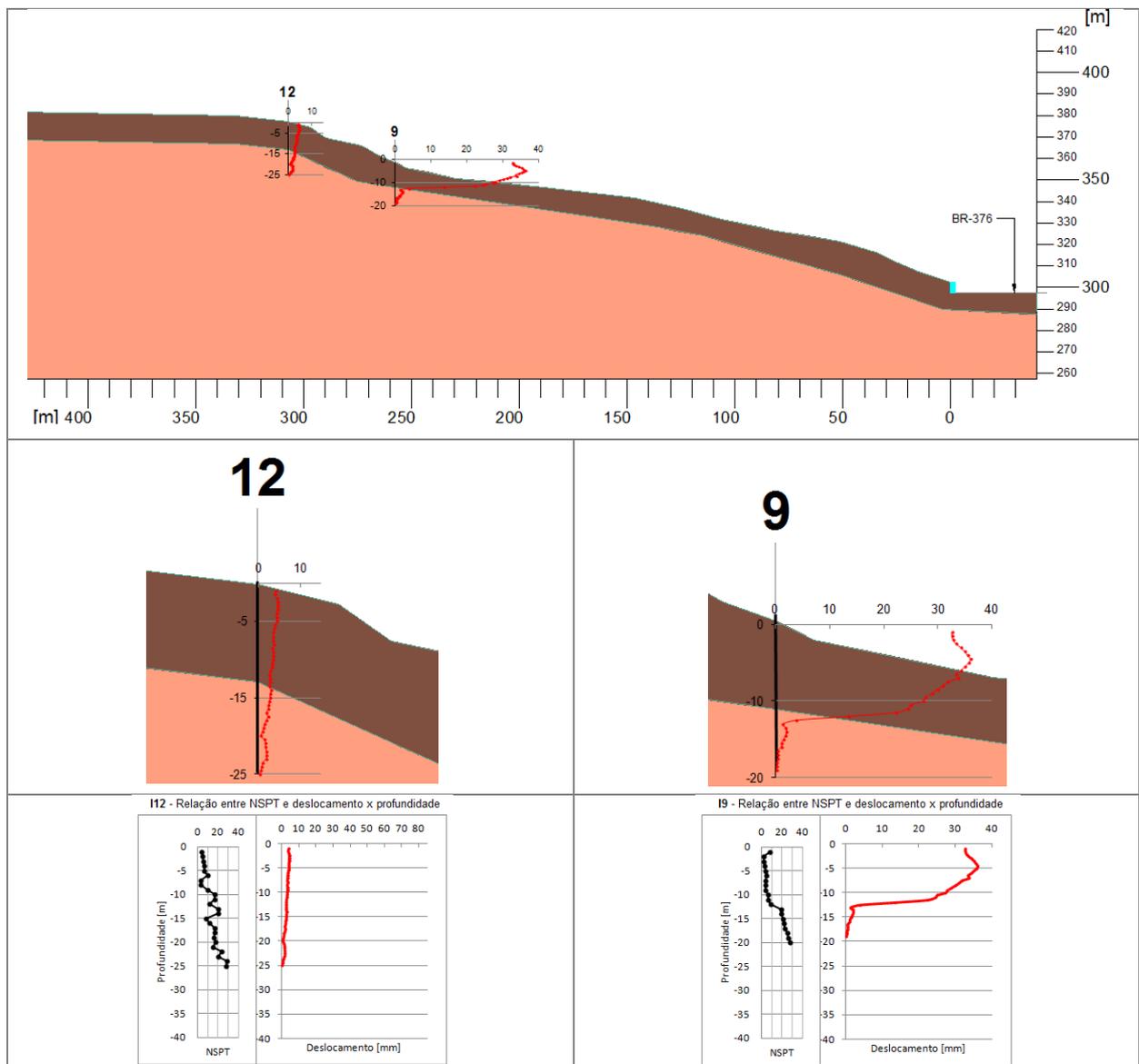
Figura 33 – Análise dos inclinômetros: seção 3



(fonte: elaborado pela autora)

Nesta seção a camada coluvionar apresenta espessuras variando entre 6 e 12 m. No ponto de instalação do inclinômetro 11, foi registrada a presença de matacões e camadas mais rijas de solo entre 2 e 8 metros de profundidade, seguidas de camadas espessas de silte argiloso de consistência média. No ponto de instalação do inclinômetro 2, as sondagens indicam uma camada de areia fina siltosa, muito compacta, na interface entre o solo residual e coluvionar, sendo seguida, no sentido de crescimento da profundidade, por estrato de argila medianamente compacta. Observa-se um movimento mais acentuado nas camadas inferiores de solo, caracterizadas como residual. Tal comportamento, presente também em outros instrumentos, é evidenciado na análise do inclinômetro 1.

Figura 34 – Análise dos inclinômetros: seção 4

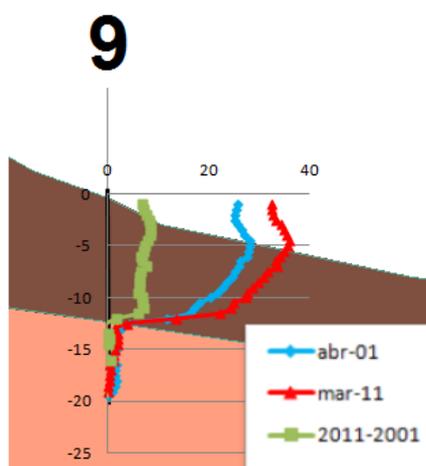


(fonte: elaborado pela autora)

Como se pode observar, a espessura de colúvio na quarto seção da encosta varia entre 9 e 12 metros. Fica evidente a movimentação no contato entre a camada residual e coluvionar no ponto de instalação do inclinômetro 9.

Assim como no inclinômetro 4, a movimentação mais acentuada – em comparação com as leituras obtidas nos demais instrumentos –, vinculada ao inclinômetro 9, está associada ao deslocamento inicial registrado em 2001. A figura 34 apresenta os deslocamentos acumulados para os anos de 2001 e 2011, assim como a diferença entre as leituras neste período. Observa-se um incremento inferior a 7 mm durante os dez anos de monitoração.

Figura 35 – Comparação entre as leituras de deslocamento acumulado obtidas nos anos de 2001 e 2011, para o inclinômetro 9



(fonte: elaborado pela autora)

Com a análise das quatro seções representativas da encosta, constata-se que os maiores movimentos estão associados às camadas superiores do terreno. Apesar disso, muitos dos instrumentos apresentam evidências de deslocamentos em camadas mais profundas, em material já caracterizado como residual, como por exemplo, o comportamento registrado nos inclinômetros 1 e 2, integrantes do terceiro trecho de análise.

Em todas as seções avaliadas, os dutos encontram-se instalados na camada caracterizada como coluvionar, na qual os maiores deslocamentos foram registrados. Os inclinômetros 8 e 9, posicionados logo abaixo a plataforma dos oleodutos, indicam movimentos acumulados inferiores a 10 mm, durante os dez anos de monitoração.

No trecho acima da faixa dos dutos OSPAR e OPASC, o movimento acumulado registrado fica próximo aos 10 mm, como observado nos inclinômetros 3 e 6. O inclinômetro 1, também instalado no trecho acima da plataforma, apresenta deslocamento acumulado na ordem de 30 mm. Apesar de a leitura registrada em 2001 não exceder 5 mm – o que corresponde a um incremento de 25 mm nos dez anos subsequentes, superior aos demais –, o movimento encontra-se estabilizado desde 2007, não apresentando variações significativas desde então.

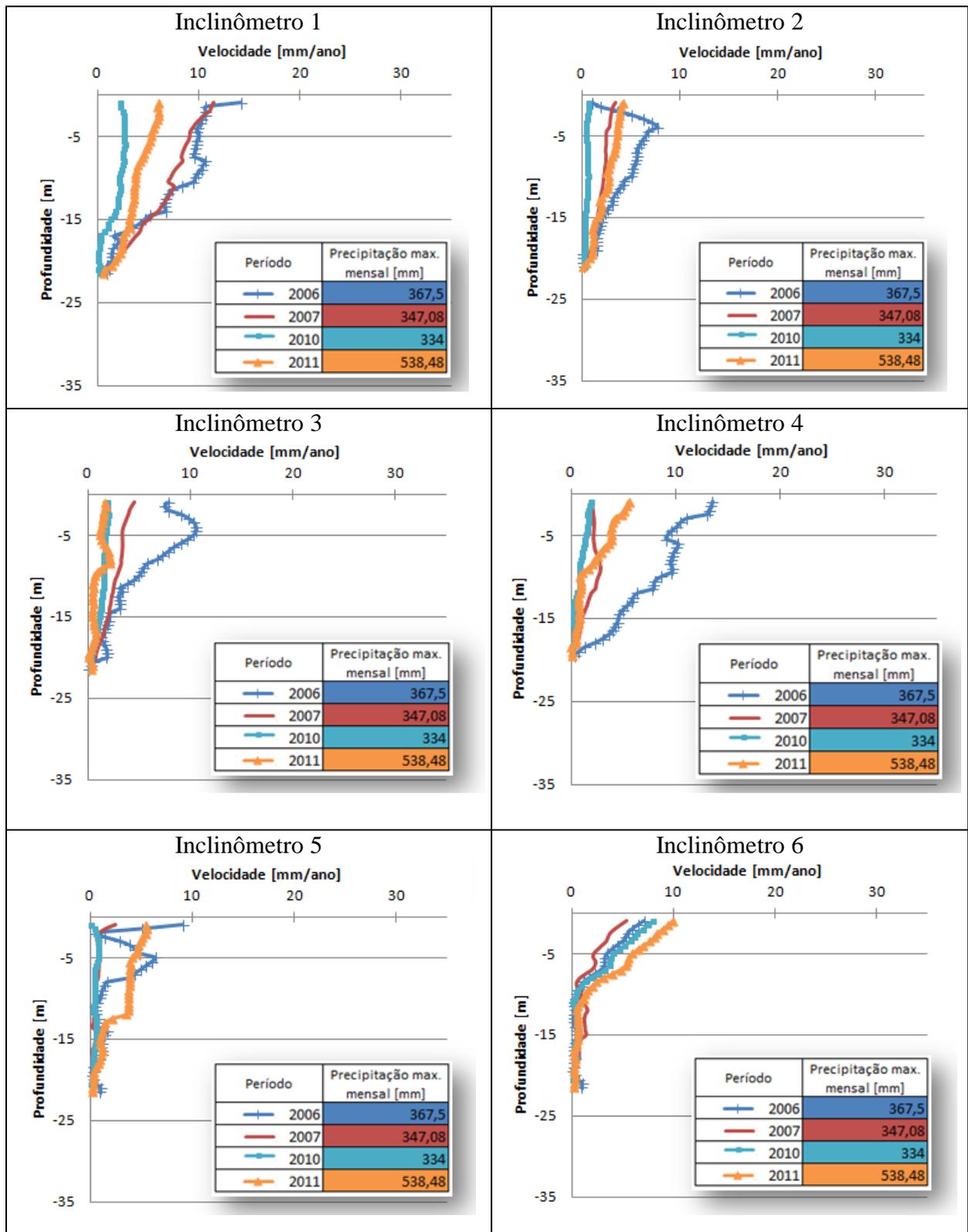
Em todas as situações os dutos encontram-se instalados na camada coluvionar, estando sujeitos a movimentação do terreno. Rupturas em dutos em encosta de movimentos lentos geralmente estão associadas ao acréscimo progressivo de tensões. Se faz, portanto, necessário um acompanhamento da evolução dos movimentos de forma a garantir a operação segura da tubulação.

7.3 VELOCIDADE DO MOVIMENTO E PRECIPITAÇÃO

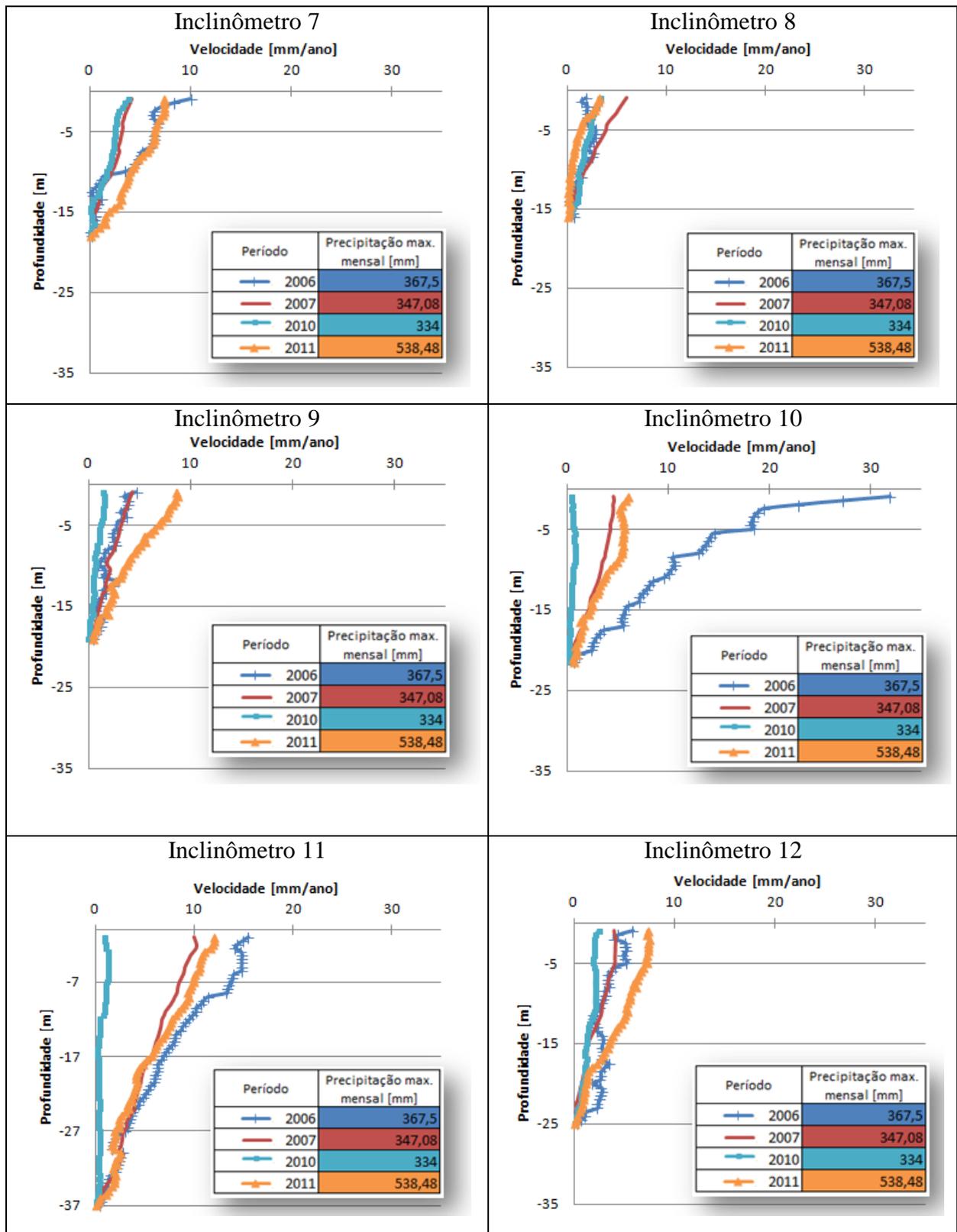
Além da compreensão do processo de movimentação do terreno – como magnitude dos deslocamentos e existência de camadas preferenciais –, a análise das leituras dos inclinômetros permite ainda avaliar a evolução do movimento em períodos determinados. O estudo destes dados, avaliados juntamente com dados obtidos de outros equipamentos – piezômetros e dados pluviométricos, por exemplo –, permite identificar quais os fatores relacionados e de que modo influenciam no processo de dinâmica observado.

De acordo com Sandroni (2004, p. 238), geralmente os movimentos translacionais de colúvios se aceleram em função da elevação dos níveis piezométricos durante períodos de grandes chuvas, sendo essa velocidade de movimentação dependente do regime pluviométrico da região. Com intuito de analisar esta influência na movimentação da encosta de estudo, foram utilizados dados pluviométricos coletados na estação Itararé apresentados anteriormente.

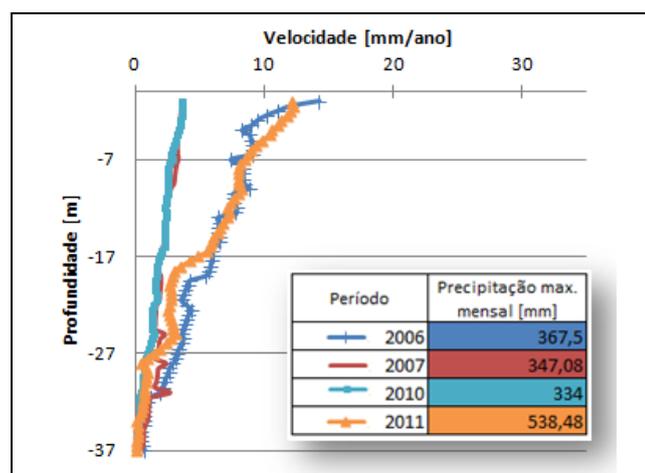
Nas figuras 35 a 37 são apresentadas de forma gráfica, a velocidade de deslocamento, em milímetros por ano, para os inclinômetros 1 a 13. Estão representados apenas os deslocamentos correspondentes aos anos de 2006, 2007, 2010 e 2011, cujas médias pluviométricas foram anteriormente apresentadas, e estão indicadas também nas legendas das ilustrações.

Figura 36 – Velocidade *versus* profundidade para os inclinômetros 1 a 6

(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Figura 37 – Velocidade *versus* profundidade para os inclinômetros 7 a 12

(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Figura 38 – Velocidade *versus* profundidade para o inclinômetros 13

(fonte: adaptado de GEODADOS, 2011)

Através da observação dos dados expostos nas figuras 35 a 37 constata-se que não há um comportamento uniforme da velocidade em função das precipitações consideradas. Apesar de alguns equipamentos apresentarem deslocamentos mais acentuados vinculados a precipitação média acumulada de 761,6 mm – registrada em março do último ano considerado na análise –, nem sempre a chuva associada ao ano de 2011 corresponde à maior velocidade da movimentação.

Muitos são os fatores que podem ser atribuídos a não uniformidade dos resultados. Primeiramente podem-se citar as considerações adotadas em relação aos dados pluviométricos. A presença de lacunas no período de monitoramento – não foram coletados dados entre julho de 2007 e fevereiro de 2010 – prejudicou uma análise mais homogênea dos dados, já que os períodos avaliados não tinham a mesma distribuição.

O período de acumulação das chuvas é um fator determinante para correto entendimento do problema. Conforme apontado por Sandroni (2004, p. 38), a determinação de critérios que possibilitem a definição da intensidade e duração críticas ainda são discutidos por diversos autores. Muitas vezes são consideradas precipitações horárias ou acumuladas em pequenos intervalos de tempo.

Outro fator que pode ser apontado é a interferência de obras realizadas na encosta durante o período de monitoração. A ampliação de sistemas de drenagem e outras intervenções podem modificar o sistema de escoamento superficial e infiltração, influenciando nas leituras obtidas

com os inclinômetros. Tais ações devem ser corretamente levantadas e consideradas no caso de uma avaliação mais precisa do comportamento geral do talude.

A análise da influência das precipitações na evolução do movimento, ou na elevação do nível água, permite, além de compreender o comportamento, determinar ações necessárias para garantir a estabilidade do terreno e integridade das tubulações enterradas. Permite, ainda, avaliar a eficiência de medidas estabilizantes aplicadas na região, vinculando a uma redução do deslocamento, por exemplo.

A monitoração e cruzamento de dados auxiliam ainda na programação de inspeções e manutenções. Após a identificação de critérios críticos para o trecho analisado (chuva diária, por exemplo), podem ser criados planos de inspeção e manutenção específicos para os períodos mais suscetíveis, concentrando as ações nas zonas em que a instrumentação se mostrou mais sensível, com maiores movimentos associados.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho buscou-se compreender como a instrumentação geotécnica pode ser utilizada para monitoramento de oleodutos e gasodutos instalados em regiões sujeitas a movimentação do terreno. Após o resgate bibliográfico, constata-se a importância da consideração do risco geotécnico nos planos de gerenciamento adotados pelas operadoras de linhas dutoviárias.

Os altos custos associados a rupturas em dutos em função de fatores geológicos-geotécnicos, bem como grandes impactos sociais, econômicos e ambientais e paradas prolongadas na operação da tubulação justificam a implantação de programas de gerenciamento contundentes. São diversas as medidas que devem ser agregadas em tais programas, incluindo desde simples rotinas de inspeções e manutenções a obras complexas a fim de garantir a integridade de oleodutos e gasodutos.

Considerando a necessidade de se definir hierarquias e responsabilidades para avaliação dos georiscos, torna-se essencial que as etapas integrantes da base do processo sejam bem executadas. A identificação de evidências de processos de dinâmica superficial, ainda na fase inicial, permite muitas vezes a adoção de soluções simplificadas para estabilização do problema. Tais atividades são realizadas por inspetores e caminhadores que devem estar devidamente capacitados e orientados, visto que a maior parte das ocorrências nas faixas de dutos são por eles apontadas, passando quando cabível aos responsáveis pela análise.

A instrumentação geotécnica se insere neste contexto como uma ferramenta bastante eficaz para o monitoramento e controle de tubulações enterradas, permitindo avaliar o comportamento geotécnico do entorno e os impactos sobre a instalação. Nos casos de movimentos lentos, permite ainda que a situação seja gerenciada através da programação de inspeções nos períodos críticos, indicando a necessidade de obras estabilizantes e intervenções específicas.

Para que o plano de instrumentação seja eficaz, é necessário que seja adequadamente planejado, visando delimitar primeiramente quais as perguntas que devem ser respondidas com sua implantação. A determinação dos parâmetros a serem medidos, do tipo de movimento, além da magnitude e velocidades esperadas, são aspectos fundamentais para a escolha dos equipamentos e para a locação dos mesmos.

A maioria dos problemas correntes vinculados ao monitoramento de dutos em encostas instáveis pode ser solucionada com a instalação de inclinômetros, piezômetros e um adequado programa topográfico, além de estações confiáveis para coleta de dados climáticos. O emprego de equipamentos capazes de mensurar tensões nas paredes da tubulação, como o uso de extensômetros, auxilia a correlação dos dados obtidos com a instrumentação convencional com os modelos numéricos e computacionais que visam avaliar a distribuição das tensões e os impactos nos dutos.

O uso de inclinômetros para identificação de deslocamentos profundos permite compreender o processo de movimentação a que o talude encontra-se submetido. A identificação das profundidades que apresentam maior movimentação horizontal, vinculadas a uma adequada caracterização do subsolo propiciam a definição de linhas preferenciais de ruptura, além da compreensão da evolução do movimento com a profundidade.

Para a interpretação das leituras obtidas com os inclinômetros é crucial que sejam adotadas características representativas do trecho de análise. Busca-se preservar ao máximo características como cota de instalação dos instrumentos, perfil geométrico do terreno e espessura das camadas presentes no caso analisado.

No caso específico da encosta estudada neste trabalho, a adoção de quatro seções representativas da encosta permitiu uma boa correlação dos dados obtidos através da leitura dos inclinômetros. A correlação entre a evolução dos deslocamentos acumulados com a profundidade e dados oriundos da investigação geotécnica propiciaram a identificação da camada coluvionar como a principal zona de movimentação, apesar de alguns instrumentos indicarem a existência de movimentos mais profundos.

O monitoramento ao longo dos anos possibilita avaliar a continuidade da movimentação, sua magnitude e velocidade. Através dos dados analisados, constatou-se o pequeno incremento no deslocamento nos últimos anos, sendo na maioria dos casos, da ordem de 1 a 2 mm anuais.

A análise dos resultados obtidos com os inclinômetros permite avaliar a estabilidade da encosta e os riscos aos quais os dutos ali instalados estão expostos. Neste caso, devido à ausência de deslocamentos expressivos na região abaixo da faixa dos oleodutos nos últimos anos de monitoração, os dutos vêm operando com segurança, sendo o risco gerenciado através do acompanhamento da instrumentação.

A uniformidade na utilização de escalas para interpretação das leituras também se fez relevante. Os dados devem ser dispostos de forma que visualmente sejam percebidas discrepâncias e similaridades, sem que inferências errôneas sejam atribuídas a comportamentos semelhantes.

O cruzamento entre dados obtidos com os diversos tipos de instrumentação e também com dados climáticos – como regime de chuvas –, proporciona uma compreensão dos fatores que interferem na estabilidade da encosta. A elevação dos níveis piezométricos e a superação da capacidade de drenagem das estruturas existentes, atreladas geralmente a períodos de precipitação acentuada, estão associadas a muitas das ocorrências de movimentação de encostas.

A determinação da duração e intensidade da chuva crítica a ser considerada na avaliação dos dados se mostrou bastante dificultosa no caso analisado. O critério de precipitação adotado, com acumulações de 25 dias, não resultou em um comportamento homogêneo quando comparado com a evolução da velocidade registrada nos inclinômetros, para os anos avaliados. A presença de lacunas no período de dados pluviométricos utilizados – ausência de dados entre julho de 2007 e janeiro de 2010 –, a interferência de obras estabilizantes não levantadas durante o intervalo monitorado e a determinação correta da chuva crítica foram apontadas como os possíveis fatores desta heterogeneidade.

A correta interpretação da instrumentação geotécnica pode ser utilizada de modo a aperfeiçoar os planos de gerenciamento de riscos. A determinação de inspeções após eventos críticos previamente identificados através do acompanhamento da instrumentação permite maior efetividade, mobilizando as ações nos períodos necessários e concentrando as ações em pontos específicos da faixa de dutos ou entorno. Obras e eventuais intervenções necessárias podem também ser programadas quando o plano de instrumentação indicar alguma alteração na estabilidade do terreno, sendo que após a implantação, a eficiência das mesmas pode ser acompanhada nos períodos subsequentes.

Grandes facilidades foram evidenciadas no uso de plataformas que integram bases de dados da instrumentação e sistemas geográficos de informações. A base de dados utilizada na pesquisa permitiu consultar informações de diferentes equipamentos, selecionar os períodos de interesse, além das vantagens na visualização das leituras em função da interface gráfica disponibilizada pelo programa.

Apesar de o programa possibilitar a utilização de parâmetros de alerta, a definição dos mesmos deve ser feita de forma cautelosa – integrado a um plano de ação com definições de intervenções e responsáveis –, estabelecendo limites de aceitação intermediários, a fim de não comprometer a confiabilidade do mesmo. O uso de limites alarmantes, facilmente atingíveis e sem implicações reais associadas podem desacreditar o plano de ação definido, o mesmo ocorre no oposto, quando o critério definido como crítico acaba sendo tardio, e as ações previamente estipuladas não mais são suficientes para resolução do cenário imposto.

Ressalta-se que, para uma compreensão mais precisa do comportamento da encosta de estudo e dos impactos das movimentações registradas sobre a tubulação se faz necessário uma avaliação dos demais fatores pertinentes ao contexto. A consideração da influência da linha piezométrica, da variação indicada nos medidores de nível de água e de resultados de ensaios específicos para adoção de parâmetros adequados de solo são fatores que podem ser somados em uma análise complexa da estabilidade da encosta, que, juntamente com a avaliação das tensões geradas na parede da tubulação possibilitaria identificar como a integridade do duto é afetada por movimentos de terra.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. ;CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- AMARAL, C. S., SOUZA FILHO, B. G., MUSMAN, J. V. R., GOMES, M. G. F. M. Field stress monitoring in pipelines submitted to ground movement. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION ON EXPERIMENTAL & APPLIED MECHANICS, 10., 2004, Costa Mesa. **Electronic proceedings...** Costa Mesa: Society for Experimental Mechanics, 2004. Disponível em: <<http://sem-proceedings.com/04s/sem.org-SEM-X-Int-Cong-s003p01-Field-Stress-Monitoring-Pipelines-Submitted-Ground-Movement.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2011.
- AMARAL, C. S.; RABACO, L. M. L.; ROCHA, R. S. Algumas tecnologias para monitoramento geotécnico em faixas dutoviárias em fase de desenvolvimento e avaliação pela Petrobras. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 6., 2008, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Projecta, 2008. 1 CD.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.712**: projeto de sistemas de transmissão e distribuição de gás combustível. Rio de Janeiro, 2002.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro, Gás Natural e Biocombustíveis 2010**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>⁷. Acesso em: 18 abr. 2011.
- _____. Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas do Brasil – Unidades de Relevo**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/atlasescolar/mapas_pdf/brasil_unidades%20de%20relevo.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2011.
- BRESSANI, L. A. Instrumentação em obras geotécnicas: taludes e escavações. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2009. 1 CD.
- CERRI, L.E.S; AMARAL, C.P. Geologia de Engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Riscos Geológicos**. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1998. p. 301-310.
- CONSERVATION OF CLEAN AIR AND WATER IN EUROPE. Methods of prevention, detection and control of spillages in european oil pipelines. Brussels, May 1998. Report 1/98. Disponível em: <<http://www.concawe.be/content/default.asp?PageID=569>>⁸. Acesso em: 9 jun. 2011.

⁷ Acesso ao anuário, estando no site <<http://www.anp.gov.br>>, selecionar <Dados Estatísticos>, <Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - índice> e <Leitura no sítio> ou <Versão para impressão>.

⁸ Acesso ao relatório 1/98, estando em <<http://www.concawe.be/content/default.asp?PageID=569>> selecionar <Oil Pipelines> e em seguida <Next> para acessar a segunda página de relatórios, e então <Report N° 1/98>.

_____. Pipeline Integrity: focus on pipeline ageing and third part interference. In: CONCAWE OIL PIPELINES OPERATORS EXPERIENCE EXCHANGE SEMINAR, 2., 2006, Brussels. Brussels: Eletronic Review, 2006. Disponível em: <<http://www.concawe.be/DocShareNoFrame/docs/4/BEIPLCEBKHGDECMOELFAPOEM5JW1P1QEH1Q7H6UOH6Y6/CEnet/docs/DLS/CR152Pipelineintegrity-2006-02009-01-E.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2011.

_____. Performance of European cross-country oil pipelines: statistical summary of reported spillages in 2009 and since 1971. Brussels, May 2011. Report 3/11. Disponível em: <<http://www.concawe.be/content/default.asp?PageID=569>>⁹. Acesso em: 9 jun. 2011.

CORTELETTI, R. C. **Desenvolvimento de metodologia para concepção de traçados de dutos de transporte de gás natural**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

COSTA, E. A. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade**. 2005. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. 1 ed. Canadá: John Wiley & Sons Inc., 1988.

ESFORD, F.; PORTER, M.; SAVIGNY, W. A risk assessment model for pipelines exposed to geohazards. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 5th., 2004, Calgary. **Proceedings...** Calgary-CA: American Society of Mechanical Engineers, 2004. p. 1-9. Disponível em: <http://www.bgcengineering.info/BGC_Homepage_Files/Publications/MJP%20IPC04-0327%20RA%20Model.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2011.

GEODADOS, Plataforma Georiscos. [S. l]: Transpetro, 2011. Plataforma digital desenvolvida pela PUC-RJ.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM. [S. l]: Transpetro, 2011. Plataforma digital.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgar Blücher, 1976.

HANNA, T. H. **Field instrumentation in geotechnical engineering**. 1 ed. Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1985.

INGENIERA Y GEOTECNIA LTDA. **Manual de proteccion geotecnica y ambiental: Oleoducto Vasconia-Covenas**. 2. ed. Bogotá: Nuevas Ediciones, 1991.

LACERDA, W. A. Casos geotécnicos da região sul do país. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 5., 2006, Porto Alegre. **Anais...** [S. l.]: Organizações Nova Prova, 2006. p. 13-23.

⁹ Acesso ao relatório 3/11, estando em <<http://www.concawe.be/content/default.asp?PageID=569>> selecionar <Oil Pipelines> e então <Report Nº 3/11>.

MICUCCI, C. A.; BARBAGELATA, E. Deslizamiento en el gasoducto norandino: mecanismo de colapso e interacción com las lluvias. In: CONGRESSO ARGENTINO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA, 16., 2002, Trelew. **Memorias...** Trelew: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, 2002. 1 CD

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Atlas geológico do estado do Paraná**. Disponível em <<http://www.mineropar.pr.gov.br>>. Acesso em: 18 abr. 2011.

MOREIRA, C. V.; PIRES NETO, A. G. Geologia de Engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Clima e Relevô**. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1998. p. 89-85.

MOURA, M. R.; LÁZARO, A. A. Metodologia para inspeção geológico-geotécnica de oleodutos. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 5., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / Núcleo Regional São Paulo, 2004. p. 302-312.

NOGUEIRA JÚNIOR, J.; MARQUES, A. S. Geologia de Engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Linhas de Transmissão e Dutovias**. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1998. p. 475-485.

OLIVEIRA, H. R. **Gerenciamento da integridade de dutos**: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de transmissão. 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, H.R; VASCONCELLOS, C.R.A. Projeto e Obra de Estabilização do Talude do km 767 do Gasoduto Bolívia-Brasil. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 2nd., 2005, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2005. 1 CD.

PEREIRA, M.; COLONIA, J. D.; GARCÍA, H. A. Mitigation technique to reduce pipeline strains in unstable slopes. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION, 8th., 2011, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2011. 1 CD.

PORTER, M.; LOGUE, C.; SAVIGNY, W.; ESFORD, F.; BRUCE, I. Estimating the influence of natural hazards on pipeline risk and system reliability. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 5th., 2004, Calgary. **Proceedings...** Calgary-CA: American Society of Mechanical Engineers, 2004. p. 1-9. Disponível em: <http://www.bgcengineering.com/files/publications/MJP_IPC04-0238_Reliability.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2011.

PORTER, M.; SAVIGNY, K. W. Natural hazards and risk management for South American pipelines. In: INTERNATIONAL PIPELINE CONFERENCE, 4th., 2002, Calgary. **Proceedings...** Calgary-CA: American Society of Mechanical Engineers, 2002. 1 CD.

SANDRONI, S. S. Instrumentação geotécnica para monitoramento de tubulações de aço que atravessam “línguas colúviais” no sudeste brasileiro. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 5., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo:

Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / Núcleo Regional São Paulo, 2004. p. 232-250.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emergências químicas**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/emergencias-quimicas/146-causas-acidentes-em-sao-paulo>>. Acesso em: 9 jun. 2011.

SAVIGNY, K. W.; PORTER, M.; LEIR, M. Geohazard Risk Management for the Onshore Pipeline Industry. **Exploration & production: the oil & gas review**, [S. I.], n. 2, p. 1-3, 2005.

SOARES, J. P.; BONINI, L. H.; MOYA, M. Atividades de Geotecnia nas Faixas de Dutos da Transpetro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2006. 1 CD.

SOUZA, P. F. **Estudo experimental sobre o comportamento de dutos metálicos com geometria em zigzag**. 2004. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, L. M. **Análise numérica do comportamento de um oleoduto sujeito a movimentos de encosta**. 2008. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes**: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TRANSPORTADORA BRASILEIRA GASODUTO BOLÍVIA-BRASIL. Mapa do traçado do gasoduto. Disponível em: <http://www.tbg.com.br/portalTBGWeb/tbg.portal?_nfpb=true&_pageLabel=pgTracadoGasoduto>. Acesso em: 9 jun. 2011.

TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA. **Pipeline Occurance Report**. Quebec, Aug. 1998. Report number P97H0024. Disponível em <<http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/pipeline/1997/p97h0024/p97h0024.asp>>. Acesso em: 9 jun. 2011.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Transportation. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. **Significant pipeline incidents by cause**. Washington, DC, 2011. Disponível em: <http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/SigPSIDet_1991_2010_US.html>. Acesso em: 9 jun. 2011.

VASCONCELLOS, C. R. A.; OLIVEIRA, H. R. Aspectos e Abordagens aos Riscos Geotécnicos em Dutos de Transmissão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2006. 1 CD.

