

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

Karina Chagas da Silva

**APLICAÇÃO DE INCLINÔMETROS E PIEZÔMETROS NA
MITIGAÇÃO DE RISCOS: A TRAGÉDIA DA REGIÃO
SERRANA DO RIO DE JANEIRO**

Porto Alegre

agosto 2024

KARINA CHAGAS DA SILVA

**APLICAÇÃO DE INCLINÔMETROS E PIEZÔMETROS NA
MITIGAÇÃO DE RISCOS: A TRAGÉDIA DA REGIÃO
SERRANA DO RIO DE JANEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso 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: Lucas Festugato

Porto Alegre

agosto 2024

KARINA CHAGAS DA SILVA

**APLICAÇÃO DE INCLINÔMETROS E PIEZÔMETROS NA
MITIGAÇÃO DE RISCOS: A TRAGÉDIA DA REGIÃO
SERRANA DO RIO DE JANEIRO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, agosto de 2024

Prof. Lucas Festugato

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Festugato

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Gonçalo de Lima Sonaglio

M. pela Universidade Feral do Rio Grande do Sul

Hugo Carlos Scheuermann Filho

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus irmãos, Marlon, Paulo e Sheila, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me e incentivando-me incansavelmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Andréa Chagas e Marco Antônio, pelo apoio incondicional e constante incentivo, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus irmãos, Paulo, Sheila e Marlon, por terem sido meus maiores suportes durante o período acadêmico e em toda a minha vida. Agradeço por todo o apoio, que sempre será uma força fundamental para mim.

Agradeço ao meu orientador, Lucas Festugato, pela constante dedicação ao longo de todo o processo de orientação.

Agradeço à Camila Emer, minha namorada, amiga e companheira. Obrigada por sempre me incentivar e por todos os cafés.

Nunca se esqueça de quem você é, porque é certo que o mundo não se esquecerá. Faça disso sua força. Assim, não poderá ser nunca a sua fraqueza. Arma-se com esta lembrança, e ela nunca poderá ser usada para lhe magoar.

George R.R. Martin

RESUMO

Este trabalho explora a aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos associados a deslizamentos de terra, com um estudo de caso focado na tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011. O estudo analisa como essas tecnologias de monitoramento, ao fornecer dados precisos sobre a variação da inclinação do solo e as pressões intersticiais, podem ser utilizadas para prever e prevenir deslizamentos em áreas vulneráveis. A pesquisa inclui uma revisão detalhada dos métodos de instalação e interpretação dos resultados obtidos com inclinômetros e piezômetros, bem como a avaliação de suas aplicações práticas na detecção precoce de riscos. A análise é complementada por um exame dos impactos ambientais e socioeconômicos do desastre de 2011, oferecendo uma perspectiva crítica sobre as deficiências no monitoramento e propondo melhorias para futuros sistemas de alerta e gestão de riscos. A conclusão destaca a importância dessas tecnologias para a segurança e a resiliência das comunidades afetadas por desastres naturais.

Palavras-chave: Inclinômetros. Piezômetros. Deslizamentos. Mitigação de riscos. Região Serrana do Rio de Janeiro. Monitoramento geotécnico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Delineamento.....	16
Figura 2 (a) - Estação 2242019	20
Figura 3 - Solos da região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.	28
Figura 4 (a) - Totais mensais do ano de 2011 e a média de cada mês	31
Figura 5 - Esquema de piezômetro de Casagrande	46
Figura 6 - Princípio de operação de um inclinômetro	49
Figura 7 - Instalação e detalhe de um inclinômetro fixo.....	52
Figura 8 - Mapa do Escorregamento da Encosta do Soberbo, com as zonas respectivas, ocorrido em 1996.....	63
Figura 9 - Instrumentação do Escorregamento da Encosta do Soberbo.....	67
Figura 10 -Deflexões inclinométricas (deslocamento por profundidade).....	68
Figura 11 - Movimentos de massa em função da velocidade do deslocamento e tempo	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1	QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2	OBJETIVO DA PESQUISA	15
2.3	PRESSUPOSTOS.....	15
2.4	PREMISSA.....	15
2.5	DELIMITAÇÕES.....	16
2.6	LIMITAÇÕES	16
2.7	DELINEAMENTO.....	16
3	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO 18	
3.1	SITUAÇÃO ATUAL E DESAFIOS GEOGRÁFICOS.....	18
3.2	ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	19
3.3	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	23
3.4	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	24
3.5	VEGETAÇÃO.....	26
3.6	SOLO.....	26
4	ANÁLISE GERAL DO DESASTRE.....	29
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DO EVENTO	29
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO PLUVIOMÉTRICO	30
4.3	CAUSAS DO DESASTRE	34
4.4	IMPACTOS AMBIENTAIS	39
4.5	IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS	41
5	INSTRUMENTAÇÃO	43
5.1	PIEZÔMETRO.....	44
5.1.1	Instalação.....	45

5.1.2	Precisão	46
5.1.3	Interpretação de resultados	47
5.2	INCLINÔMETRO	47
5.2.1	Instalação	51
5.2.2	Precisão	53
5.2.3	Interpretação de resultados	54
6	INSTRUMENTAÇÃO EM ESTABILIDADE DE TALUDES	55
1	ESTUDOS DE CASOS NA INGLATERRA E SUIÇA	57
6.1	INSTRUMENTAÇÃO DE TALUDES NO BRASIL	59
6.1.1	A encosta da Serrana do mar na rodovia do Imigrantes	59
6.1.2	Instrumentação da encosta do Soberbo	61
7	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DO CASO EM ESTUDO	69
7.1	ANÁLISE GEOTÉCNICA E HIDRÓLOGICA DA REGIÃO SERRANA DO RJ	69
7.2	IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES DE RISCO E DEFICIÊNCIAS NO MONITORAMENTO	71
7.3	PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE INCLINÔMETROS E PIEZÔMETROS	73
7.4	BENEFÍCIOS POTENCIAIS E LIMITAÇÕES	76
7.5	COMPARAÇÃO COM OUTRAS REGIÕES	78
7.6	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS POLÍTICAS DE GESTÃO E DESASTRES	81
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
8.1	CONCLUSÕES	85
8.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais constituem um tema cada vez mais presente no cotidiano das pessoas, independentemente da região que elas residem. De acordo com Tobin e Montz (1997) e Marcelino (2008), desastres naturais podem ser definidos como o resultado do impacto de fenômenos naturais extremos ou intensos sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade atingida em conviver com o impacto. Inicialmente, o termo pode ser associado a terremotos, tsunamis, erupções vulcânicas, ciclones e furacões, entretanto, os desastres naturais também contemplam fenômenos mais localizados, como os deslizamentos de terra, por exemplo.

No Brasil, onde o clima é predominantemente tropical, existem grandes índices pluviométricos no verão, que correspondem ao período chuvoso, com isso as encostas naturalmente são locais de risco aos deslizamentos de terra. Outro fator que tem contribuído para os deslizamentos em encostas é o crescimento desordenado das cidades, que avançam para terrenos topograficamente mais inclinados e geologicamente instáveis durante sua expansão.

Em termos gerais, um deslizamento ocorre quando a relação entre a resistência ao cisalhamento do material e a tensão de cisalhamento na superfície potencial de movimentação decresce até atingir uma unidade, ou seja, quando a força gravitacional vence o atrito interno das partículas, responsável pela estabilidade, a massa de solo movimenta-se encosta abaixo (GUIDICINI & NIEBLE, 1984).

Os deslizamentos são responsáveis por inúmeras vítimas fatais e grandes prejuízos materiais. Como exemplo, pode-se citar o desastre ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro, nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, quando fortes chuvas provocaram enchentes e deslizamentos em sete municípios. Classificado pela ONU como o 8º maior deslizamento ocorrido no mundo nos últimos 100 anos, o desastre foi comparado, por sua dimensão e danos, a outras grandes catástrofes, como a que devastou a região de Blumenau-Itajaí, em Santa Catarina, em 2008, e a

provocada pelo furacão Katrina, que destruiu a cidade de Nova Orleans, nos Estados Unidos, em 2005.

Diante da frequência e gravidade crescentes dos desastres naturais, torna-se essencial adotar medidas preventivas. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar como inclinômetros e piezômetros poderiam ter sido utilizados para obter dados e possibilitar o aviso à população sobre o escorregamento de terra, mitigando assim suas consequências. O inclinômetro é um instrumento que mede a variação da inclinação de um tubo colocado dentro de um furo de sondagem (Wilson e Mikkelsen, 1978, p.119). Por sua vez, o piezômetro, segundo Nóbrega (2017), é definido como um instrumento de medição usado para o monitoramento e leitura da pressão hidráulica no local de sua instalação.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como inclinômetros e piezômetros poderiam ter contribuído para mitigação das consequências dos desastres ocorridos na região serrana do Rio de Janeiro em 2011?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo do trabalho é analisar como os instrumentos estudados poderiam ter sido utilizados para mitigar as consequências dos desastres ocorridos na região serrana do Rio de Janeiro em 2011.

2.3 PRESSUPOSTOS

O trabalho tem por pressuposto que indicações da literatura especializada e as normas técnicas utilizadas são válidas.

2.4 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que diferentes instrumentos podem ter diferentes eficácias na mitigação de desastres naturais, como os ocorridos na região serrana do Rio de Janeiro em 2011. Além disso, a análise dos instrumentos ajudará a identificar as melhores práticas e aprimorar os sistemas de prevenção e resposta a desastres no futuro.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à região serrana do Rio de Janeiro.

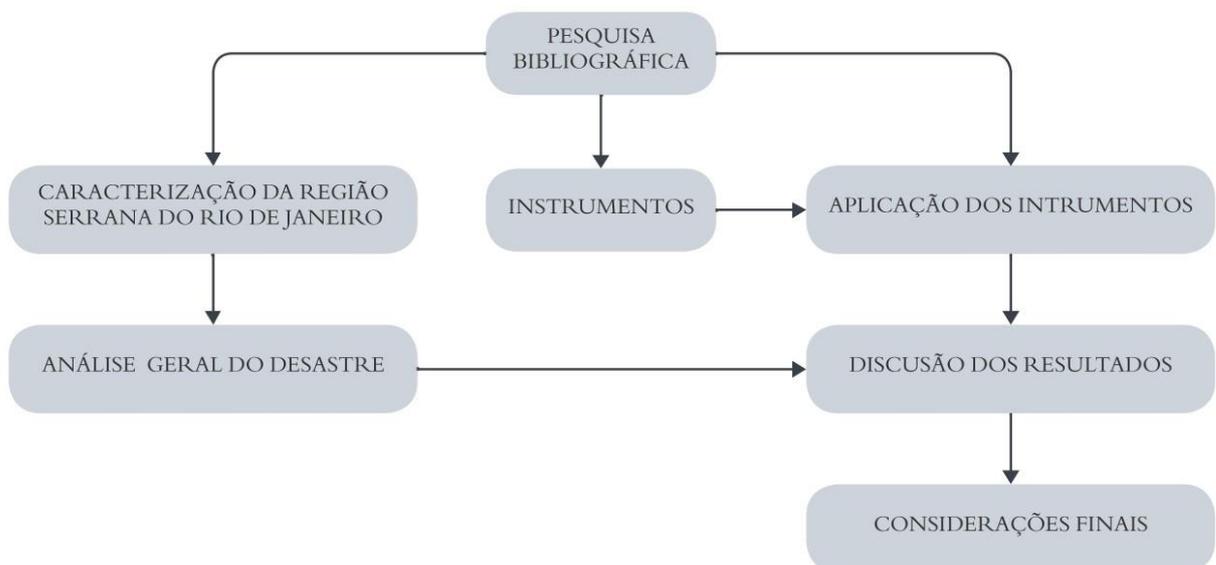
2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho será limitado a dois tipos de rupturas: translacionais e rotacionais.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na Figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

Figura 1 – Delineamento



(fonte: elaborada pela autora)

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) caracterização da região serrana do Rio de Janeiro;
- c) análise geral do desastre;
- d) descrição dos instrumentos;
- e) Instrumentação em estabilidade de talude;
- f) discussão dos resultados do caso em estudo;
- g) considerações finais.

A **pesquisa bibliográfica** é marcada pela coleta de informações necessárias para o embasamento teórico do trabalho. Ela foi realizada ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho a fim de que se obtenha o máximo de informação a respeito dos deslizamentos da região serrana do Rio de Janeiro, mas também dos instrumentos em questão.

Na etapa de **caracterização da região serrana do Rio de Janeiro** é apresentada uma contextualização do deslizamento de terra nessa localidade, ressaltando a gravidade do evento e destacando suas principais consequências. No capítulo subsequente, abordam-se questões relacionadas à **caracterização do evento pluviométrico**, analisando **as causas subjacentes ao desastre** e discutindo os **impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes**.

No capítulo seguinte, é realizada uma análise detalhada sobre o funcionamento e as aplicações de **inclinômetros e piezômetros** em geotecnia. Aspectos relacionados à instalação, precisão e interpretação dos resultados são abordados nesta seção.

No capítulo voltado para **instrumentação em estabilidade de talude**, foi feita uma revisão da bibliografia existente sobre a aplicação de inclinômetros e piezômetros em projetos de geotecnia e prevenção de desastres naturais, destacando estudos de caso pertinentes relacionados a deslizamentos de terra.

Por último, discutiu-se **como o equipamento poderia ter contribuído para a prevenção dos deslizamentos de terra** na região serrana do Rio de Janeiro em 2011 ou **mitigação das suas consequências**. Por fim, foram apresentadas as **considerações finais**, as quais foram baseadas na etapa de discussão dos resultados e pesquisa bibliográfica. Além disso, ainda nesse capítulo,

foram feitas algumas sugestões para pesquisas futuras em áreas suscetíveis a deslizamentos de terra.

3 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Essa introdução fornece uma visão geral dos principais aspectos geoambientais da região serrana do Estado do Rio de Janeiro, contextualizando questões como ocupação do solo, clima, aspectos geotécnicos, geomorfologia, vegetação e solo.

3.1 SITUAÇÃO ATUAL E DESAFIOS GEOGRÁFICOS

De acordo com a SOS Mata Atlântica/INPE/ISA (2001), atualmente o Estado do Rio de Janeiro está ocupado por apenas 17% de Mata Atlântica. Segundo Carvalho Filho (2001) as terras montanhosas compreendem cerca de 81% do Estado do Rio de Janeiro, enquanto as terras baixas constituem cerca de 14% do percentual de ocorrência no estado.

A área de estudo está localizada na região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, que inclui os municípios de Teresópolis, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Cantagalo, Bom Jardim, Duas Barras, Nova Friburgo, São Sebastião do Alto, Carmo, Sumidouro, Cordeiro, Macuco, Santa Maria Madalena e Trajano de Moraes. Segundo dados do IBGE de 2009, a população estimada da região serrana do Rio de Janeiro era de 497.768 habitantes.

Essa região está predominantemente sob o domínio das terras montanhosas, cujas unidades morfológicas, segundo Ross (1996), são mais susceptíveis a processos de perda, sobretudo por erosão. A área é ocupada principalmente por pequenos produtores que praticam agricultura familiar, com produção de café, flores ornamentais, olerícolas, além de pecuária de leite e corte. A região engloba terras desmatadas, áreas aptas e inaptas para atividades produtivas e áreas protegidas por lei. A característica topográfica do relevo montanhoso e o intenso regime

pluviométrico potencializam os processos erosivos, intensificando as perdas de solo, além do carreamento de agrotóxicos e de fertilizantes para os rios (MENDES, 2006).

3.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS

A região serrana do Rio de Janeiro está localizada na Serra do Mar, que particularmente recebe o nome de Serra dos Órgãos no entorno de algumas cidades como Petrópolis e Teresópolis. O tipo climático é o Mesotérmico Úmido, com temperaturas elevadas bem distribuídas o ano todo e com pouco ou nenhum déficit hídrico (Faperj, 1980). A temperatura média anual é de 17,8°C. O verão é brando, com temperaturas médias variáveis de 18,3°C a 21,4°C, no inverno a média varia entre 13°C e 16,8°C, sendo junho e julho os meses mais frios.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região serrana do Rio de Janeiro apresenta um clima caracterizado por verões chuvosos e invernos relativamente secos. Para ilustrar o padrão pluviométrico dos últimos anos na região, foram coletados dados pluviométricos referentes aos cinco anos que antecederam a tragédia. Além disso, foi determinada a média mensal esperada para cada mês.

Através do SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, da ANA, Agência Nacional de Águas, foram selecionadas todas as estações pluviométricas localizadas nos municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis. Depois da seleção dos postos existentes nas cidades mais afetadas pela tragédia na região, verificou-se quais continham dados até janeiro de 2011, data em que ocorreram os eventos críticos de precipitação. A relação das estações utilizadas, seus códigos, bem como os municípios onde estão localizadas estão contidas na Tabela 1.

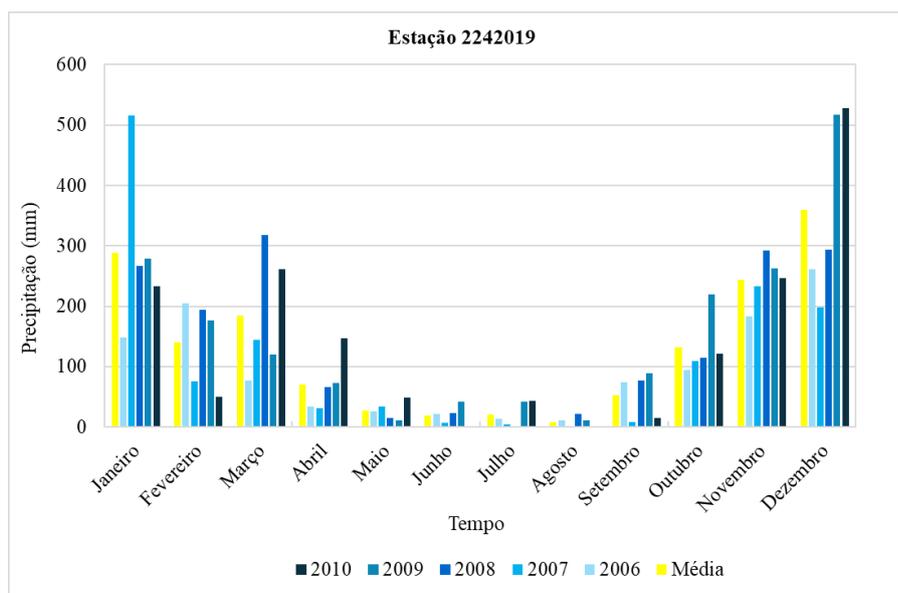
Tabela 1 – Relação das cinco estações pluviométricas

Código	Estação	Estado	Município
2242019	Vargem Alta	RJ	Nova Friburgo
2242020	Vargem Grande	RJ	Nova Friburgo
2242024	Teodoro de Oliveira	RJ	Nova Friburgo
2242027	Fazenda Sobradinho	RJ	Teresópolis
2243010	Itamarati - SE	RJ	Petrópolis

(fonte: elaborado pela autora)

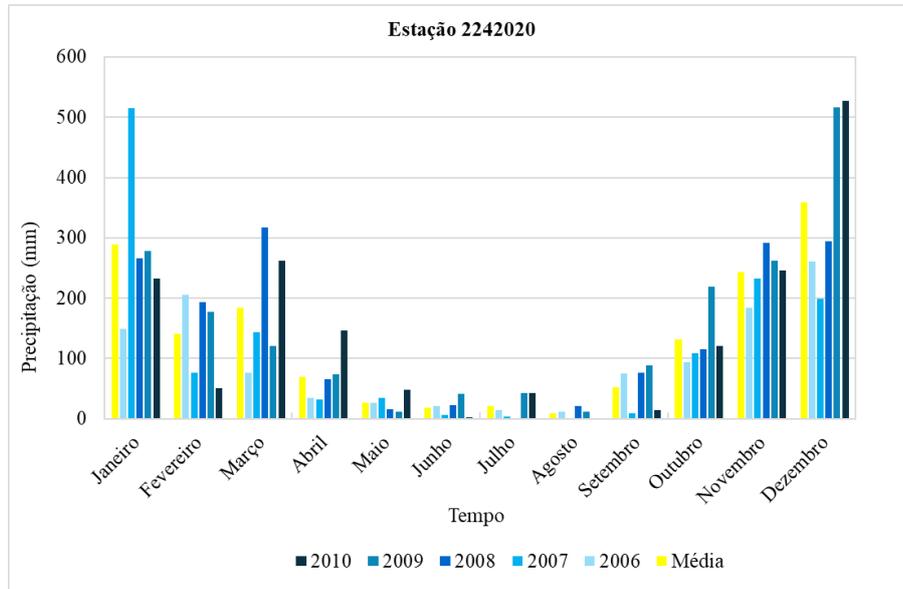
Os totais mensais de cada mês foram calculados e plotados nos gráficos da Figura 2 , que contêm também as médias mensais de cada mês para os anos 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010.

Figura 2 (a) - Estação 2242019



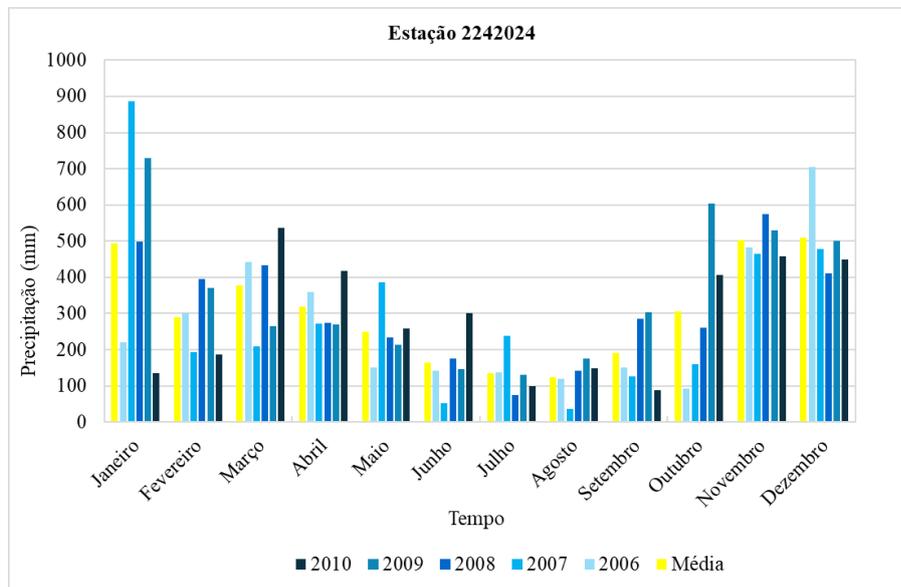
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 2 (b) - Estação 2242020



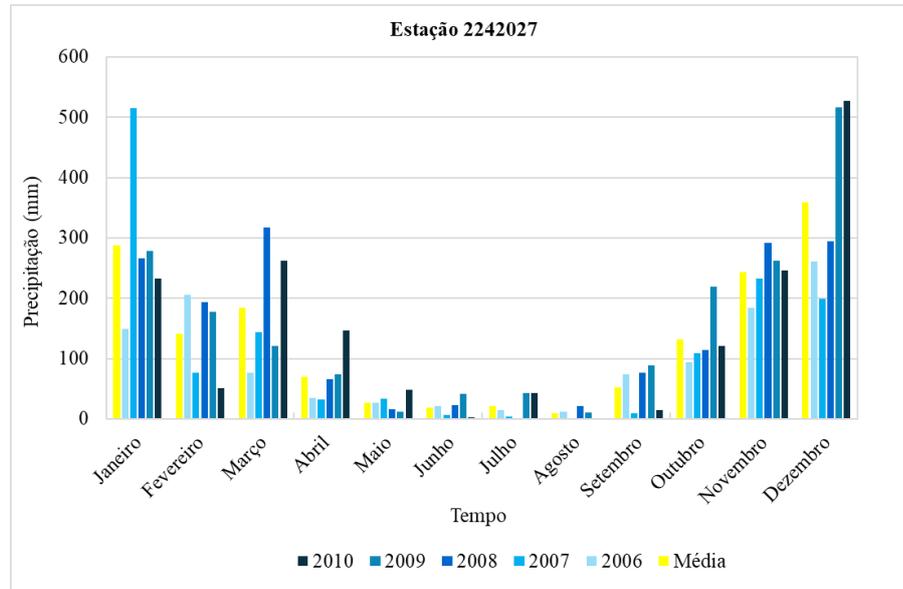
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 2 (c) - Estação 2242024



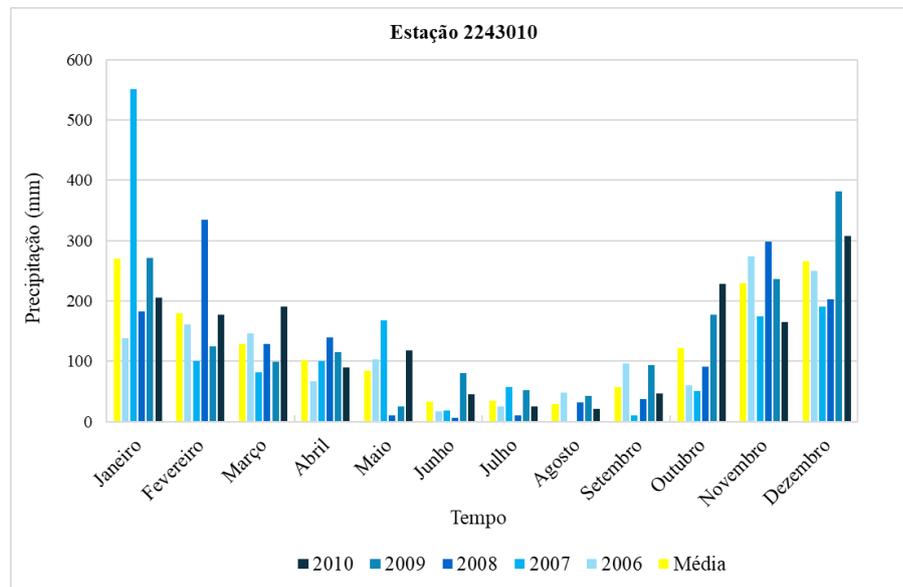
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 2 (d) - Estação 2242027



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 2 (e) - Estação 2243010



(fonte: elaborada pela autora)

A análise dos gráficos revela uma tendência distinta nos padrões de precipitação ao longo do

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

ano. Observa-se que, de junho a setembro, os índices pluviométricos tendem a diminuir em comparação com o período de verão, conforme definido pela classificação climática de Köppen, previamente discutida. Além disso, destaca-se que, em grande parte das estações de monitoramento analisadas, o mês de dezembro de 2010 registrou um volume de precipitação superior à média dos últimos cinco anos. Esta observação pode ser crucial para compreender as variações sazonais e os eventos climáticos anômalos em uma perspectiva de longo prazo.

3.3 ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Os movimentos de massa no estado do Rio de Janeiro são eventos anuais e conhecidos pela população e pelos governos e historicamente causadores de desastres e fatalidades. Há informações de que a primeira enchente da cidade de Petrópolis ocorreu em 1834, antes mesmo do decreto de fundação do município (Memorial Petrópolis, 2022).

Escorregamentos e demais processos gravitacionais correlatos fazem parte do conjunto dos movimentos de massa interligados à dinâmica das encostas. Logo, movimentos de massa são processos que envolvem uma massa ou um volume de solo e/ou rocha que se deslocam em conjunto, configurando um dos maiores processos de evolução e de desenvolvimento de encostas, especialmente em regiões íngremes (ZARUBA e MENCIL, 1976).

Segundo Augusto Filho (1992), os movimentos de massa são classificados em quatro grandes grupos: rastejos, escorregamentos stricto sensu, quedas e corridas. Nessa classificação, escorregamentos são movimentos rápidos, de duração relativamente curta, de massas geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora da encosta (AUGUSTO FILHO, 1992). A velocidade de um escorregamento cresce de zero a aproximadamente 0,30m por hora, decrescendo, em seguida, até se estabilizar (TERZAGHI, 1967). Podem atingir velocidades maiores, da ordem de alguns metros por segundo e a velocidade máxima do movimento depende da inclinação da superfície de escorregamento, da causa inicial de movimentação e do tipo de terreno. Cada tipo de escorregamento é definido em função da forma e do tamanho, bem como pelo tipo de material (solo ou rocha) que foi mobilizado (AUGUSTO FILHO, 1992).

Conforme Augusto Filho (1992), os escorregamentos podem ser divididos com base na forma do plano de ruptura (rotacional ou translacional), bem como no tipo de material em movimento: solo, rocha, tálus, colúvio e detritos. Os escorregamentos rotacionais possuem uma superfície de ruptura curva na qual o material sofre movimentação côncava para cima. Estão associados aos ambientes com presença de solos profundos que permitem a maior infiltração e a percolação profunda da água (AUGUSTO FILHO, 1992).

Os escorregamentos translacionais, mais frequentes na paisagem do sudeste brasileiro, possuem superfícies com a forma planar condicionados pela presença de fraturas, depósitos de encostas, contatos entre solo e rocha e entre horizontes do solo. São deflagrados em encostas mais íngremes com presença de solos rasos e seus planos de ruptura se encontram em profundidades que variam de 0,5m a 5,0m (AUGUSTO FILHO, 1992). Conforme Infanti e Fornasari (1998), os escorregamentos translacionais podem ocorrer em maciços rochosos, sendo condicionados pela xistosidade, pelo fraturamento, pela foliação, entre outros aspectos.

Na região da Serra do Mar, são comuns os eventos de escorregamentos, principalmente os do tipo translacional raso, ora em áreas naturais, ora em áreas ocupadas com situações de risco. Dos episódios históricos de escorregamentos na Serra do Mar, destacam-se os eventos ocorridos em Caraguatatuba (SP) em 1967; Cubatão (SP) em 1985; Santa Catarina (principalmente nas cidades de Ilhota, Gaspar e Luís Alves) em 2008 e Angra dos Reis (RJ) em 2010.

3.4 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, no litoral sudeste do Brasil, é um trecho da Serra do Mar formado por um conjunto de escarpas desgastadas com alta densidade de drenagens e vales encaixados. Atribui-se a sua formação a processos tectônicos de movimentação vertical de conjuntos rochosos que lhe imprimem um formato de relevo, hoje, dissecado em planos de falhas e fraturas que garantem o entalhe dos vales fluviais (Asmus e Ferrari, 1978; Almeida e Carneiro, 1998; Cherem et al, 2013).

De acordo com o mapeamento geomorfológico do estado do Rio de Janeiro, realizado por Dantas (2001), a região serrana é constituída, sobretudo, pelo domínio montanhoso que apresenta vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Ocorrência de compartimentos colinosos e/ou de morros, em seções alveolares nos vales principais. Alta densidade de drenagem com padrão variável, podendo apresentar padrão treliça, paralelo ou retangular.

A região apresenta alto potencial de vulnerabilidade a eventos de erosão e movimentos de massa, devido ao gradiente elevado do relevo montanhoso dominante, associado aos índices locais de precipitações, interferências antrópicas e expansão das atividades econômicas. Em geral, os terrenos mais íngremes e elevados preservam a cobertura florestal, atenuando um pouco o potencial erosivo demonstrado pela região (CALDERANO FILHO, 2012).

As feições encontradas na paisagem da Serra do Mar são produtos do trabalho intempérico e erosivo sobre tais estruturas herdadas desses eventos tectônicos que atualmente se mostram marcantes no relevo local. A ocupação e expansão dos municípios nesta região ocorreu, principalmente, nas áreas rebaixadas do relevo e em alguns casos no sopé das vertentes. Ao analisar a relação da ocupação com a morfologia do relevo Ab'Saber (1958) afirma que,

“No Estado do Rio de Janeiro, as regiões serranas de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo apresentam apenas minúsculas planícies de soleira, de conformação alveolar, onde as cidades se anicharam incomodamente, comprimidas entre as planícies rasa e os sopés relativamente íngremes dos morros e grandes blocos de esfoliação. Exceção feita das planícies estreitas e alongadas, somente alguns raros patamares de morros e ligeiras encostas de declive mais suave deram asilo às edificações urbanas. Neste particular, a cidade de Petrópolis apresenta-nos um belo exemplo de sítio urbano que forçou a interpenetração do sistema de ruas e pequenas praças por entre a trama dos vales que desembocam na planície alveolar principal da região.” (p. 170)

Percebe-se, portanto, a influência da geomorfologia no processo de urbanização da região serrana. A topografia nesta região limitou os espaços para ocupação, ficando restritas apenas aos fundos de vale. Apesar disso, com a expansão urbana e o crescimento populacional acelerado, algumas edificações acabaram por ocupar o sopé das encostas.

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

3.5 VEGETAÇÃO

Composta por quatro estados – Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Rio de Janeiro (RJ) e São Paulo (SP) –, a região Sudeste é a mais populosa e a que tem maior concentração populacional do território brasileiro. A vegetação da região Sudeste varia de acordo com o clima, mas a maior parte da vegetação dessa região é formada pela Mata Atlântica, que se encontra bastante devastada por causa da urbanização e da expansão agrícola.

Oliveira et al. (1995), afirmam que a maioria dos remanescentes da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro são de matas secundárias em diferentes estágios sucessionais e com idade variando entre 25 e 150 anos, alteradas pelas atividades agropecuárias ou exploração madeireira, possuindo estrutura florística e fitossociológica bastante diferenciada das matas mais conservadas.

A distribuição espacial da vegetação está condicionada aos níveis altimétricos do terreno e a intensidade das interferências antrópicas. Nos trechos onde a floresta ocupava encostas e vales mais suaves, a vegetação foi substituída por atividades agrícolas (CALDERANO FILHO, 2012). Atualmente, em algumas encostas com declives muito acentuados e nos topos mais elevados, observa-se vegetação secundária fechada, algumas áreas ainda estão preservadas em matas nativas, onde predominam espécies características da Mata Atlântica.

3.6 SOLO

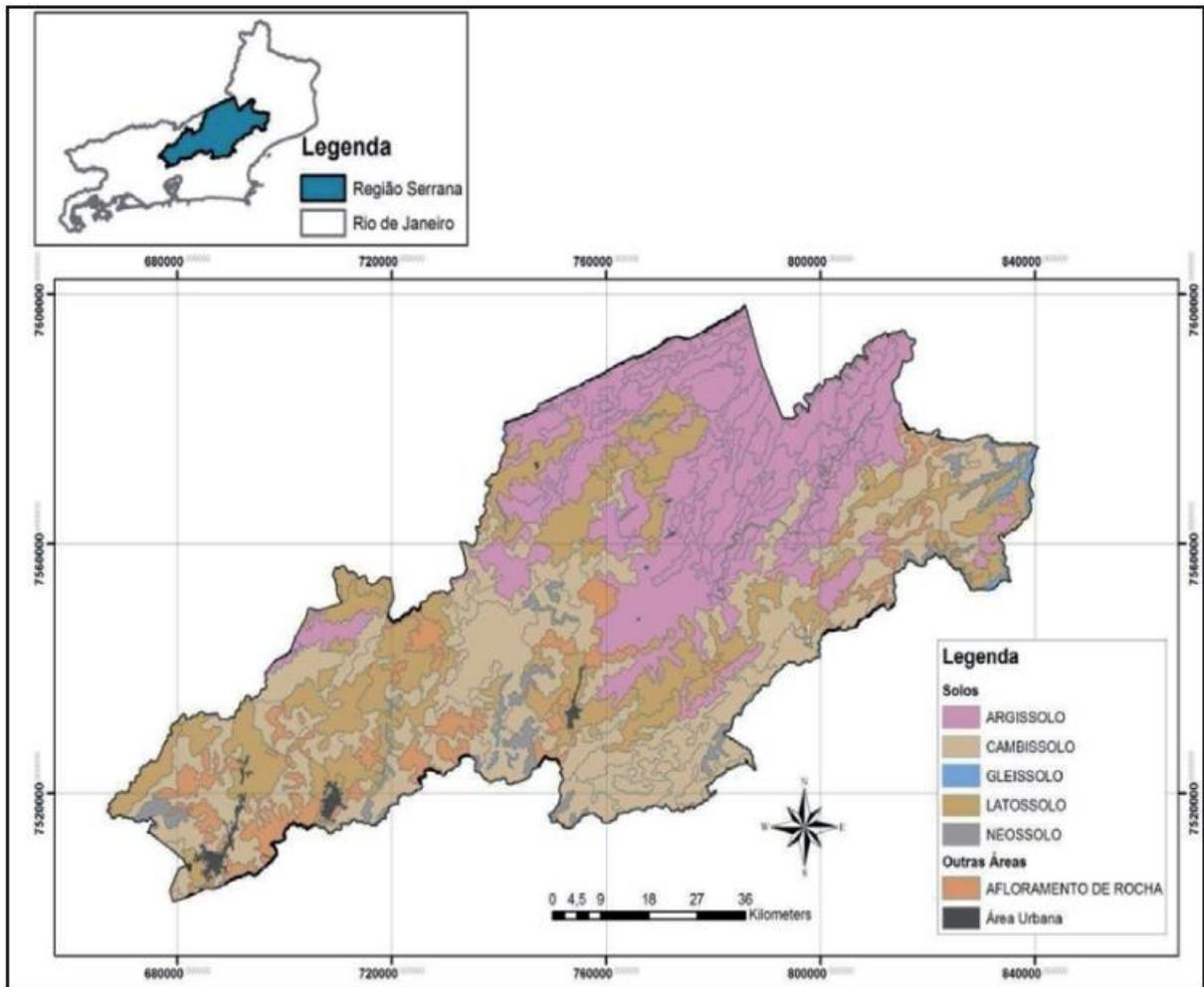
As classes de solos de maior ocorrência no Estado do Rio de Janeiro distribuídas neste domínio são os argissolos vermelho amarelo, os latossolos vermelho amarelo e os cambissolos, respectivamente. Sendo este último a classe dominante na região serrana, geralmente ocorrendo em associação com os latossolos vermelho amarelo, em relevo montanhoso e forte ondulado; ou ainda associados a neossolos litólicos e afloramentos de rocha, nas áreas de relevo mais acidentado (Embrapa, 1999).

Os Argissolos são solos minerais bem drenados, muito susceptível à erosão em sulcos e laminar, muito rápida/lenta. A erosão ainda é acelerada pelas vertentes íngremes do relevo forte, ondulado e montanhoso (CARVALHO FILHO, 2003; LUMBRERAS et al., 2004).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são solos minerais com horizonte B latossólico, em geral, profundos e muito profundos, ocorrendo, em menores proporções, variedades pouco profundas com presença de horizonte C. Essa classe de solos apresenta susceptibilidade à erosão nula à ligeira nas condições naturais, porém, sob utilização agropecuária, com práticas de manejo inadequadas, é facilmente compactável, ocorrendo erosão laminar forte e, não raro, os horizontes superficiais são carreados pelas águas que escoam superficialmente, devido à compactação. O relevo forte ondulado e montanhoso das regiões serranas favorece à aceleração dos processos erosivos (LUMBRERAS et al., 2004; DANTAS et al., 2001).

Os cambissolos são solos minerais rasos ou pouco profundos, em geral, bem drenados. Essa classe de solo ocupa áreas frágeis, e, por conseguinte, apresenta susceptibilidade à erosão extremamente forte. Normalmente, ocorre em cabeceiras de drenagens e/ou vertentes muito íngremes dos relevos fortes ondulados e montanhosos. Aparecem, em geral, em áreas erodidas, não raro associadas a voçorocas, a deslizamentos e a intermediários entre argissolos e latossolos e/ou cambissolos (LUMBRERAS et al., 2004; SYLVIO et al., 2000). A Figura 3 ilustra os principais tipos de solos na região Serrana.

Figura 3 - Solos da região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.



(fonte: LUMBRERAS et al. (2004) (modificado))

A classificação geotécnica do solo pela sua origem (Pinto, 2002), denomina-se Solo Residual Maduro de Migmatito. Freitas (1997), apresenta a classificação Agrônômica nesta região, considerando os solos como delgados nas vertentes (litossolos e cambissolos), espessando-se na cabeceira de drenagem (latossolos) ou compostos por depósitos coluviais, ricos em blocos.

4 ANÁLISE GERAL DO DESASTRE

Em janeiro de 2011 toda Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro foi atingida por fortes precipitações que deflagraram milhares de deslizamentos causando prejuízos econômicos e óbitos. Trata-se de uma região que ainda carece informações que subsidiem planos de uso e ocupação visando evitar os acidentes causados pelos movimentos de massa.

Uma análise do evento pluviométrico revela uma sequência de eventos desastrosos que culminaram na tragédia. A atuação da Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), aliada ao aquecimento diurno, à instabilidade atmosférica e ao relevo característico da Região Serrana, desencadeou a formação de nuvens convectivas que despejaram chuvas torrenciais sobre as cidades afetadas. O impacto foi agravado pela ocupação irregular das encostas e das margens dos rios, acentuando os movimentos de massa e as inundações. A intensidade das precipitações modificou a geografia local, enquanto as consequências sociais e econômicas continuaram a assombrar as comunidades afetadas muito tempo após o desastre.

Os subcapítulos 4.1 a 4.5 têm como objetivo analisar o desastre ocorrido na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro em janeiro de 2011. Serão abordadas questões relacionadas à caracterização do evento pluviométrico, passando por uma compreensão mais profunda dos fatores meteorológicos que desencadearam a tragédia. Além disso, serão exploradas as causas subjacentes ao desastre, examinando-se a interação entre a susceptibilidade natural das encostas e a ocupação desordenada do solo. Por fim, serão considerados os impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes do desastre.

4.1 DESCRIÇÃO GERAL DO EVENTO

Em janeiro de 2011, a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro foi severamente afetada por fortes chuvas, especialmente nos dias 11 e 12 de janeiro. Em três horas o volume de água ultrapassou a expectativa mensal para a região. A intensa precipitação, combinada com

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

numerosos deslizamentos de encostas, caracterizou esse evento como uma das maiores tragédias climáticas e ambientais do Brasil.

As cidades de Areal, São José do Vale do Rio Preto, Sumidouro, Bom Jardim, Teresópolis, Petrópolis e Nova Friburgo, foram as mais atingidas. Entre elas, Teresópolis, Petrópolis e Nova Friburgo sofreram os maiores impactos devido ao grande número de encostas que deslizaram, provocando ondas de cheia e avalanches de lama. O município de Nova Friburgo registrou aproximadamente 3 mil deslizamentos.

A Região Serrana é o polo de produção agrícola do Estado do Rio de Janeiro mais importante, no que se refere à exploração da olericultura, floricultura e avicultura de corte e postura. A agricultura familiar caracteriza a economia das regiões rurais, sendo que grande parte da população urbana também está envolvida em pelo menos uma atividade agrícola ou pecuária (SECRETARIA DE AGRICULTURA E PECUÁRIA RJ, 2011)

A catástrofe resultou na cobertura de regiões inteiras por lama, destruição de centenas de casas e soterramento de dezenas de pessoas. A magnitude do desastre foi tal que causou alterações significativas na geografia da área afetada. Rios, córregos e canais tiveram seus cursos modificados, enquanto estradas, pontes e ruas foram completamente destruídas pela força dos deslizamentos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO PLUVIOMÉTRICO

De acordo com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a atuação da chamada Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no sudeste do Brasil, foi a principal causa dos altos índices pluviométricos registrados na Região Serrana.

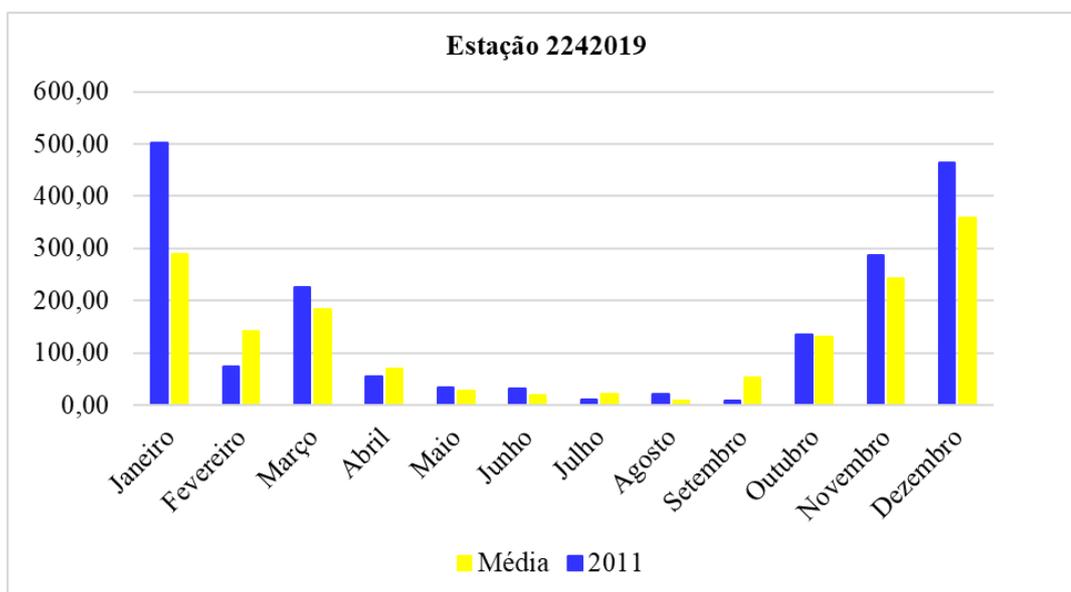
O evento se caracterizou pela soma de situações meteorológicas adversas, juntamente com o relevo da região, a ocupação desordenada do solo e o histórico de chuvas ocorridas nos dias anteriores ao desastre. No dia 11 de janeiro a presença da Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), que é caracterizada por uma banda de nebulosidade que se estende desde a região Amazônica até o Oceano Atlântico, passando pelas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil,

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

transportando a alta umidade da Amazônia pelo país, juntamente com o aquecimento diurno, a instabilidade atmosférica e o relevo da Região Serrana; formaram-se nuvens convectivas que ficaram estacionadas por mais de 4 horas sobre as cidades da Região Serrana, chovendo forte e continuamente. Esta precipitação forte e contínua provocou rapidamente a cheia dos rios e os grandes deslizamentos de terra, ocasionando o desastre (CANEDO ET AL., 2011).

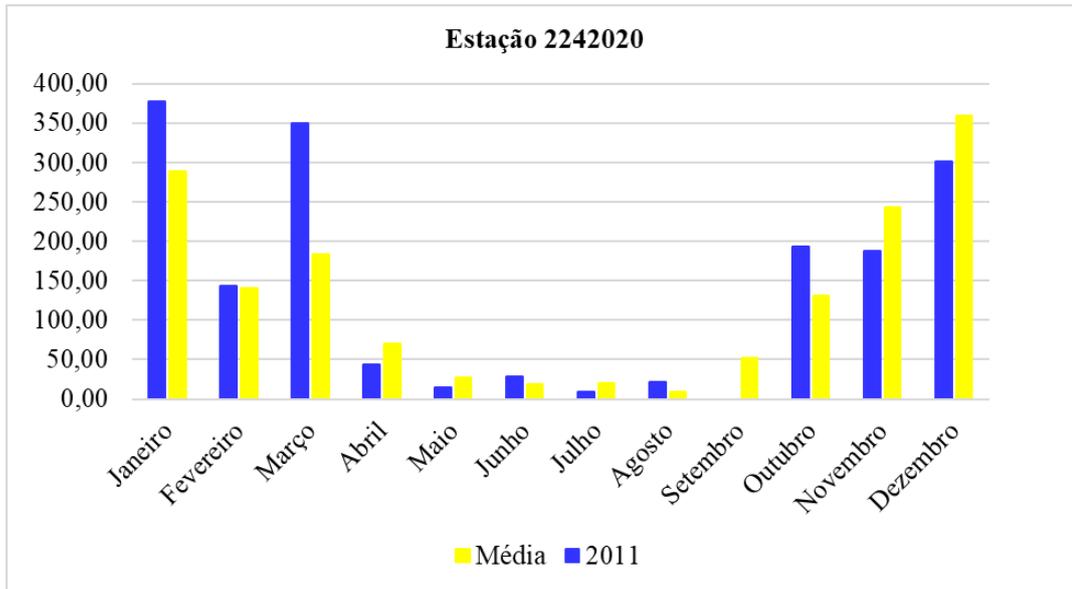
A fim de caracterizar o comportamento do evento pluviométrico ocorrido nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, apresenta-se na Figura 4 um gráfico contendo as médias das chuvas cinco estações mencionadas na Tabela 1, apresentada no Capítulo 3, juntamente com os dados de chuva mensal de 2011.

Figura 4 (a) - Totais mensais do ano de 2011 e a média de cada mês



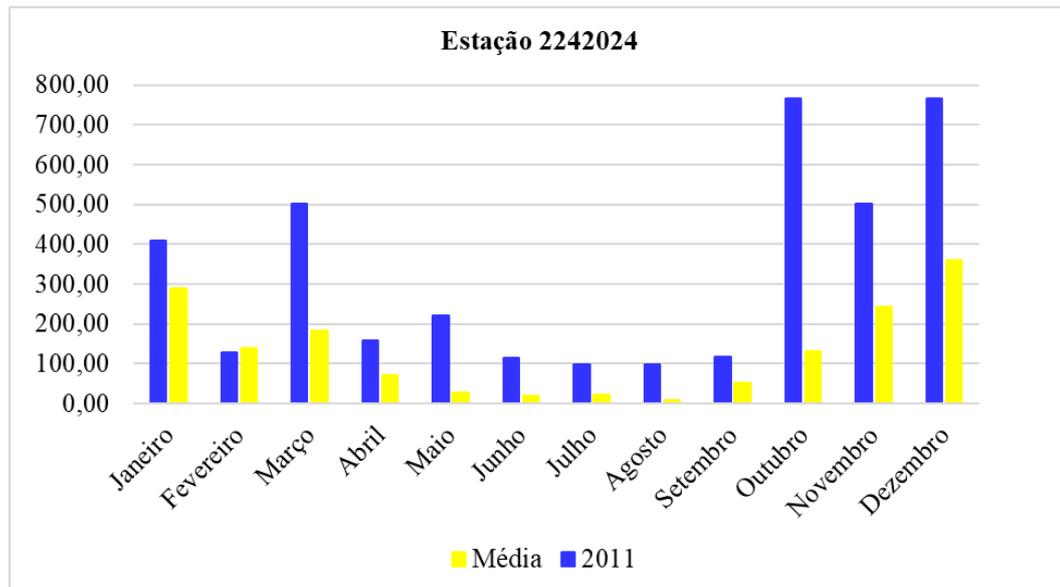
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 4 (b) - Totais mensais do ano de 2011 e a média de cada mês



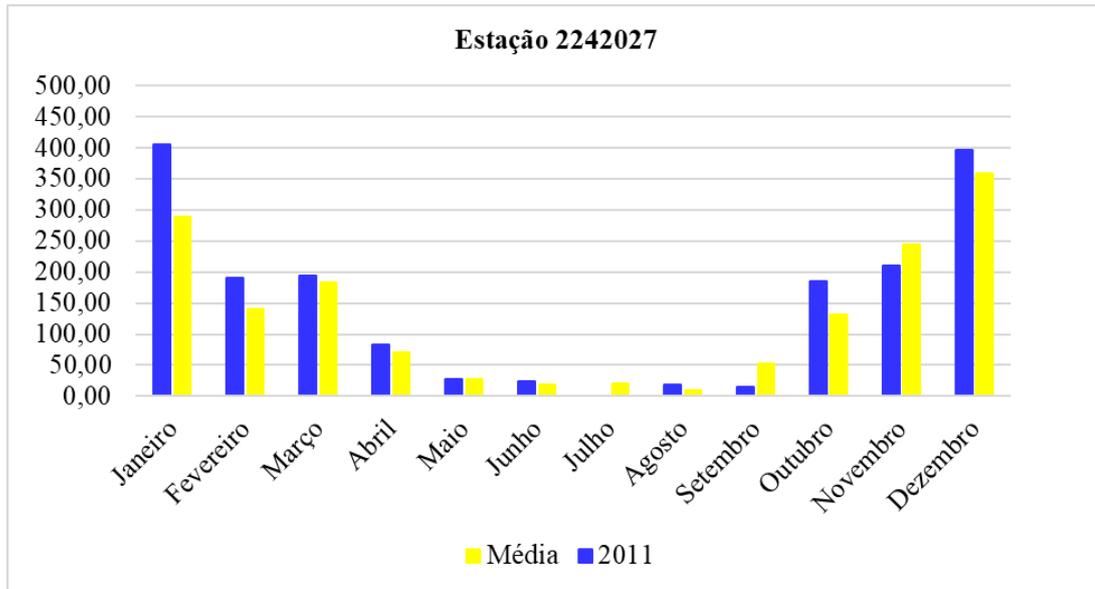
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 4 (c) - Totais mensais do ano de 2011 e a média de cada mês



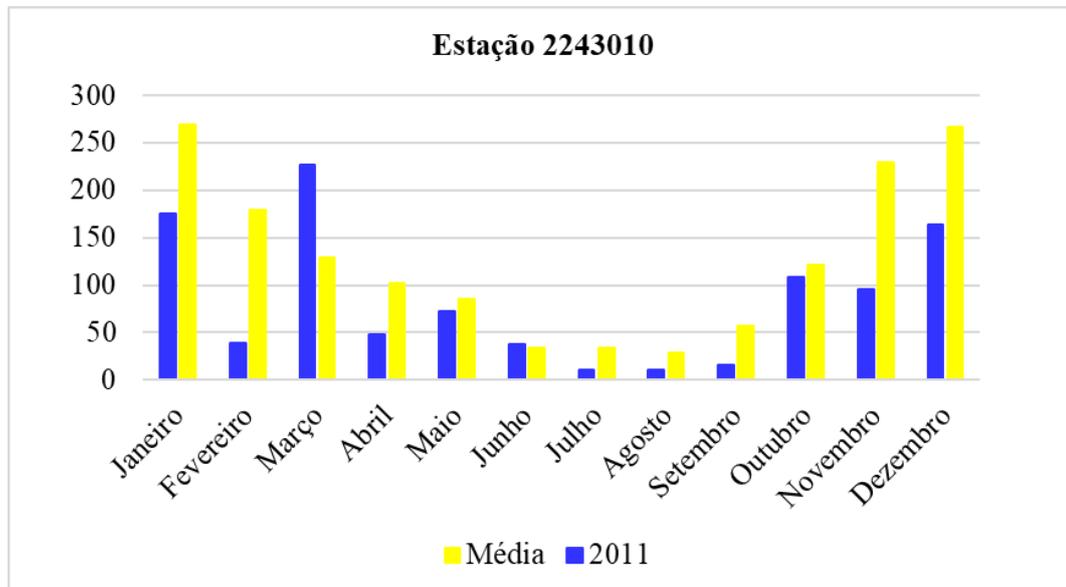
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 4 (d) - Totais mensais do ano de 2011 e a média de cada mês



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 4 (e) - Totais mensais do ano de 2011 e a média de cada mês



(fonte: elaborada pela autora)

Analisando os gráficos, observa-se que o mês de janeiro de 2011 apresentou um índice pluviométrico superior à média histórica, com exceção da estação Itamarati (2243010),

localizada em Petrópolis, onde as chuvas registradas foram inferiores à média. A estação Teodoro de Oliveira (2242024), situada em Nova Friburgo, destacou-se por apresentar um regime pluviométrico significativamente mais elevado em comparação às demais estações, especialmente na época mais chuvosa.

4.3 CAUSAS DO DESASTRE

Segundo o Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro, do DRM-RJ, publicado ao final de janeiro de 2011, apontou como fatores do desastre a geologia da região, a ocupação irregular do solo e as chuvas de alta intensidade. Em 4 de março de 2011, a Ministra do Meio Ambiente, em reunião do Conselho de Desenvolvimento Econômico e Social, mostrou estudo realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) que afirma que o descumprimento do código florestal atual estava também diretamente ligado a grande parte das mais de 900 mortes na região serrana do Rio. Várias das casas destruídas estavam em áreas de preservação permanente e muitas estavam dentro da faixa de 30 metros de distância da margem do rio, área que, segundo o atual Código Florestal, deveria ter a sua vegetação nativa preservada.

De forma geral, pode-se afirmar que a deflagração de escorregamentos em encostas é controlada por uma série de fatores condicionantes naturais e antrópicos, muitas vezes com caráter cíclico, que possuem origem na formação da própria rocha e na sua história geológica e geomorfológica além da ação antrópica (AUGUSTO FILHO e VIRGILLI, 1998).

Guidicini e Nieble (1984) utilizam a terminologia de agentes e de causas de instabilização para discutirem estes condicionantes, entendendo como causa o modo de atuação de um determinado agente na instabilização de um talude ou de uma encosta. Segundo estes autores, os agentes são subdivididos nos seguintes grupos: predisponentes (unidades geológicas, topografia, características geotécnicas dos solos, clima, hidrologia, gravidade, calor solar e tipo de cobertura vegetal); efetivos preparatórios (pluviosidade, erosão pela água e pelo vento, congelamento e degelo, variações de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação do nível de lagos, das marés e do lençol freático e ação antrópica) e efetivos imediatos (chuvas intensas, fusão do gelo e da neve, erosão, terremotos, ondas, vento,

ação antrópica acelerada, entre outros). Quanto às causas, destacam-se as internas (efeito das oscilações térmicas, redução dos parâmetros de resistência por intemperismo); as externas (mudanças da geometria do sistema, efeitos de vibrações, mudanças naturais na inclinação das camadas) e as intermediárias (elevação do nível piezométrico em massas homogêneas, elevação da coluna de água em descontinuidades, rebaixamento rápido do lençol freático, erosão subterrânea do tipo pipping e diminuição do efeito de coesão aparente) (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Topograficamente, a curvatura representa a forma da encosta e o delineamento das curvas e suas transições. A forma da encosta possui um papel importante na distribuição do conteúdo de água, em especial na rápida descarga de água nos mantos de alteração durante episódios chuvosos. As porções côncavas concentram maior volume de água e de sedimentos, permitindo a elevação da pressão e reduzindo a estabilidade da encosta, durante eventos pluviométricos intensos (ANDERSON e BURT, 1978).

A orientação de vertentes refere-se à posição das faces do terreno, frente à distribuição da radiação solar. Este parâmetro pode influenciar o teor de umidade sobre o terreno, inferindo nos processos biofísicos, tais como o tipo de vegetação e a espessura do solo (COLÂNGELO, 1995). Desta forma, a maior ou a menor quantidade de umidade influenciará a formação e a tipologia da cobertura vegetal, a espessura e a porosidade do solo, entre outras características. As encostas cujo material de alteração sofre maior ciclo de umedecimentos e secamento podem ser mais suscetíveis à ruptura, em função do aumento das fissuras e da porosidade, responsáveis também pelo acréscimo de água e de elevação das pressões dentro do material (GAO, 1993).

O ângulo da encosta representa a inclinação do terreno do topo à sua base e este por sua vez, pode influenciar na velocidade de deslocamento do material, assim como na capacidade de transporte (ANDERSON e BURT, 1978). Como importante parâmetro topográfico também, destaca-se a área de contribuição, que se refere à concentração dos fluxos de água vindas das porções mais altas das encostas, que conseqüentemente podem levar à saturação dos solos.

Pode-se dizer que o coeficiente de segurança de encostas naturais é próximo de um, estando em condição limite de estabilidade, bastando alguma intervenção atípica, como a ocorrência de um

elevado evento pluviométrico, para diminuir este coeficiente e provocar um escorregamento. Neste sentido, as propriedades pedológicas, geotécnicas e hidrológicas dos solos podem impulsionar ou não o material de uma encosta em sua direção inferior dependendo de sua resistência (VARGAS, 1972; MASSAD, 2010).

A caracterização de algumas propriedades dos solos, como por exemplo, a granulometria e a estrutura do solo, são importantes para melhor se compreender o comportamento hidrológico dos solos e são fundamentais na investigação do armazenamento e do movimento da água. Assim, das principais propriedades dos solos, destacam-se, a granulometria, a plasticidade e a atividade da fração fina dos solos, muito estudadas na Mecânica dos Solos e na Geomorfologia (VARGAS, 1972).

Geotecnicamente, as principais características do solo dividem-se em intercepto coesivo, peso específico, espessura do solo, ângulo de atrito interno, condutividade hidráulica, entre outras, além de propriedades hidrológicas, como a difusividade hidráulica (facilidade com que a umidade avança no espaço e no tempo). A capacidade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade depende de sua resistência ao cisalhamento e, nesse sentido, a correta determinação da resistência ao cisalhamento é um dos maiores problemas em estabilidade de encostas. Dessa forma, a resistência ao cisalhamento de um solo em qualquer direção é considerada como a tensão de cisalhamento máxima que pode ser aplicada à estrutura do solo. Quando este máximo é atingido, ocorre a ruptura, tendo sido totalmente mobilizada a resistência do solo (SOUZA PINTO, 2000).

Collins e Znidarcic (2004) explicam que uma das causas internas dos deslizamentos de terra é a alteração do equilíbrio das tensões dentro da massa de solo. Essa alteração ocorre principalmente nas áreas de umedecimento, nos horizontes A e B do solo e no saprolito (Horizonte C). Esses materiais geralmente contêm mais areia e menos argila, o que faz com que atinjam mais rapidamente seu limite de liquidez. Esse limite de liquidez está relacionado à plasticidade das argilas presentes no solo.

A estabilidade do maciço de solo é usualmente analisada a partir do conceito de equilíbrio limite, que implica considerar o instante de ruptura, quando as tensões atuantes igualam a

resistência do solo, desconsiderando as deformações do solo. Existem em qualquer ponto da massa do solo três planos ortogonais no qual as tensões cisalhantes são nulas, chamados de planos principais de tensões. Logo, as tensões normais recebem o nome de tensões principais, cuja maior das tensões atuantes é chamada tensão principal maior (σ_1), a menor é chamada de tensão principal menor (σ_3) e a terceira é chamada de tensão principal intermediária (σ_2), que normalmente é desprezada, por seus efeitos não serem perfeitamente compreendidos (MASSAD, 2010). Fernandes e Amaral (1996) apontam as discontinuidades dos solos (ex. falhas, fraturas e horizontes com diferentes características) e os depósitos de encosta, como fatores condicionantes geomorfológicos de escorregamentos. Tais discontinuidades podem estar presentes dentro do saprolito e do solo residual, incluindo, principalmente, feições estruturais reliquias do embasamento rochoso (fraturas, falhas, entre outros) e horizontes de solo formados pela atuação de processos pedogenéticos. Estas discontinuidades podem atuar de modo decisivo na distribuição de poro-pressões no interior da encosta e, conseqüentemente, na sua estabilidade.

Geotecnicamente, a resistência de um solo depende, principalmente, da sua compactidade e da sua densidade. Quanto mais compacto e denso é o solo, mais resistente ele será. A ação integrada do atrito e da coesão contribui muito para a resistência do solo, pois o ângulo de atrito do solo (ϕ) está associado ao efeito de entrosamento entre as suas partículas, enquanto a coesão (c) está associada à natureza das partículas e/ou à presença de cimentação (SOUZA PINTO, 2000). O fenômeno de cisalhamento é, em geral, um fenômeno de atrito e a resistência ao cisalhamento do solo depende, predominantemente, da tensão efetiva normal ao plano de cisalhamento (SOUZA PINTO, 2000). Dessa forma, conforme Varnes (1978), a redução na coesão, no ângulo de atrito e as variações da poro-pressão do solo são aspectos que podem diminuir a resistência das encostas.

A ruptura ocorre em virtude do fluxo de água que se desenvolve paralelo à encosta devido à existência de um horizonte menos permeável abaixo de uma camada passível de estabilização, provocando um aumento brusco das poro-pressões positivas. A instabilização a partir da perda de sucção decorrente do processo de infiltração nas encostas e ao avanço da frente de saturação,

que podem alcançar profundidades abaixo da zona de enraizamento, pode ocasionar perda de coesão aparente, condicionando à ruptura (TERZAGUI, 1967).

Os escorregamentos que ocorrem devido à infiltração de água são processos que se registram durante períodos de chuva quando há elevação do nível do lençol freático ou, apenas, por saturação das camadas superficiais de solo. Quando as encostas interceptam o lençol freático, a manifestação, eventual, da erosão interna pode contribuir para a sua instabilização. Nestas condições, o solo apresenta uma coesão aparente que pode ser alterada em virtude de variações na umidade. A condição de não saturação do solo ocorre na camada acima do lençol freático e, nesta região, a umidade pode ser decorrente de processos de infiltração da água de chuva ou por ascensão por meio dos vazios (capilaridade) (TERZAGHI, 1967).

De modo geral, os solos tropicais possuem comportamentos condicionados pelos seus arranjos micro e macroestruturais, que incluem descontinuidades, juntas e outras superfícies herdadas da rocha matriz, cimentações e outras ligações entre partículas e entre agregados de partículas. Além disso, ocorrem muito frequentemente em estado não saturado, estando sob a ação das tensões produzidas pelas forças capilares (WOLLE, 1988). As descontinuidades geológicas, presentes nos maciços rochosos e em solos de alteração, constituem também planos ao longo dos quais podem ocorrer escorregamentos (WOLLE, 1988). A espessura do manto do solo, a natureza argilosa impermeável e o conteúdo de matéria orgânica dos solos tropicais os tornam suscetíveis aos movimentos de massa; excetuando-se os solos do tipo Latossolos (saprolitos), que são mais permeáveis com capeamentos lateríticos mais resistentes aos processos erosivos e de movimentos de massa (BIGARELLA et al., 1996). Nesse sentido, as propriedades dos solos superficiais e subsuperficiais e a composição litológica subjacente interferem nos processos de movimentos de massa, tanto como fator desencadeante, como sendo o próprio material envolvido (BIGARELLA et al., 1996).

Na Serra do Mar, em função das características climáticas, o processo de alteração químico e físico é intenso. Embora existam condições favoráveis à formação de espessos mantos de alteração, há uma constante remoção devido à alta declividade destas encostas. A cobertura pedológica desta região não se apresenta de forma homogênea, mas com variações e isso,

muitas vezes, pode definir o plano de ruptura e a deflagração dos escorregamentos translacionais rasos (WOLLE e CARVALHO, 1989).

4.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

O temporal registrado na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro espalhou um rastro de destruição em várias cidades, sendo as mais afetadas Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo. No entanto, os municípios de Areal, São José do Vale do Rio Preto, Bom Jardim, Sumidouro, Sapucaia, Trajano de Moraes, Santa Maria Madalena e São Sebastião do Alto também foram atingidos.

O cenário de destruição foi impressionante, com mais de mil mortes registradas, muitas encostas que deslizaram (em sua maioria florestadas), rios que transbordaram atingindo cotas superiores a cinco metros e até alteraram seu curso original. Houve também o assoreamento de grandes extensões dos cursos d'água e destruição de quase duas centenas de pontes, pontilhões e pinguelas. As características da tragédia nas três cidades mais afetadas foram diferentes das demais, pois a concentração da chuva se deu nessas cidades, causando o deslizamento das encostas e o consequente agravamento do problema. Nas outras a onda de enchente foi a maior responsável pela destruição.

A bacia do rio Santo Antônio, no distrito de Itaipava, em Petrópolis, teve consideráveis mudanças em relação a seus regimes hidrosedimentológicos, principalmente nos rios Cuiabá e Santo Antonio. Dentre as principais causas dessas mudanças pode-se destacar o alto índice pluviométrico registrado na região, a elevada quantidade de sedimentos que foram carreados para a calha dos rios e a intensa e desordenada ocupação de espaços que outrora seriam tomados pelo escoamento natural do rio.

Destaca-se que a elevada magnitude da onda de cheia foi capaz de destruir inúmeras pontes e edificações em um curto período de tempo e que, após a passagem desta, a rede de macrodrenagem da região foi bastante modificada sendo possível perceber a nova conformação

dos principais corpos hídricos, inclusive com a presença de meandros não existentes antes das precipitações.

O primeiro distrito de Teresópolis abriga o centro da cidade e a maior parte da concentração industrial e comercial. Nesta região, os bairros de Campo Grande, Posse, Caleme, Jardim Salaco e Imbuí foram os mais afetados. No 2º distrito, os bairros de Santa Rita, Cruzeiro e Pessegueiros apresentaram grandes prejuízos na infraestrutura local, com danos em diversas pontes que dificultaram a mobilidade da população, e o bairro Poço dos Peixes ficou isolado após as chuvas. Já o 3º distrito, formado pela zona rural, as regiões de Bonssucesso e Vieira foram seriamente afetadas causando danos a infraestrutura local, destruição de diversas moradias e grandes prejuízos econômicos para o setor agrícola.

Em Teresópolis, as principais bacias hidrográficas afetadas foram as dos rios Preto e Paquequer. As sub-bacias do ribeirão de Santa Rita, Príncipe, Imbuí, Quebra-Frascos, Arrieiro, Sebastiana, Frades, Formiga, Morro Agudo e Vieira foram as mais atingidas pelas chuvas.

Devido a superposição da intensa precipitação, do arraste de detritos pedregulhosos e dos deslizamentos, na cabeceira das bacias, houve a propagação de ondas de cheia com elevada quantidade de sedimentos trazendo como consequência a alteração das características das calhas de escoamento dos corpos hídricos acima citados. As regiões medianas dos vales foram ocupadas por grande quantidade de pedras e pedregulhos. Nas regiões mais planas, as planícies de inundação, formaram grandes volumes de sedimentos arenosos deixando estas planícies cobertas por extensas faixas de areia.

A macrodrenagem da cidade de Nova Friburgo, principalmente das bacias do rio Grande, do córrego d'Antas e do rio Bengalas foi seriamente comprometida com relação as suas características hidráulicas básicas, apresentando problemas como barramento do escoamento, calhas completamente assoreadas e até mesmo mudança de curso dos rios. Enfatiza-se que alguns afluentes de médio e pequeno porte também foram afetados a exemplo dos córregos Três Cachoeiras, Suíço, da Buracada e o ribeirão do Capitão.

No vale do córrego d'Antas a tragédia assumiu proporções maiores. Praticamente todo o trecho urbano da bacia, que é de aproximadamente 10 km, foi atingido e o córrego além de ter suas dimensões alteradas em todo seu percurso, como aumento significativo da largura, teve seu eixo retificado em alguns trechos. Este córrego nasce no próprio município de Nova Friburgo e drena até a confluência com o rio Bengalas em Conselheiro Paulino, uma área de 52 km² ao longo de 18,6 km.

Acredita-se que um fator agravante na destruição das margens dos rios foi a grande quantidade de material (terra, árvores e pedras) que desceu das encostas formando obstruções ao escoamento dos canais, assim com a continuidade das precipitações, a água rompeu essas barreiras e o escoamento ganhou energia significativa se desenvolvendo de maneira torrencial e turbulenta, caracterizando o escoamento supercrítico.

4.5 IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS

Apesar de conviver anualmente com enchentes e alguns deslizamentos, a Região Serrana do Rio de Janeiro não havia, até então, experimentado uma situação de tal gravidade. Bairros inteiros foram cobertos em questão de segundos. As perdas foram imensas: mais de 900 mortos, cerca de 350 desaparecidos e milhares de desabrigados. Os municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis registraram o maior número de vítimas fatais. Em Nova Friburgo, os impactos afetaram predominantemente a área urbana, enquanto em Teresópolis e Petrópolis, os impactos foram mais severos na área rural.

Durante a cheia, muitas pontes foram totalmente destruídas pela força das águas ou sofreram danos em suas estruturas, o que trouxe inúmeros transtornos para a região, ocorrendo o isolamento de comunidades. A destruição das pontes impossibilitou que grande parte da produção agrícola produzida na região fosse escoada, gerando assim, grande prejuízo econômico para o município. Estima-se que 2.000 residências em Teresópolis foram destruídas ou danificadas pela força das águas. A infraestrutura da cidade foi atingida com severidade e muitos bairros ficaram sem luz, água e telefone.

Os principais rios afetados da região são; Grande, em Nova Friburgo e Bom Jardim, Cônego e Bengalas, em Nova Friburgo, Preto e Paquequer, em Teresópolis, São José do Vale do Rio em Areal, e Santo Antonio e Cuiabá, em Petrópolis, todos pertencentes a bacia do rio Paraíba do Sul. Nas áreas de baixo relevo e nas meias encostas, é desenvolvida uma intensa atividade agropecuária muito produtiva. Neste universo de produção, estima-se que 17.000 famílias que se sustentam basicamente da atividade agropecuária tenham sido afetadas (SECRETARIA DE AGRICULTURA E PECUÁRIA RJ, 2011). Além disso, o setor hoteleiro foi seriamente afetado pelas enchentes.

A bacia do rio Bengalas tem um índice de urbanização bastante elevado, e as margens do próprio Bengalas são por vezes as paredes das residências (margem esquerda) e na maioria do curso a rodovia RJ 116 (margem direita), essa situação fez com que a altura d'água, de aproximadamente 3,0 m acima do greide da rua, atingida na região do Bengalas, provocasse grandes prejuízos materiais principalmente para o comércio. Foi registrado também alguns deslizamentos de encostas que aterrou parcialmente algumas regiões de área urbana da cidade, como a praça do suspiro e o bairro Duas Pedras.

5 INSTRUMENTAÇÃO

As encostas das serras brasileiras apresentam muitos taludes de solos coluviais tropicais. A movimentação e ruptura desses taludes causam prejuízos às obras de engenharia construídas nestas encostas. Os solos coluviais presentes nestes taludes se caracterizam por estarem em movimento lento e constante. Esse movimento tende a acelerar durante ou logo após precipitações intensas.

Segundo Penna et al. (2017), a análise da instrumentação é efetiva na detecção de falhas em estágio inicial que talvez não sejam identificadas em uma inspeção visual. Ou seja, sem a instrumentação, as falhas seriam identificadas da inspeção visual somente em estágios avançados, onde muitas vezes não é possível realizar correções.

Souza (2018) destaca que sem a instrumentação, as avaliações de segurança seriam feitas somente levando em conta informações vindas das inspeções visuais, conhecimento do projeto e construção e julgamento de engenharia. A instrumentação não elimina a utilização do julgamento dos profissionais de engenharia, mas oferece informações sobre o comportamento das estruturas, informando sobre a existência ou não de determinado problema (FUSARO, 2007).

Wilson e Mikkelsen (1978) definiram que em um deslizamento de solo a magnitude, a velocidade e a distribuição dos deslocamentos são geralmente as mais importantes medidas requeridas. Igualmente importante em muitos problemas de deslizamento, contudo, são as medidas de pressão neutra dentro da área em movimento, particularmente em sistemas estratificados nos quais algum excesso de pressão hidrostática pode existir entre as camadas.

Se a profundidade e espessura da zona do movimento não são aparentes, inclinômetros, ou instrumentos similares que possam detectar o movimento em profundidade, devem ser usados. A pressão neutra na superfície de deslizamento ou no entorno, também deve ser medida para

permitir que seja feita uma análise em tensões efetivas. A medição da pressão neutra possibilita determinar a adequação de um sistema de drenagem (Wilson e Mikkelsen, 1978).

5.1 PIEZÔMETRO

O piezômetro é um instrumento de medição geotécnica, utilizado para medir a pressão da água e o nível do lençol freático produzido por alguma infiltração de águas subterrâneas. O monitoramento do lençol freático é muito importante, pois o aumento excessivo da pressão hidrostática ou da carga hidráulica pode ser muito arriscado, por isso o uso desse tipo de instrumentação é fundamental para conhecer essas variações de nível.

Os piezômetros têm como finalidade a medição de poropressões e podem ser instalados em diversas posições no subsolo e aplicados para monitoramento do lençol freático, da pressão da água, dos sistemas de drenagem e da qualidade das águas subterrâneas.

Poropressão é definida como a pressão da água subterrânea atuante nos poros do solo e da rocha. Em qualquer ponto abaixo do lençol freático, a poropressão é o resultado da pressão de água atuando naquele ponto contra os grãos interconectados ou fraturas. A poropressão é positiva nos pontos abaixo do lençol freático, nula nos pontos de mesmo nível que o nível do lençol freático e, em alguns casos, pode ser negativa nos pontos acima do lençol freático. (CERQUEIRA, 2017).

Os tipos mais comuns de piezômetros são: Casagrande de tubo aberto ou fechado (dependendo da pressão apresentada no ponto); hidráulico de dupla tubulação; pneumático; de resistência elétrica; de corda vibrante; e mais recentemente começaram a ser usados os piezômetros de fibra ótica (SILVEIRA, 2006). Por serem do tipo mais empregado, essa pesquisa se concentrou apenas nos piezômetros Casagrande de tubo aberto.

O Piezômetro de Casagrande é o mais usado em planos gerais como instrumento de medida de poropressão. O Piezômetro de Casagrande ou piezômetro de tubo aberto consiste em um tubo, em PVC por exemplo, dotado de um filtro na sua extremidade inferior. O piezômetro é colocado em um furo de sondagem de forma que o filtro se posicione na profundidade onde se deseja

medir a pressão neutra. O filtro permite a passagem da água intersticial para dentro do tubo, mas retém o solo instrumentado. No entorno desse filtro o furo é preenchido com areia lavada, e logo acima do filtro o é criado um selo de argila impermeável no furo. A tendência natural é a água entrar no piezômetro e subir até uma altura correspondente à poropressão existente no ponto de medida.

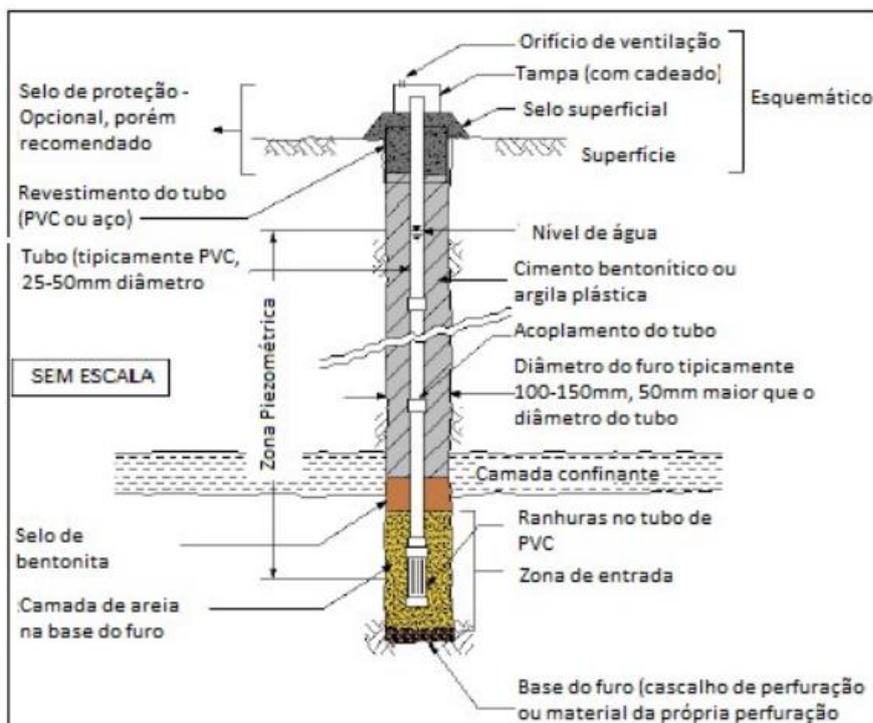
Se o solo instrumentado é fino, argiloso, a resposta inicial do Piezômetro de Casagrande pode ser lenta, pois é função da permeabilidade do solo. Os piezômetros de resposta rápida são vantajosos nesses solos. Por esse motivo, piezômetros pneumáticos ou elétricos podem ser preferidos, particularmente em solos argilosos, pois são mais independentes da permeabilidade do solo para fornecer uma resposta mais rápida. Evidentemente, os piezômetros pneumáticos ou elétricos necessitam ser calibrados.

5.1.1 Instalação

Os procedimentos para a instalação de piezômetros abertos são baseados nas condições dos materiais que são atravessados e nas estabelecidas pelo projeto. Para instalar um piezômetro, é necessário localizar topograficamente a posição do topo do tubo, bem como sua elevação em relação ao nível do terreno.

Segundo Machado (2007), para a instalação, a extremidade interior do tubo deve ser preenchida com material filtrante, areia grossa e brita e areia fina sobre essas camadas. Acima do ponto de medição, é feito o preenchimento com calda de cimento, bentonita ou argila plástica até a boca do furo, fazendo com que o piezômetro opere de forma hidraulicamente isolada. Deve-se certificar que a região em que o piezômetro está instalado esteja bem confinada, garantindo bons resultados. A Figura 5 representa esquematicamente o piezômetro de Casagrande.

Figura 5 - Esquema de piezômetro de Casagrande



(fonte: Cerqueira, 2017)

5.1.2 Precisão

O piezômetro aberto opera com base no princípio dos vasos comunicantes. Uma célula ou bulbo poroso capta a água de dentro do solo no ponto de interesse e a pressão atuante naquele ponto a eleva pelo tubo até uma posição (coluna d'água) que equilibra a pressão no bulbo piezométrico; A altura da coluna desde a elevação do bulbo piezométrico até o nível da água na tubulação é a medida da poropressão naquele ponto.

A variação das poropressões é obtida medindo as distâncias da superfície livre da água no tubo, em relação ao nível de elevação do topo do tubo de PVC do piezômetro; com esta distância e o nível de elevação do bulbo piezométrico, obtém-se o comprimento da coluna d'água de interesse. A coleta dos dados deve ser feita de forma ordenada e periódica. Além disso, o mesmo formato deve ser sempre utilizado para evitar erros no manuseio deles.

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

5.1.3 Interpretação de resultados

A leitura do nível de água é feita por meio de um cabo elétrico e dois condutores que possuem em sua extremidade um sensor. Quando o sensor atinge o nível de água no interior no tubo, o circuito elétrico é fechado, emitindo um sinal que indica que a leitura deve ser realizada. A cota piezométrica será o comprimento do cabo subtraído do valor da cota da boca do tubo (MACHADO, 2007).

Machado (2007) destaca ainda que a frequência de leitura deve variar de acordo com a fase do empreendimento, sendo que na fase de instalação, as leituras devem ser realizadas duas leituras semanais até a estabilização; na fase de enchimento, deverão ser realizadas duas leituras semanais; e na fase de operação, uma leitura semanal.

As leituras obtidas em campo devem ser registradas em planilhas, e posteriormente devem ser construídos os gráficos dos níveis piezométricos na estrutura.

5.2 INCLINÔMETRO

O inclinômetro é um instrumento que mede a variação da inclinação de um tubo colocado dentro de um furo de sondagem (Wilson e Mikkelsen, 1978). Desse modo, o inclinômetro permite a determinação da distribuição do movimento lateral em função da profundidade abaixo da superfície e em função do tempo. A aplicação dos inclinômetros a deslizamentos de solos e rochas é evidente; sendo, portanto, útil para definir superfícies de deslizamento ou zonas de movimento em relação a zonas estáveis.

Nos deslizamentos, tubos guias de inclinômetro são normalmente instalados em furos de sondagem de exploração estendidos através dos solos e rochas com suspeita de movimentação. Esses tubos possuem sua parte inferior preferivelmente assentada dentro de materiais que são assumidos como estáveis (Wilson e Mikkelsen, 1978).

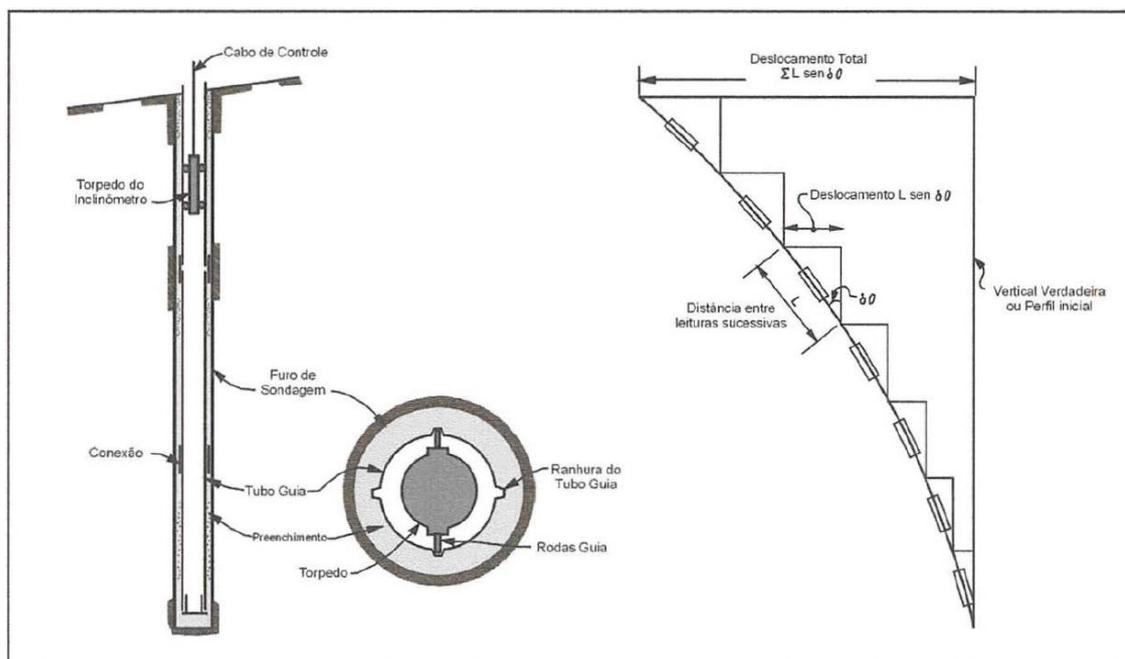
O sistema inclinômetro, segundo Dunnicliff (1988), tem quatro componentes principais:

- a) Um tubo guia instalado permanentemente;
- b) Um torpedo portátil contendo um transdutor sensível à gravidade;
- c) Uma unidade de leitura portátil;
- d) Um cabo elétrico graduado que conecta o torpedo à unidade de leitura, servindo de sustentação à descida do torpedo no tubo guia.

O torpedo do inclinômetro contém um transdutor sensível à gravidade, dotado de um pêndulo, projetado para medir inclinações do tubo guia em relação à vertical. Esse tubo guia é instalado em um furo com alinhamento próximo à vertical, de forma que o inclinômetro forneça dados para definir deformações subsuperficiais horizontais (Dunnicliff, 1988).

Para ser utilizado, o torpedo do inclinômetro é baixado e levantado dentro do tubo guia suspenso pelo cabo cuidadosamente marcado. Suas rodas são orientadas pelas ranhuras do tubo guia, como mostra a Figura 6. O registro da mudança de inclinação ao longo do tubo guia é monitorado na superfície. Leituras são tomadas em incrementos fixos, comumente iguais, ao longo de toda a profundidade do tubo guia (Wilson e Mikkelsen, 1978).

Figura 6 - Princípio de operação de um inclinômetro



(fonte: Cerqueira, 2017)

A maioria dos inclinômetros mede a inclinação do tubo guia em dois planos mutuamente perpendiculares quase verticais. Desse modo, as componentes horizontais do movimento, ambas transversais e paralela a qualquer direção assumida de deslizamento, podem ser computadas das medidas do inclinômetro.

A função do inclinômetro é detectar a mudança na inclinação do tubo guia de sua posição original de instalação próxima a vertical. Leituras tomadas a profundidades regulares preestabelecidas dentro do tubo guia permitem que sejam determinadas as variações na inclinação em diversos pontos. A integração dessas variações da inclinação entre quaisquer dois pontos fornece a deflexão relativa entre esses pontos (ver Figura 6). Repetindo essas medidas periodicamente obtêm-se dados sobre a localização, magnitude, direção e velocidade do movimento do tubo guia no furo de sondagem. A integração é normalmente executada a partir do fundo do furo, desde que o fundo seja assumido fixo em posição e inclinação (Wilson e Mikkelsen, 1978).

Esta é a situação mais comum, entretanto existem inclinômetros especiais para serem instalados em tubos guias horizontais e inclinados que estão fora do escopo desse trabalho.

Os inclinômetros podem ser divididos em convencionais ou fixos. Os inclinômetros convencionais são utilizados para monitorar deformações subsuperficiais em taludes instáveis. Por outro lado, os inclinômetros fixos são usados para monitorar deformações subsuperficiais no entorno de escavações ou dentro de taludes quando é requerido monitoramento rápido e automático.

Segundo Hanna (1985), inclinômetros convencionais não são adequados para monitoramento contínuo ou remoto de deformações em massas de solo. Os inclinômetros fixos, quando comparados aos convencionais, incluem como vantagens leituras mais rápidas, uma opção para leituras contínuas e automáticas e uma opção para transmissão dos dados para locais remotos ou para acionar um alarme se a deformação exceder uma quantidade pré-determinada (Dunnicliff, 1988).

Os taludes constituídos por solos coluviais, quando são instáveis se encontram em movimento contínuo. Esse movimento contínuo é lento, em condições climáticas normais, e rápido logo após períodos de chuvas intensas. Portanto, os inclinômetros fixos, por suas características, são particularmente indicados para a instrumentação de taludes de solos coluviais. Esse tipo de inclinômetro permite um monitoramento subsuperficial contínuo do movimento da massa de solo.

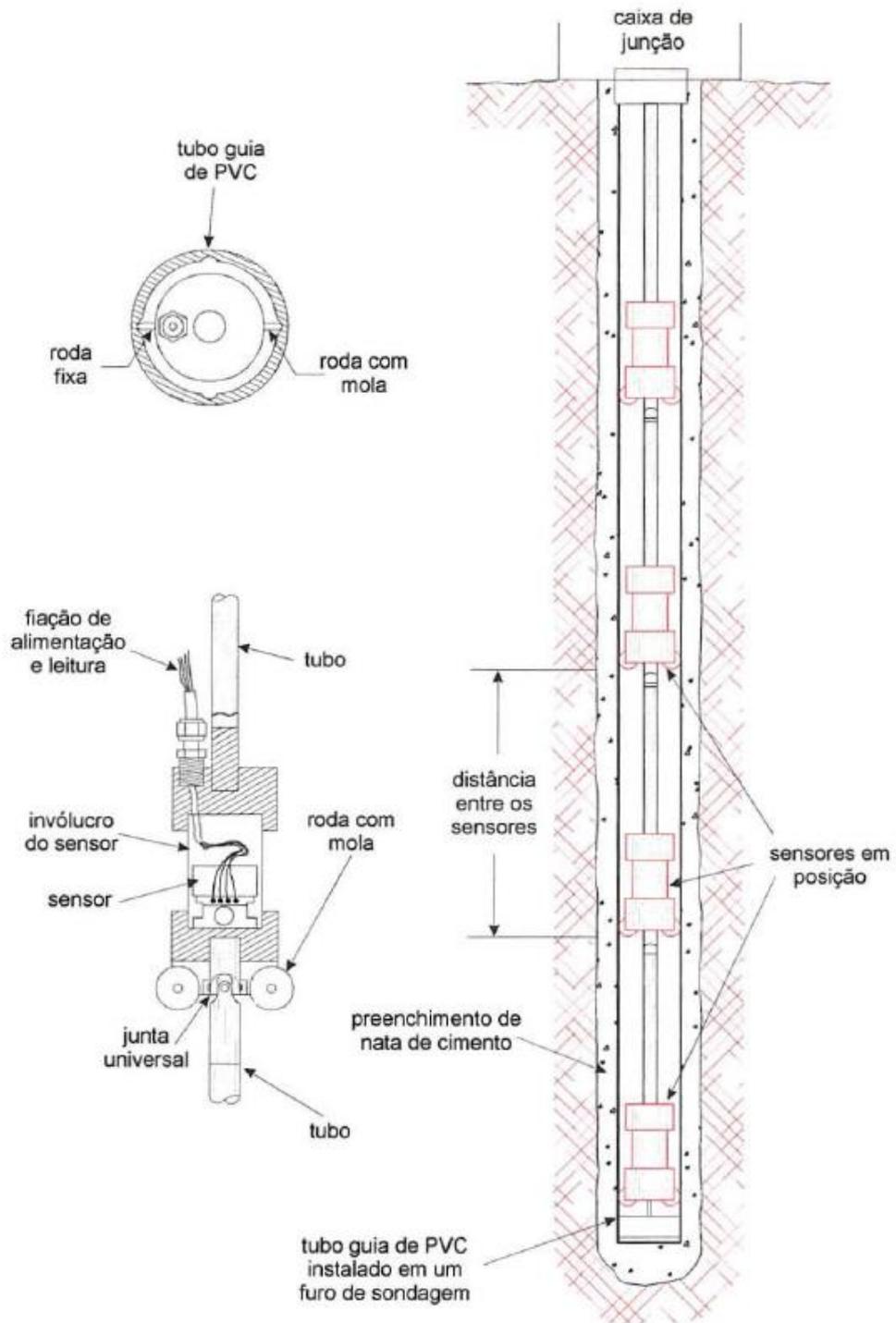
No Brasil, segundo Lacerda (2004), os colúvios encontrados são oriundos de massas coluvionares saturadas depositadas nos sopés das encostas montanhosas na região Sul Sudeste. A área de estudo, a região Serrana do Rio de Janeiro, está localizada na região Sudeste.

Um inclinômetro fixo é geralmente escolhido para operar em furos próximos à vertical e fornece essencialmente os mesmos dados que os inclinômetros convencionais (Dunnicliff, 1988).

5.2.1 Instalação

Um inclinômetro fixo compreende uma cadeia de sensores cada um contendo um transdutor uniaxial ou biaxial, como mostra a Figura 7. Os sensores são unidos por hastes articuladas e estão suspensos dentro de um tubo guia inserido em um furo de sondagem (Hanna, 1985). Os transdutores são posicionados em intervalos ao longo do eixo do furo e podem ser concentrados em zonas em que o movimento é esperado. O aparelho geralmente usa tubos guias padrão e pode ser removido para reparos. Contudo, a continuidade das leituras é interrompida quando o aparelho é removido (Dunnicliff, 1988).

Figura 7 - Instalação e detalhe de um inclinômetro fixo



(fonte: Wilson e Mikkelsen, 1978)

5.2.2 Precisão

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), a maior vantagem do inclinômetro fixo sobre o convencional é a eliminação de problemas de inexatidão de trajeto e repetição de posicionamento. Se a unidade fixa for retirada para reparos, a exatidão global será reduzida a de um inclinômetro convencional. Também os transdutores devem ter estabilidade de zero adequada. Devido a sua exatidão, o inclinômetro fixo pode ser usado para medir pequenos movimentos em rocha.

Os deslocamentos do tubo guia são calculados usando o mesmo método dos inclinômetros convencionais (Dunnicliff, 1988). A partir da tangente do ângulo de inclinação do tubo guia, definido nos pontos de leitura, é determinado deslocamento horizontal de cada ponto. Os deslocamentos são somados e esses resultados permitem definir o perfil deformado do tubo guia. Uma série de leituras possibilita monitorar o comportamento das deformações subsuperficiais ao longo do tempo.

Existem limitações quanto ao número de sensores que podem ser instalados em um único tubo guia para formarem um inclinômetro fixo. A primeira limitação é a dimensão do torpedo de cada sensor. A segunda é a quantidade de cabos necessários para conduzir os sinais de saída de cada sensor, todos os cabos de todos os sensores devem passar no entorno do sensor mais superior no tubo guia. Portanto, numa cadeia de sensores instalada dentro de um tubo guia, esses sensores não podem estar proximalmente espaçados devido ao limite de quantidade dos mesmos. O espaço entre cada sensor cria uma descontinuidade entre as leituras ao longo do perfil, impedindo a definição de um perfil detalhado do movimento da massa de solo.

Quando é requerido um perfil de deformações detalhado, deve ser instalado um tubo guia separado, adjacente ao inclinômetro fixo. Esse tubo guia deve ser monitorado por um inclinômetro convencional (Hanna, 1985), que permite leituras mais próximas entre si do que um inclinômetro fixo.

5.2.3 Interpretação de resultados

A maioria dos inclinômetros fornece dados de inclinação do tubo guia em dois planos mutuamente perpendiculares próximos da vertical. Então, a partir desses dados, podem ser computadas as componentes horizontais do movimento, ambas transversais e paralelas a qualquer direção escolhida (Dunnicliff, 1988).

A partir da determinação da distância horizontal, distorção e resultante para cada ponto da profundidade total medido no tubo do inclinômetro, faz-se uma representação gráfica. Com a representação dos vários valores de deslocamento dos eixos “A” e “B”, em épocas diferentes a uma determinada profundidade, obtém-se o sentido da movimentação ocorrida no período.

6 INSTRUMENTAÇÃO EM ESTABILIDADE DE TALUDES

As rupturas de taludes criam a necessidade de se coletar alguns dados quantitativos para analisar os problemas de instabilidade e para projetar medidas de melhoria da estabilidade (Wilson e Mikkelsen, 1978). São normalmente executados o mapeamento topográfico, o mapeamento geológico, a investigação subsuperficial do solo e da água e os ensaios de resistência ao cisalhamento em laboratório. Esses dados coletados auxiliam na determinação das causas do deslizamento, do modo de ruptura e das características físicas e de engenharia do solo e da rocha envolvidos. Essa investigação é necessariamente realizada em deslizamentos de solo já desenvolvidos, cujas características podem ser observadas e registradas. Contudo, pequenos movimentos da massa de solo que ocorrem antes ou durante uma ruptura incipiente não são, em geral, visualmente evidentes, de modo que o valor da informação que pode ser obtida na superfície do solo é limitado.

Entretanto, a instrumentação pode fornecer informação valiosa em deslizamentos incipientes, assim como nos completamente desenvolvidos. Nesse aspecto, a instrumentação não possui a intenção de substituir as observações de campo e outros procedimentos de investigação. Pelo contrário, a instrumentação acrescenta outros dados para fornecer informação suplementar e para avisar a iminência de movimentos maiores. Wilson e Mikkelsen (1978) apresentaram situações típicas para as quais vários instrumentos devem ser usados:

- a) Determinar a profundidade e a forma da superfície de ruptura em um deslizamento desenvolvido, de modo que cálculos possam ser feitos para determinar os parâmetros de resistência do solo disponíveis na ruptura e que possam ser projetados tratamentos de melhoria da estabilidade;
- b) Determinar os movimentos absolutos verticais e laterais dentro da massa deslizante;

- c) Determinar a velocidade de deslizamento, os movimentos em aceleração ou desaceleração, e desse modo alertar para perigos iminentes;
- d) Monitorar a atividade de taludes naturais ou de corte no limite da estabilidade e os efeitos das atividades de construção ou da precipitação sobre eles;
- e) Monitorar o nível d'água ou a pressão neutra normalmente associada com a atividade de deslizamento para que seja possível executar uma análise em tensões efetivas;
- f) Fornecer leitura digital remota ou sistema de alarme remoto que possa avisar de possíveis perigos;
- g) Monitorar e avaliar a efetividade de várias medidas de controle.

Na última situação, atividades de recuperação são frequentemente realizadas em tratamentos para melhoria da estabilidade através do planejamento e monitoramento durante a construção. Por exemplo, a drenagem pode ser inicialmente instalada e seus efeitos monitorados para determinar se uma contenção projetada para o talude é realmente necessária.

Wilson e Mikkelsen (1978) definiram que, em um deslizamento de solo, a magnitude, a velocidade e a distribuição dos deslocamentos são geralmente as mais importantes medidas requeridas. Igualmente importante em muitos problemas de deslizamento, contudo, são as medidas de pressão neutra dentro da área em movimento, particularmente em sistemas estratificados nos quais algum excesso de pressão hidrostática pode existir entre as camadas.

O inclinômetro é um instrumento que mede a variação da inclinação de um tubo colocado dentro de um furo de sondagem (Wilson e Mikkelsen, 1978). Desse modo, o inclinômetro permite a determinação da distribuição do movimento lateral em função da profundidade abaixo da superfície e em função do tempo. A aplicação dos inclinômetros a deslizamentos de solos e rochas é evidente; sendo, portanto, útil para definir superfícies de deslizamento ou zonas de movimento em relação a zonas estáveis.

Os piezômetros medem carga piezométrica nas cotas de instalação, sendo o piezômetro tipo Casagrande o mais simples e mais utilizado, composto de um tubo, o qual em sua extremidade inferior possui um elemento cerâmico ou de plástico poroso, podendo este elemento ser substituído por furos no próprio tubo do piezômetro. O tubo é colocado no solo até a profundidade onde se pretende obter a poropressão. (BRUNSDEN E PRIOR, 1984)

As encostas das serras brasileiras apresentam muitos taludes de solos coluviais tropicais. Os solos coluviais presentes nestes taludes se caracterizam por estarem em movimento lento e constante. Esse movimento tende a acelerar durante ou logo após precipitações intensas. Nesse capítulo, é apresentada uma descrição de casos históricos destes solos com seu problema de estabilidade que se beneficiaram ou poderiam ter se beneficiado do uso da instrumentação descrita.

1 ESTUDOS DE CASOS NA INGLATERRA E SUIÇA

Um dos casos estudados por Barton e Coles (1984) envolve o deslizamento de taludes ocorridos no sul da Inglaterra. O local era uma área residencial. A inclinação média do talude era de 11°. O perfil do local consistia em um leito de argila laminada, com camadas muito finas. No estrato superior existia um solo coluvial constituído de detritos oriundos do leito de argila. Sobre essa camada existia um aterro. O deslizamento estava restrito ao estrato superior do solo coluvial.

Foram instalados neste talude tubos guias de inclinômetro e piezômetros de tubo aberto. Foi utilizado um inclinômetro com servo-acelerômetro se movimentando em um tubo guia de alumínio. O deslocamento em relação à profundidade do perfil confirmou a profundidade do deslizamento. Os maiores movimentos do deslizamento ocorreram no inverno, possuíam uma velocidade de pico de 0,8 mm/dia e foram registrados durante um mês. A estabilização do talude foi alcançada com a instalação de drenos de trincheira.

Bonnard (1984) estudou um antigo escorregamento nos Pré-Alpes suíços. O primeiro objetivo do estudo foi determinar a distribuição espacial das velocidades do deslizamento e suas variações no tempo.

Foram executados dois furos na zona crítica do escorregamento, separando a parte elevada e lenta da inferior e rápida. Esses dois furos de 66 e 79 m de profundidade foram equipados com tubos guias de inclinômetro e por vários tubos de piezômetros. O primeiro furo encontrou o substrato rochoso a 55,8 m de profundidade, enquanto o segundo não encontrou o fundo da antiga massa de solo deslizada, contudo ele cruzou a atual superfície de ruptura.

As medições de inclinômetro foram feitas através de um protótipo de um sistema de aquisição de dados. A posição da superfície de ruptura ativa dentro da massa de solo foi identificada 3 semanas após a leitura inicial. No primeiro furo, a única superfície de ruptura estava situada aproximadamente a 43 m de profundidade, enquanto no segundo Furo, a superfície estava localizada entre 56 e 59 m. A velocidade média anual do movimento obtido durante a primavera de 1982 alcançou 23 cm/ano e 13 cm/ano nos dois furos respectivamente. É interessante observar que não apareceu nenhuma superfície secundária de ruptura. Por outro lado, a superfície de deslizamento ativa não corresponde, em ambos os furos, ao fundo do deslizamento histórico que era na superfície do leito de rocha. O azimute médio do movimento foi de 144° no primeiro furo e 91° no segundo, essa diferença confirma o espraiamento do deslizamento na parte inferior.

Os tubos guias embutidos na zona estável, cujos comprimentos alcançaram 23 m em ambos os furos, mostraram um desvio máximo da vertical de 4,2 e 4,3 mm respectivamente. Esses resultados realmente baixos confirmaram a confiabilidade das medições dos inclinômetros (Bonnard, 1984).

Em ambos os furos, Bonnard (1984) monitorou os níveis piezométricos utilizando o tubo guia do inclinômetro. No primeiro furo, o segmento de tubo guia de 3 m de extensão, colocado próximo ao contato entre a massa de solo deslizante e o leito de rocha, foi perfurado. Foi feito um grande número de pequenos furos de 2 mm de diâmetro alinhados irregularmente. O preenchimento ao longo do tubo, normalmente feito com calda de cimento, foi substituído por areia de granulometria adequada, isolada do estágio seguinte de calda de cimento por um selo de bentonita. Na massa de solo deslizante, duas zonas úmidas, detectadas durante a perfuração, foram equipadas com micropiezômetros, estes piezômetros eram tubos abertos com diâmetro

interno de 8 mm, colados aos tubos guia, e possuindo na sua parte inferior um filtro. O mesmo tratamento citado anteriormente foi dado ao preenchimento ao longo do tubo.

No segundo furo, um micropiezômetro também foi colocado durante a instalação do tubo guia. Mais tarde, quando o torpedo do inclinômetro não podia mais ser baixado através da zona da superfície de ruptura, o tubo foi detonado nesta profundidade com uma pequena carga explosiva, sendo o tubo guia então transformado em piezômetro de tubo aberto fornecendo os níveis de pressão neutra na superfície de ruptura.

Um registro contínuo do nível d'água dentro do tubo guia do primeiro furo foi armazenado por uma leitora automática de dados. Os resultados correspondentes mostraram pequena variação, apesar das severas mudanças nas condições climatológicas (Bonnard, 1984).

6.1 INSTRUMENTAÇÃO DE TALUDES NO BRASIL

Uma das instrumentações de taludes pioneiras no Brasil foi desenvolvida na década de 70, nos estudos da Rodovia dos Imigrantes, por Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976). Além desse exemplo, é apresentado outro caso histórico brasileiro de instrumentação de campo.

6.1.1 A encosta da Serrana do mar na rodovia do Imigrantes

O trabalho executado por Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976), num maciço da Rodovia dos Imigrantes em São Paulo, foi um dos primeiros taludes instrumentados com inclinômetros no Brasil. A área estudada faz parte das vertentes da Serra do Mar. No trecho analisado, predominam gnaisses, quartzo-biotita-xistos e migmatitos diversos. Os planos de xistosidade, de um modo geral, mergulham para dentro da encosta em ângulos elevados em relação à horizontal.

Os solos deste maciço são, em geral, pouco espessos, pois a dinâmica de evolução das encostas na região não favorece a conservação de grandes espessuras. A única exceção é constituída pelas massas de tálus que se acumulam ao longo destas encostas, em particular, no sopé das

mesmas, às vezes, com espessuras superiores a 10 m. As massas de tálus são depósitos com modo de formação semelhante aos solos coluviais, entretanto são constituídos predominantemente por detritos de rochas sãs e alteradas. O capeamento de solos é constituído basicamente por duas porções distintas: uma superficial coluvial e outra subjacente a esta, representada por solos residuais.

O solo coluvial é de extensão generalizada dentro das limitações de gradiente acima citadas, com espessura em torbo de 1 m, sendo constituído por uma argila silto-arenosa, muito porosa. Esse solo apresenta, com frequência, sinais de instabilidade, como fendas abertas, resultantes da ação de rastejo, pequenos escorregamentos e tombamento de árvores.

O solo de alteração subjacente ou residual, constituído por grãos de quartzo e feldspato alterado, com mica, é predominantemente arenoso, evidenciando um baixo grau de maturação, sendo definido como solo residual jovem. A espessura deste solo é variável, sendo função principalmente da inclinação do terreno, podendo inclusive estar ausente.

Abaixo do solo de alteração, situa-se o maciço rochoso. A ação do rastejo, sendo muito intensa nestas encostas, atua no próprio maciço rochoso, induzindo o aparecimento de uma zona de blocos deslocados de sua posição original. Esta zona de blocos se assemelha a um enrocamento. O maciço de rocha sã encontra-se abaixo desta zona de blocos.

Para a determinação dos deslocamentos destas encostas, Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976) optaram pela utilização de marcos superficiais de controle topográfico e fissurômetros. Estes instrumentos foram utilizados para a medição de deslocamentos e de abertura de fissuras na camada mais superficial das encostas. Já para a medição de deslocamentos em profundidade foram utilizados inclinômetros. Foram instalados também um pluviômetro e um pluviógrafo, para a medição da pluviosidade local, e piezômetros para medição de pressão neutra, com o objetivo de compreender o regime de percolação.

Conforme Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976), diversos fatores impediram que se obtivesse boa exatidão do uso de inclinômetros. Entre estes fatores citam-se:

- a) defeitos de fabricação dos tubos guias (irregularidades nas ranhuras ou faces internas, conexões defeituosas);
- b) defeitos de execução, principalmente na justaposição e rebiteagem dos tubos guias;
- c) umidade que tenha penetrado no cabo, no sensor ou no aparelho de leitura;
- d) presença de detritos no interior do tubo (areia, solo e eventualmente calda de cimento);
- e) sensibilidade às variações de temperatura, e outros.

Além disto, conforme os mesmos autores, na região da Serra do Mar as condições de operação desses aparelhos são especialmente difíceis, seja no tocante à umidade e pluviosidade intensas, seja no próprio acesso ao local.

Apesar das condições operacionais especialmente difíceis, caracterizadas por alta umidade, pluviosidade intensa e acesso complicado. Os inclinômetros foram utilizados para detectar e quantificar os deslocamentos em profundidade, monitorando os movimentos internos do solo e identificando potenciais deslizamentos. Em contrapartida, os piezômetros mediram as pressões neutras, fornecendo dados essenciais sobre o regime de percolação da água e suas influências na estabilidade da encosta. A combinação dessas medições possibilitou uma compreensão abrangente dos fatores geotécnicos afetando a área estudada.

6.1.2 Instrumentação da encosta do Soberbo

Os contínuos movimentos da Encosta do Soberbo, segundo Schilling (1993), no Bairro do Alto da Boa Vista, na Cidade do Rio de Janeiro, têm sido observados desde os escorregamentos catastróficos de 1966 e 1988. A região onde se encontra o escorregamento possui uma ocupação urbana diversificada, com residências do nível de favela até o de casas de alto padrão.

Em janeiro de 1966, após 4 dias de chuva, ocorreu uma grande avalanche. Essa avalanche principiou com a queda de um grande bloco de rocha que se deslocou por gravidade, passando por um muro de arrimo existente a montante da Estrada do Soberbo, destruindo duas casas,

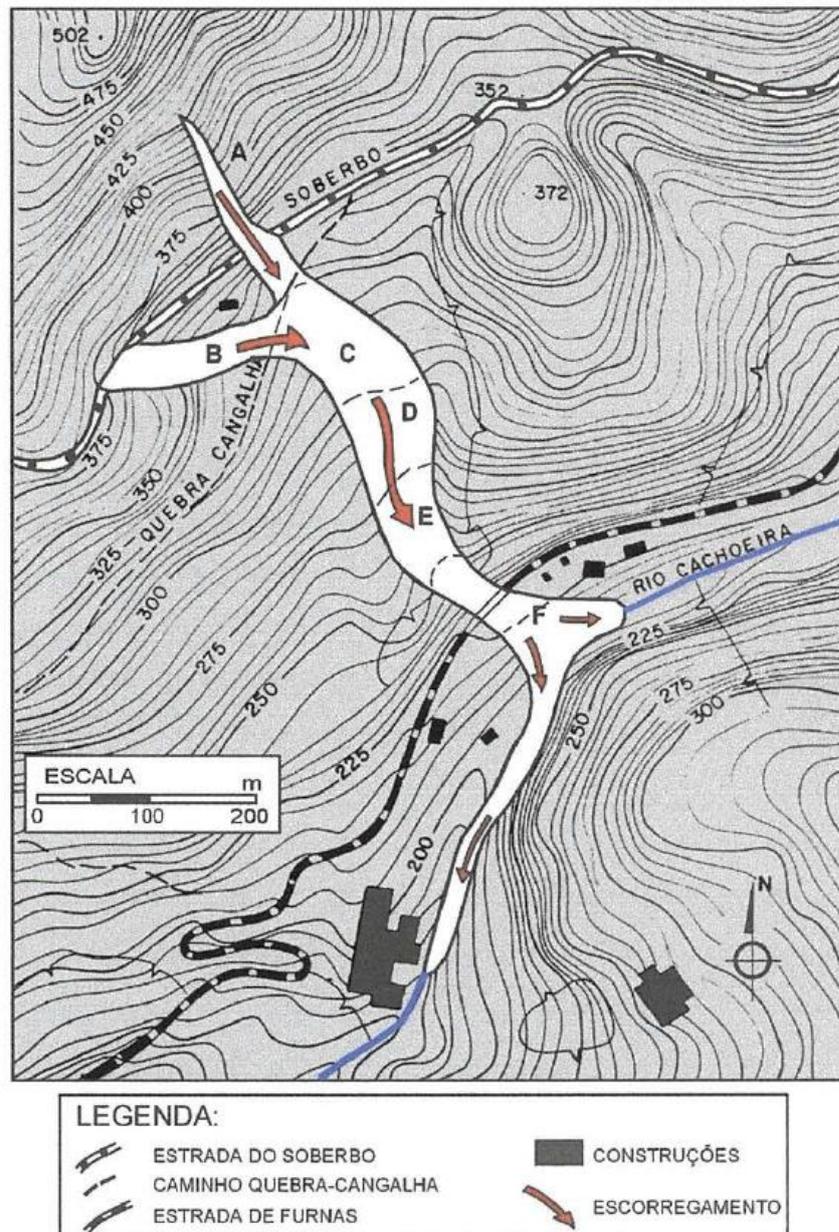
Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

atingindo a Estrada de Furnas e destruindo quase totalmente uma fábrica de papéis. O deslizamento provocou o represamento do Rio das Cachoeiras, que desce do Alto da Boa Vista, elevando seu nível original de 8 a 10m, formando um lago nos terrenos da fábrica. Dois dias depois, ocorreu um escorregamento numa zona, denominada B no estudo de Schilling (1993), quase atingindo a Estrada do Soberbo. Um caminho na região teve seu piso rebaixado cerca de 5 m em uma extensão de 50 m. Poços e jardins foram destruídos e árvores de grande porte chegaram a se deslocar por 20 m sem tombar. Pode-se perceber, portanto, a gravidade de um escorregamento de solo coluvial em uma área urbanizada.

Em fevereiro de 1988, o Rio de Janeiro foi atingido por chuvas de grandes proporções. Conforme Schilling (1993), a chuva acumulada medida próxima a Encosta do Soberbo, atingiu 449,4 mm, correspondente a um período de recorrência de aproximadamente 50 anos. O registro mensal de 968 mm correspondeu a 44 % da média anual.

Schilling (1993), para organizar seu estudo, dividiu a Encosta do Soberbo em 6 zonas, denominadas "A, B, C, D, E e F", em função de aspectos locais, topográficos e geológicos observados durante as sondagens. A encosta com suas respectivas zonas está apresentada na Figura 8. Devido a sua movimentação a encosta foi instrumentada. Nas zonas "C, D e E", ao longo da encosta instrumentada, existem residências simples localizadas na porção da encosta de maior movimentação.

Figura 8 - Mapa do Escorregamento da Encosta do Soberbo, com as zonas respectivas, ocorrido em 1996



(fonte: Pedrosa et al/ apresentado por Schilling, 1993)

Schilling (1993) definiu solo coluvial, no seu trabalho, como sendo a camada formada por solo e/ou fragmentos de rocha localizados no pé e ao longo da encosta transportados das cotas mais altas, pela ação da gravidade e das águas. Este processo de formação tem ação intensa das águas

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

superficiais e subterrâneas que escoam ao longo da encosta, e contribuem para a ocorrência da erosão e dos escorregamentos. Esses escorregamentos deslocam a massa de solo e de rocha para as cotas mais baixas da encosta.

O Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, em convênio com a Diretoria de Geotécnica da Prefeitura do Rio de Janeiro, realizou uma campanha de instrumentação realizada de 1990 a 1992. O trabalho da COPPE iniciou em 1987 com a instrumentação executada por Pedrosa *et al* citado por Schilling (1993). Essa primeira instrumentação foi destruída com as chuvas de fevereiro de 1988.

A encosta estudada, como já citado anteriormente, foi dividida em 6 zonas denominadas "A, B, C, D, E e F. Com base no levantamento topográfico de toda a área em movimento, após 1988, foi feita uma programação onde seriam estudadas não só a zona "B, instrumentada em 1987, mas toda a encosta a jusante da Estrada do Soberbo, iniciando em 2 pontos da estrada e chegando até o Rio Cachoeira. Essa encosta foi instrumentada com piezômetros, medidores de nível d'água, inclinômetros e pluviômetros.

Conforme Schilling (1993), através da experiência de Pedrosa *et al*, verificou-se que os piezômetros tipo Casagrande forneceram bons resultados. Como foram executados ensaios de permeabilidade *in situ*, descobriu-se que o coeficiente de condutividade hidráulica do solo local situa-se entre 10^{-2} e 10^{-3} cm/s, compatível com esse tipo de piezômetro. A escolha do piezômetro tipo Casagrande deveu-se, também, ao seu baixo custo. Devido à grande intensidade dos movimentos da encosta, boa parte dos piezômetros poderia se danificar antes que se iniciassem as obras de estabilização dos movimentos.

As profundidades de instalação dos piezômetros eram definidas concomitantemente com a execução de cada furo, a partir do momento que se dispunha dos resultados das sondagens, de modo que houvesse piezômetros instalados no maciço rochoso, na camada de rocha alterada, no contato solo-rocha e nas demais camadas de solo. Desta maneira foi possível obter o comportamento da pressão neutra e do fluxo subterrâneo ao longo de todo o perfil. As leituras dos piezômetros foram feitas diariamente.

Os medidores de nível d'água consistiam de tubos de PVC, perfurados e envoltos em geotêxtil, sem o selo característico dos piezômetros. O espaço existente entre o tubo e a parede do furo de sondagem era preenchido com areia lavada.

A profundidade máxima de instalação dos medidores de nível d'água foi cerca de 5 m, devido ao elevado nível do lençol freático em boa parte da encosta e, também, por terem sido aproveitados furos onde foram instalados piezômetros para se instalar medidores de nível d'água. As leituras desses instrumentos foram feitas diariamente.

Os tubos guias de inclinômetro foram instalados nas estações de instrumentação, de modo que se obtivessem leituras de piezometria próximas. Segundo Schilling (1993), foram utilizados tubos guias de inclinômetro de 75 mm de diâmetro, com ranhuras em duas direções perpendiculares, denominadas aqui "A e B", sendo que a direção "A" era coincidente tanto quanto possível com a direção do movimento da encosta.

A leitura dos movimentos foi feita através de um torpedo tipo Digitilt, fabricado pela Slope Indicator, que fornece leitura direta dos movimentos.

Os tubos guias foram instalados em furos de sondagem de 10 cm de diâmetro, perfurados 1,5 m em rocha firme, com profundidade já definida através da sondagem, de modo que se garantisse o não deslocamento da extremidade inferior do tubo. O espaço entre o tubo guia e a parede do furo de sondagem foi preenchido com areia lavada.

Segundo Schilling (1993), nas estações SIB, S2B, SIA e S2C, foram previstas inicialmente leituras de recalque através dos tubos guias, deixando-se uma folga de 5 mm entre dois segmentos de tubo guia consecutivos, dentro das conexões. Mais tarde, a ideia de se medir recalques foi descartada. Nessas estações também existiam medidores de nível d'água.

Os inclinômetros restantes, instalados nas estações SID e S2D, foram executados de maneira similar aos anteriores, diferindo em dois aspectos:

- a) Não houve espaço entre as hastes de 3m dos tubos guias;

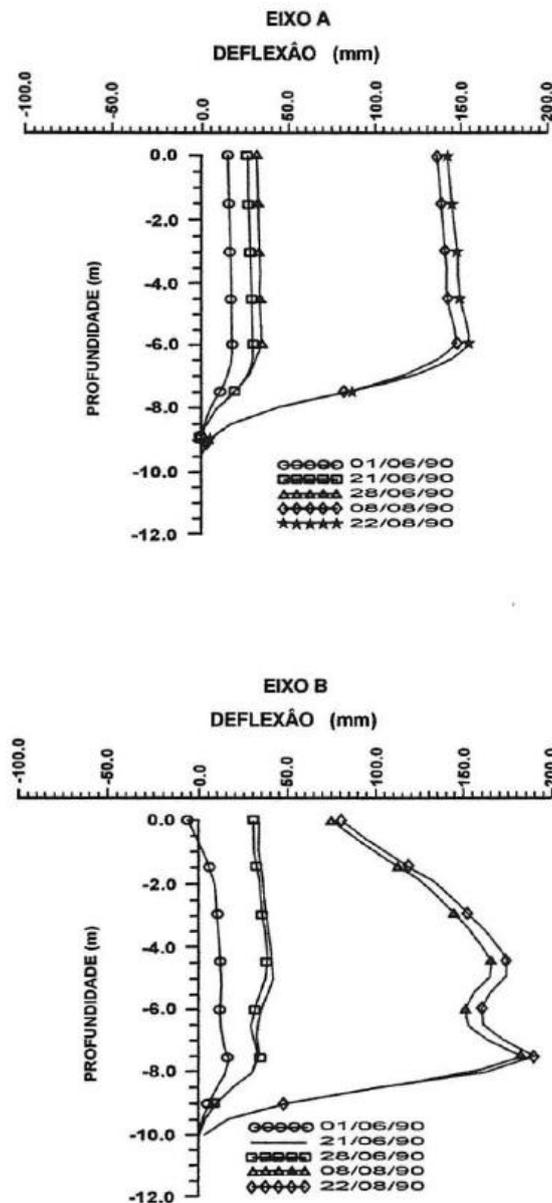
b) Na fixação das hastes de 3 m dos tubos guias não houve vedação, com o objetivo dos tubos guias serem aproveitados como medidores de nível d'água. Isto ocasionou o surgimento de solo dentro do tubo guia durante as medições, que até a data da última leitura não impediu a passagem do torpedo.

As medições do movimento superficial da Encosta do Soberbo foram realizadas através de controle topográfico de marcos superficiais instalados nas zonas "A, B e C". Para obtenção das leituras foram definidos pontos estáveis nas "margens" da encosta em movimento, onde se posicionava um teodolito e se mirava urna baliza colocada na "margem" oposta formando um alinhamento de direção aproximadamente perpendicular à direção do movimento da encosta. Com esta direção definida, eram realizadas leituras de cada marco superficial, através de uma mira deitada e nivelada.

Os piezômetros, os medidores de nível d'água, os tubos guias e os marcos superficiais instalados na Encosta do Soberbo por Schilling (1993) estão apresentados na Figura 9.

é diversa uma da outra, como esperado. Na direção do eixo "A", que é assumida como sendo a direção principal do movimento da encosta, a massa de solo se move em conjunto. Já na direção do eixo B, a massa de solo se move mais nas profundidades de 4 a 8 m, se mantendo mais lento o movimento da superfície.

Figura 10 -Deflexões inclinômétricas (deslocamento por profundidade)



(fonte: Schilling, 1993)

7 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DO CASO EM ESTUDO

A análise geotécnica e hidrológica da região serrana do estado do Rio de Janeiro revela uma série de fatores de risco críticos associados à estabilidade do solo e à ocorrência de deslizamentos de terra. A identificação desses fatores e a compreensão das deficiências nos sistemas de monitoramento existentes são fundamentais para aprimorar a gestão de riscos e a resposta a desastres. A proposta de implementação de inclinômetros e piezômetros surge como uma solução promissora para monitorar as condições do solo e da água subterrânea, oferecendo uma abordagem mais precisa e em tempo real para a previsão e mitigação de deslizamentos. Este estudo também examina os benefícios potenciais e as limitações desses instrumentos, comparando-os com a utilização em outras regiões afetadas por desastres semelhantes. Com base nessa análise, são formuladas recomendações para a formulação de políticas mais eficazes, visando uma gestão de desastres mais robusta e a proteção das comunidades vulneráveis na região serrana do Rio de Janeiro.

7.1 ANÁLISE GEOTÉCNICA E HIDRÓLOGICA DA REGIÃO SERRANA DO RJ

A região serrana do estado do Rio de Janeiro é caracterizada por uma topografia acidentada, com vales profundos e montanhas íngremes. Em geral, dentre os materiais que compõem uma encosta, areia e silte inconsolidados tendem a ser os menos estáveis em função do maior ângulo de inclinação que formam, isto é, da maior declividade que o terreno pode suportar sem que entre em colapso e desabe (PRESS et al., 2008; WICANDER et al., 2009).

Essa menor estabilidade provém do ângulo de atrito dos grãos de areia e silte ser menor ou igual ao de repouso, em decorrência da existência de forças de atrito entre eles. Entretanto, como se espera, conforme são acrescentados mais grãos ao terreno, mais inclinado este se torna, de tal modo que esta força não é suficiente para evitar um possível deslocamento (PRESS et al., 2008).

Esses fatores, combinados com a urbanização desordenada e a falta de infraestruturas adequadas de drenagem, aumentam consideravelmente o risco de deslizamentos.

Em relação ao conteúdo hídrico do material, a água contida no solo ou no interior de maciços tende a ser um dos agentes que mais contribuem no que concerne à deflagração de movimentos de massa. Isso ocorre em função da redução do efeito da sucção quando em ocasiões de sua saturação, promovendo uma redução da tensão efetiva, que favorece, assim, a movimentação de partículas, blocos ou planos de acamamento. Além disso, o peso adicional que o líquido acrescenta ao talude pode ser o suficiente para desestabilizá-lo (PRESS et al., 2008; WICANDER et al., 2009). De acordo com o exposto por Wicander et al. (2009), essa redução de resistência tende a ocorrer mais frequentemente em materiais de natureza argilosa, dada a grande capacidade retentiva de água e posterior compactação, o que faz com que as camadas associadas a tal material sejam, geralmente, as mais escorregadias. Porém, deve-se ressaltar que o conteúdo hídrico presente no terreno é um fator que frequentemente encontra-se combinado a outros, responsáveis pela maior ou menor instabilidade do talude, em razão das fases e caminhos percorridos pela água dentro do seu sistema de circulação no meio ambiente. Nesse sentido, a existência e a densidade da cobertura vegetal local, além da declividade e natureza dos materiais são alguns exemplos, dada a influência que exercem no ciclo hidrológico (BRAGA, 2005; TUCCI et al., 2006; PRESS et al., 2008; GERSCOVICH, 2012).

Outro fator, o uso e ocupação do solo, conforme salientam Highland et al. (2008) e Camargo (2015), a apropriação do relevo pelo ser humano e o avanço das várias formas de uso e ocupação do solo faz com que o fenômeno da movimentação de massa não somente seja acelerado, como potencializado em áreas já naturalmente susceptíveis, da mesma forma que pode promover uma desestabilização de taludes outrora estáveis. O histórico de ocupação e urbanização do Brasil mostra que, ao longo das décadas, inúmeras cidades consolidaram-se a partir de pequenos núcleos situados em locais caracterizados por uma geomorfologia favorável à deflagração de tais desastres, tais como áreas de elevada declividade e as faixas marginais de proteção de cursos d'água. A maioria dos municípios inseridos ao longo da Serra do Mar e de seus contrafortes, assim como aqueles localizados em outras regiões serranas do país exemplificam esse fato (WIGGERS, 2013).

7.2 IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES DE RISCO E DEFICIÊNCIAS NO MONITORAMENTO

Pinheiro et al. (2011), que analisaram o evento a partir dos acumulados de precipitação em estações meteorológicas do INMET convencionais (Teresópolis, Santa Maria Madalena e Teresópolis –Parque) e automáticas (Nova Friburgo e Cordeiro) da Região Serrana do Rio de Janeiro, entre os dias 12 e 14 de janeiro de 2011, observaram que o volume máximo foi registrado em Nova Friburgo, totalizando 209.6 mm ao longo do período, sendo 182.8 mm em apenas 24 horas (Pinheiro et al., 2011).

Durante os períodos mais chuvosos o número de movimentos de massa sofre um aumento, pois o solo sofre um aumento em sua massa, além da diminuição de sua sucção devido à elevação do grau de saturação. Guidicini & Nieble (1984), indicam que a elevação dos índices de movimentos de massa é causado pela quantidade de água no solo, pois ao se infiltrar, a água ocupa os vazios no solo, consequentemente exercendo pressão nos grãos (poropressão). Nesse contexto, o uso de piezômetros teria sido crucial, pois esses instrumentos medem a pressão da água nos poros do solo, permitindo a detecção precoce de elevações na poropressão. Com essa informação, seria possível antecipar os riscos de deslizamentos, implementar medidas preventivas e monitorar a estabilidade do solo de maneira mais eficaz durante períodos de chuvas intensas.

Segundo Nakazawa & Cerri (1990), por Petrópolis possuir grandes declividades no terreno, os movimentos mais frequentes são os de ocorrência rápida como os escorregamentos, principalmente os escorregamentos planares e as quedas de blocos. Sendo os mais comuns os escorregamentos, pela maioria das áreas possuem encostas com variação entre 10 e 45°.

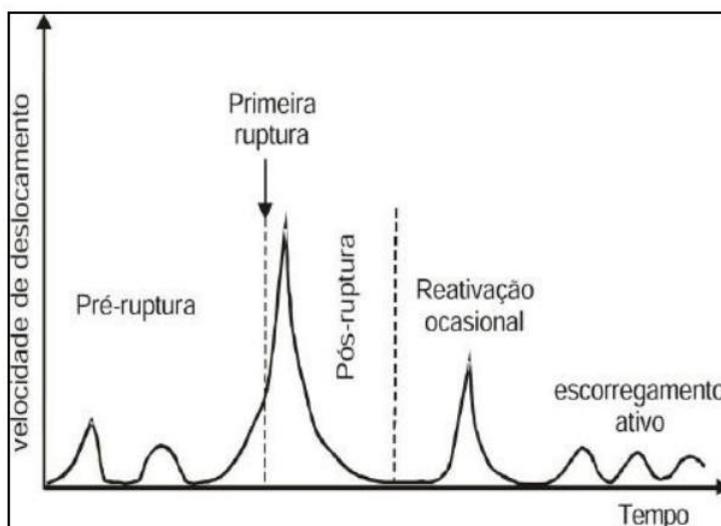
Segundo Leroueil et al. (1996), todos os tipos de movimento de massa passam por quatro estágios de desenvolvimento, pré-ruptura, ruptura, pós-ruptura e o estágio de reativação, que ocorrem em sequência (figura 1):

- I. Primeiro estágio, de pré-ruptura, qualquer modificação na área pode dar início ao processo de deformação, consequentemente iniciar superficialmente a ruptura da
-

massa. Alguns dos fatores que influenciam e acarretam esse processo são as modificações na resistência do material, tanto por processo natural como antrópico, rastejo ou ruptura contínua.

- II. Estágio de ruptura, a superfície de cisalhamento já está formada, o movimento de massa pode ocorrer a qualquer momento devido ao material ter desprendido do seu conjunto. É caracterizado pela fase mais importante do movimento, por ser o estágio que ocorre antes do movimento mais acelerado da massa.
- III. Estágio de pós-ruptura, vai desde o término de ruptura do material até o fim do seu deslocamento, onde a velocidade do movimento varia de acordo com o tipo de superfície e inclinação do terreno.
- IV. Estágio de reativação é o último do processo, relacionado ao início de um novo ciclo de movimento de massa, por conta de uma ruptura pré-existente.

Figura 11 - Movimentos de massa em função da velocidade do deslocamento e tempo



(fonte: Modificado de Leroueil et al.(1996))

No primeiro estágio, de pré-ruptura, qualquer modificação na área pode iniciar o processo de deformação e, conseqüentemente, a ruptura superficial da massa. Fatores como modificações na resistência do material, seja por processos naturais ou antrópicos, rastejo ou ruptura contínua,

influenciam e acarretam esse processo. Nesse estágio, o uso de inclinômetros seria extremamente útil, pois esses instrumentos são capazes de detectar mudanças sutis na inclinação do solo, indicando deformações iniciais que precedem a ruptura. Ao monitorar essas variações, é possível identificar precocemente áreas de risco e implementar medidas preventivas antes que ocorra um deslizamento significativo.

No estágio de ruptura, a superfície de cisalhamento já está formada, e o movimento de massa pode ocorrer a qualquer momento devido ao desprendimento do material. Esse é o estágio mais crítico do movimento, precedendo o movimento mais acelerado da massa. Embora o inclinômetro continue a ser relevante neste estágio, detectando movimentos mais rápidos e confirmando a iminência de um deslizamento, sua maior eficácia se dá na fase de pré-ruptura, onde a antecipação das mudanças permite uma intervenção mais eficaz. Nos estágios de pós-ruptura e reativação, que envolvem o deslocamento do material e o início de um novo ciclo de movimento de massa devido a rupturas pré-existentes, o inclinômetro também oferece dados valiosos sobre a dinâmica do terreno, ajudando a compreender os padrões de instabilidade e a planejar ações de mitigação a longo prazo.

7.3 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE INCLINÔMETROS E PIEZÔMETROS

Para a implementação eficaz de inclinômetros e piezômetros na região serrana do estado do Rio de Janeiro, é fundamental adotar uma abordagem sistemática que envolva etapas de planejamento, instalação, monitoramento e análise de dados. Inicialmente, a identificação de áreas críticas e de maior risco de deslizamentos deve ser realizada com base em estudos geotécnicos detalhados e históricos de desastres naturais. A seleção dos locais para a instalação dos instrumentos deve considerar fatores como a inclinação dos taludes, tipos de solo e proximidade a áreas habitadas. A instalação de inclinômetros permitirá a detecção de deslocamentos e deformações no solo, enquanto os piezômetros medirão as variações da pressão de água nos poros do solo, ambos fornecendo dados essenciais para a avaliação da estabilidade das encostas.

Um sistema de instrumentação na qual os instrumentos não se estendem abaixo da zona de movimentação, ou estão instalados em locais errados, ou ainda são inadequados, constitui-se um gasto de tempo e dinheiro. Perda de tempo pode significar que os tratamentos corretivos podem começar muito tarde para salvar um projeto (Wilson e Mikkelsen, 1978). Na instalação de tubos guias para inclinômetro, é altamente desejável que os tubos guias se estendam abaixo da zona de movimentação.

O baixo custo do instrumento não deve ser o principal fator na seleção. O instrumento mais acessível não resulta no custo total mínimo. Na avaliação econômica dos instrumentos alternativos, devem ser considerados os custos de procura, calibração, instalação, manutenção, monitoramento e processamento de dados (Dunnicliff, 1988).

Segundo Dunnicliff (1988), é responsabilidade dos usuários desenvolver um nível adequado de compreensão dos instrumentos que eles selecionam. Esses usuários frequentemente se beneficiam da discussão da aplicação desses instrumentos com engenheiros geotécnicos ou geólogos com os fabricantes antes de selecioná-los.

A seleção dos instrumentos deve reconhecer as limitações de pessoal disponível, tanto em quantidade quanto em experiência. Outras características da instrumentação, que devem ser avaliadas para a seleção, são uma boa conformação dos instrumentos, uma mínima interferência com a construção e mínima dificuldade de acesso ao local durante a instalação e leitura do instrumento (Dunnicliff, 1988).

Para a instrumentação de taludes, se o movimento ocorre ao longo de um plano de cisalhamento bem definido, tal como um plano de estratificação ou fraqueza, simples indicadores de superfície de ruptura poderão ser suficientes para determinar a profundidade do movimento. Se o movimento é grande e rápido, a precisão não é um requisito essencial e, portanto, inclinômetros relativamente expeditos podem ser suficientes. Quando a velocidade do movimento é pequena e a profundidade e distribuição não é conhecida, é requerida instrumentação mais precisa. Inclinômetros precisos, cuidadosamente instalados, são os melhores nessas instâncias, embora possam existir casos nos quais extensômetros ou medidores de deformação possam ser usados com vantagem (Wilson e Mikkelsen, 1978).

Dunnicliff (1988) sugere uma aproximação prática para selecionar a locação de instrumentos compreendendo 3 passos.:

Identificar zonas de particular importância, como zonas estruturalmente fracas, altamente carregadas ou com altas pressões neutras previstas, e localizar a instrumentação adequada.

Se não existirem tais zonas, ou se for necessário instalar instrumentos em outras posições, selecionar zonas representativas do comportamento global. Essas seções transversais são denominadas seções instrumentadas primárias e os instrumentos são localizados para fornecer dados compreensíveis. Devem existir pelo menos duas seções primárias.

Instalar instrumentação em seções secundárias para servir como índices comparativos de comportamento. Esses instrumentos devem ser simples e instalados nas seções primárias para permitir comparações.

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), é particularmente verdadeiro que instrumentos que registram pressão neutra são específicos para medir pressão em uma zona definida de fraqueza ou potencial instabilidade.

A locação deve geralmente ser selecionada de tal forma que os dados possam ser obtidos tão cedo quanto possível, durante o processo construtivo. Devido a inerente variação dos solos e rochas, é usualmente imprudente confiar em um único instrumento com indicador de desempenho (Dunnicliff, 1988).

Embora a locação dos instrumentos deva ser comumente mostrada no planejamento, a flexibilidade deve ser mantida de modo que as locações possam ser mudadas com novas informações que se tomaram disponíveis durante a construção. Desse modo devem ser requeridas especificações flexíveis de instalação de instrumentos (Dunnicliff, 1988).

Concluindo, a locação dos instrumentos requer um completo reconhecimento das condições geológicas e subsuperficiais do talude se quiserem ser obtidos dados significativos (Wilson e Mikkelsen, 1978).

7.4 BENEFÍCIOS POTENCIAIS E LIMITAÇÕES

O desastre de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro foi marcado por deslizamentos catastróficos que resultaram em perdas significativas de vidas e propriedades. A utilização de inclinômetros e piezômetros poderia ter desempenhado um papel crucial na mitigação dos impactos desse evento, oferecendo uma capacidade de monitoramento contínuo e em tempo real das condições de solo e água, fundamentais para a previsão e prevenção de desastres. Com esses instrumentos instalados, teria sido possível detectar os sinais precoces de instabilidade, como deslocamentos progressivos e aumento da pressão de água nos poros do solo, permitindo a ativação de alertas e a evacuação preventiva das áreas mais vulneráveis.

Os inclinômetros teriam possibilitado a medição precisa dos deslocamentos no solo ao longo do tempo, identificando movimentos que precedem os deslizamentos. Em 2011, o monitoramento contínuo dessas deformações teria fornecido dados críticos sobre a evolução da instabilidade nas encostas. Pequenos deslocamentos, muitas vezes imperceptíveis a olho nu, poderiam ter sido detectados, indicando a necessidade de ações preventivas. A análise dos dados de inclinômetros instalados em pontos estratégicos, como áreas urbanizadas e rodovias, poderia ter fornecido uma compreensão detalhada dos padrões de movimento e ajudado na identificação de áreas de risco iminente.

Os piezômetros, por outro lado, teriam monitorado as variações de pressão de água nos poros do solo, um fator crucial na ocorrência de deslizamentos. Durante o evento de 2011, as intensas chuvas saturaram os solos, aumentando a pressão intersticial e reduzindo a resistência ao cisalhamento. O monitoramento contínuo com piezômetros teria permitido a detecção do aumento crítico da pressão de água, fornecendo dados para a avaliação precisa da estabilidade dos taludes. Essa informação poderia ter sido usada para alertar as autoridades e comunidades locais sobre o risco iminente, possibilitando a implementação de medidas de mitigação, como a construção de sistemas de drenagem para reduzir a saturação do solo.

A integração dos dados coletados por inclinômetros e piezômetros em um sistema de alerta precoce teria melhorado consideravelmente a resposta ao desastre de 2011. A análise em tempo

real desses dados permitiria a tomada de decisões informadas e rápidas, mobilizando recursos de emergência e orientando evacuações. Além disso, a correlação dos dados de deslocamento e pressão de água com informações meteorológicas teria permitido prever o impacto das chuvas intensas na estabilidade dos solos, possibilitando uma preparação mais eficaz para eventos futuros. Em resumo, o uso desses instrumentos não só teria melhorado a resposta imediata ao desastre, mas também contribuído para a construção de uma infraestrutura de monitoramento resiliente, capaz de prevenir e mitigar desastres semelhantes no futuro.

No entanto, para que essa integração seja efetiva, é crucial enfrentar as limitações técnicas e logísticas associadas à implementação desses sistemas. A implementação de inclinômetros e piezômetros na região serrana do estado do Rio de Janeiro, embora benéfica para a mitigação de desastres, enfrenta diversas limitações técnicas e logísticas. Uma das principais barreiras é o custo elevado de instalação e manutenção desses instrumentos. Inclinômetros e piezômetros de alta precisão requerem investimentos significativos tanto para a aquisição dos equipamentos quanto para a realização das perfurações necessárias para sua instalação. Além disso, a manutenção regular desses sistemas é essencial para garantir a precisão dos dados coletados, o que implica em custos contínuos com mão de obra especializada e substituição de componentes desgastados.

Outro desafio significativo é a complexidade do terreno acidentado da região serrana, que dificulta tanto a instalação quanto a manutenção dos instrumentos. A topografia irregular, com encostas íngremes e acessos limitados, requer equipamentos especializados e técnicas de perfuração adequadas para terrenos instáveis. Além disso, a logística de transporte dos instrumentos e das equipes de instalação para locais remotos pode ser complicada e onerosa. O terreno acidentado também aumenta o risco de danos aos equipamentos durante eventos climáticos extremos, exigindo soluções robustas e protegidas contra condições adversas.

Um exemplo histórico relevante é a instrumentação desenvolvida na década de 70 na Rodovia dos Imigrantes, por Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976). Este trabalho foi um dos primeiros taludes instrumentados com inclinômetros no Brasil. O terreno estudado apresentava solos pouco espessos com exceção das massas de tálus no sopé das encostas. A área era caracterizada

por solos coluviais e residuais, frequentemente instáveis. Para medir os deslocamentos, foram utilizados marcos superficiais, fissurômetros, inclinômetros, pluviômetros e piezômetros. No entanto, diversos fatores, como defeitos nos tubos guias, umidade, detritos no interior dos tubos e sensibilidade à temperatura, comprometeram a exatidão das medições. As condições adversas de operação na Serra do Mar, incluindo umidade intensa e dificuldade de acesso, ilustram os desafios enfrentados na instrumentação de taludes em terrenos acidentados.

A operacionalização de um sistema de monitoramento contínuo em uma área extensa como a região serrana também implica em desafios logísticos significativos. A necessidade de instalar múltiplos pontos de monitoramento em diferentes profundidades e locais críticos requer um planejamento meticuloso e uma coordenação eficiente. A transmissão de dados em tempo real de locais remotos para um centro de monitoramento centralizado pode ser dificultada pela falta de infraestrutura de comunicação adequada, como redes de internet de alta velocidade e estável, exigindo soluções alternativas como redes de comunicação via satélite, que também apresentam altos custos.

Adicionalmente, a capacitação de pessoal local para operar, monitorar e interpretar os dados coletados por inclinômetros e piezômetros é uma exigência crucial. A formação de técnicos qualificados e a implementação de programas de treinamento contínuo são essenciais para garantir que os dados sejam corretamente analisados e que as ações apropriadas sejam tomadas em resposta aos alertas de risco. Isso implica em investimentos adicionais em educação e capacitação, bem como em sistemas de suporte que garantam a transferência de conhecimento e a sustentabilidade do programa de monitoramento a longo prazo. Portanto, embora a instalação de inclinômetros e piezômetros ofereça benefícios significativos para a mitigação de desastres, é essencial considerar e planejar cuidadosamente as limitações técnicas e logísticas associadas.

7.5 COMPARAÇÃO COM OUTRAS REGIÕES

A comparação entre a situação da região serrana do Rio de Janeiro e outras áreas onde a instrumentação de taludes foi eficaz na mitigação de desastres pode fornecer *insights* valiosos

sobre a importância e a aplicação prática desses instrumentos. A região dos Alpes da Suíça e a encosta do Soberbo, em Teresópolis, são exemplos notáveis de sucesso na utilização de inclinômetros e piezômetros para a prevenção de deslizamentos, oferecendo lições que podem ser aplicadas ao contexto mais amplo da região serrana do RJ.

A região dos Alpes da Suíça é caracterizada por encostas íngremes e condições climáticas adversas, como intensas chuvas e derretimento de neve, que aumentam o risco de deslizamentos. Na Suíça, a instrumentação de taludes com inclinômetros e piezômetros é parte integrante de um sistema abrangente de gerenciamento de riscos, que inclui a análise de dados em tempo real e a integração com sistemas de alerta precoce. A experiência suíça destaca a importância de uma abordagem integrada que combina tecnologia avançada com políticas de gestão de riscos e preparação comunitária, aspectos que poderiam ser implementados na região serrana do RJ para melhorar a resiliência frente aos deslizamentos.

No Brasil, a encosta do Soberbo em Teresópolis, também localizada na região serrana do RJ, enfrenta desafios semelhantes, com encostas íngremes e um regime pluviométrico intenso que frequentemente provoca deslizamentos. Após eventos desastrosos, a implementação de sistemas de monitoramento com inclinômetros e piezômetros na encosta do Soberbo tem sido fundamental para a mitigação de riscos. Esses instrumentos permitem a detecção precoce de movimentos de solo e variações na pressão da água, facilitando a implementação de medidas preventivas e a evacuação tempestiva das áreas de risco. A experiência da encosta do Soberbo demonstra que a aplicação de tecnologias avançadas de monitoramento é viável e eficaz em condições geotécnicas e climáticas semelhantes às encontradas na região serrana do RJ.

As experiências dos Alpes Suíços e da encosta do Soberbo mostram que, com um investimento adequado em tecnologia e infraestrutura, é possível criar um sistema eficaz de mitigação de desastres. A implementação de inclinômetros e piezômetros, aliada a um sistema de análise de dados em tempo real e a programas de capacitação e sensibilização da comunidade, poderia transformar a gestão de riscos na região serrana, reduzindo a vulnerabilidade a deslizamentos e aumentando a segurança das populações.

Em síntese, ao comparar essas experiências bem-sucedidas com a situação na região serrana, fica evidente a importância de um enfoque multifacetado e tecnicamente robusto para a gestão de riscos de deslizamentos. Adaptar as melhores práticas internacionais e nacionais às condições específicas da região pode proporcionar um caminho eficaz para a redução dos desastres naturais, promovendo a segurança e a resiliência das comunidades.

Estudos de caso relevantes evidenciam como técnicas de monitoramento preventivo têm sido aplicadas com sucesso para mitigar desastres naturais e aumentar a segurança das comunidades. Dois exemplos notáveis são a abordagem adotada na região alpina da Suíça e a experiência na encosta do Soberbo, em Teresópolis, que ilustram a eficácia da instrumentação em contextos de risco elevado.

Na Suíça, um estudo de caso significativo envolve o uso de inclinômetros e piezômetros para monitorar a estabilidade de encostas nas regiões alpinas. O projeto "Swiss Alert System" foi implementado após uma série de deslizamentos de terra que causaram graves danos e perda de vidas. O sistema combina dados de inclinômetros, que medem o deslocamento do solo, e piezômetros, que monitoram a pressão da água nos poros, para oferecer uma visão abrangente da estabilidade dos taludes. O monitoramento contínuo permite a detecção precoce de sinais de instabilidade e a emissão de alertas para comunidades e autoridades locais. A eficácia deste sistema foi demonstrada em vários eventos, onde os dados coletados permitiram evacuações preventivas e a implementação de medidas corretivas antes que os deslizamentos se agravassem, minimizando assim os impactos adversos.

No Brasil, a encosta do Soberbo em Teresópolis oferece outro exemplo relevante de aplicação bem-sucedida de técnicas de monitoramento preventivo. Após os desastres ocorridos em 2011, foi estabelecido um sistema de monitoramento com a instalação de inclinômetros e piezômetros em pontos críticos da encosta. Este sistema tem sido fundamental para a identificação precoce de movimentos de solo e variações na pressão da água, possibilitando intervenções rápidas e eficazes. A instalação de equipamentos permitiu a coleta de dados em tempo real, que são analisados para prever eventos de deslizamento e emitir alertas para as comunidades em risco. A experiência com o monitoramento da encosta do Soberbo demonstrou a importância da

instrumentação para a redução da vulnerabilidade e a melhoria da resposta a desastres na região serrana do RJ.

Esses estudos de caso sublinham a eficácia das técnicas de monitoramento preventivo na gestão de riscos de deslizamentos. Na Suíça, o uso integrado de inclinômetros e piezômetros tem sido fundamental para a proteção das comunidades dos Alpes contra desastres naturais, enquanto, no Brasil, a aplicação de tecnologias semelhantes na encosta do Soberbo mostrou ser uma estratégia eficaz para enfrentar os desafios específicos da região serrana. Ambos os casos destacam a importância de um sistema de monitoramento contínuo e de análise de dados para a tomada de decisões informadas e para a implementação de medidas de mitigação.

Em resumo, os estudos de caso da Suíça e da encosta do Soberbo evidenciam como a aplicação bem-sucedida de técnicas de monitoramento preventivo pode significativamente melhorar a gestão de riscos e a segurança das populações em áreas suscetíveis a deslizamentos. A integração de tecnologias avançadas com práticas de gestão de riscos e resposta a desastres é essencial para reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência das comunidades frente a eventos naturais adversos.

7.6 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS POLÍTICAS DE GESTÃO E DESASTRES

Para a adoção eficaz de políticas de monitoramento e prevenção de deslizamentos, é fundamental estabelecer diretrizes que integrem a capacitação de profissionais e a incorporação de tecnologias avançadas em planos de gestão de risco. Essas diretrizes devem abranger desde a instalação de sistemas de monitoramento até a formação contínua dos envolvidos na gestão e resposta a desastres.

Primeiramente, é crucial desenvolver um plano abrangente para a instalação e manutenção de sistemas de monitoramento. Este plano deve incluir a definição de áreas críticas para a instalação de inclinômetros e piezômetros, com base em análises geotécnicas e históricos de desastres. A seleção de tecnologias adequadas, bem como a implementação de equipamentos

com alta precisão, é essencial para garantir a eficácia do monitoramento. Além disso, a manutenção regular e a calibração dos instrumentos devem ser parte integrante do plano, assegurando a precisão contínua dos dados coletados e a confiabilidade dos sistemas de alerta.

Em segundo lugar, a capacitação de profissionais desempenha um papel fundamental na eficácia das políticas de monitoramento e prevenção. É necessário implementar programas de treinamento específicos para técnicos e engenheiros responsáveis pela operação dos sistemas de monitoramento. Esses programas devem abordar não apenas o funcionamento técnico dos inclinômetros e piezômetros, mas também a interpretação dos dados e a tomada de decisões com base nas informações obtidas. A formação contínua é essencial para garantir que os profissionais estejam atualizados com as últimas tecnologias e práticas de gestão de risco.

Além disso, é importante integrar as tecnologias de monitoramento em planos de gestão de risco de forma coordenada e estratégica. Os dados coletados pelos instrumentos de monitoramento devem ser incorporados a sistemas de gestão de risco e de alerta precoce, permitindo a análise integrada e a emissão de alertas em tempo real. A integração deve incluir a colaboração entre diferentes entidades, como órgãos governamentais, empresas de engenharia e comunidades locais, para assegurar que as informações sejam utilizadas de maneira eficaz e que as respostas aos riscos sejam bem coordenadas.

Outro aspecto crucial é a sensibilização e o engajamento da comunidade local. As políticas de monitoramento e prevenção devem incluir estratégias para informar e envolver os residentes das áreas de risco sobre os sinais de alerta e as medidas de segurança. A realização de campanhas educativas e a promoção de simulações de emergência são métodos eficazes para aumentar a conscientização e a preparação da comunidade. A participação ativa dos residentes pode melhorar a resposta a desastres e contribuir para a eficácia das políticas de monitoramento.

Por fim, a revisão e o aprimoramento contínuo das políticas de monitoramento e prevenção são essenciais para adaptar as estratégias às mudanças nas condições geológicas e climáticas. A realização de avaliações periódicas do sistema de monitoramento, a análise de eventos passados e a incorporação de novos avanços tecnológicos devem ser parte integrante do processo de gestão de risco. Isso garante que as políticas permaneçam eficazes e atualizadas, oferecendo

uma resposta robusta e adaptável frente aos desafios dinâmicos associados aos deslizamentos de terra.

Essas diretrizes fornecem uma base sólida para a adoção de políticas eficazes de monitoramento e prevenção, integrando tecnologia avançada, capacitação profissional e engajamento comunitário em um plano abrangente de gestão de risco.

A comunicação eficiente dos dados obtidos pelos instrumentos de monitoramento é crucial para a eficácia das estratégias de prevenção e resposta a desastres naturais. Inclínômetros e piezômetros fornecem informações detalhadas sobre a estabilidade dos taludes e a pressão da água nos poros do solo, dados que, se não comunicados de maneira clara e oportuna, podem perder seu valor em termos de prevenção. Portanto, é fundamental que as informações coletadas sejam transmitidas de forma rápida e compreensível para as autoridades responsáveis e para o público em geral, assegurando que medidas adequadas possam ser tomadas antes que um evento desastroso ocorra.

Para as autoridades, a comunicação eficiente dos dados deve incluir a integração das informações de monitoramento em sistemas de alerta precoce e plataformas de gestão de risco. As autoridades devem receber relatórios detalhados e atualizados sobre as condições de estabilidade dos taludes e as variações na pressão da água. Esses dados devem ser apresentados de forma acessível e interpretável, possibilitando a tomada de decisões informadas e a coordenação de ações de mitigação, como a evacuação de áreas de risco e a implementação de obras de contenção. A comunicação clara e oportuna também é essencial para a mobilização eficaz de recursos e para a preparação das equipes de resposta a emergências.

Além disso, a comunicação com o público é igualmente importante para garantir a segurança das comunidades vulneráveis. Informar a população sobre os sinais de alerta, as medidas de segurança e as ações a serem tomadas em caso de emergência pode melhorar significativamente a capacidade de resposta da comunidade e reduzir o impacto dos desastres. As informações devem ser divulgadas por meio de canais de comunicação acessíveis, como mídias sociais, rádios locais e sistemas de alerta comunitário. A clareza e a frequência das atualizações são

essenciais para manter a população bem-informada e preparada, permitindo que todos adotem comportamentos preventivos e se protegendo de possíveis deslizamentos.

Em resumo, a comunicação eficiente dos dados obtidos pelos instrumentos de monitoramento é vital para a gestão eficaz de riscos de deslizamentos. A integração dos dados com os sistemas de alerta e a divulgação clara para as autoridades e o público garantem uma resposta rápida e coordenada, contribuindo para a prevenção de desastres e a segurança das comunidades. A implementação de estratégias robustas de comunicação é, portanto, um componente essencial de qualquer plano de monitoramento e prevenção de desastres naturais.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise do desastre e da discussão de resultados, esse capítulo aborda as conclusões obtidas. Também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

8.1 CONCLUSÕES

Os desastres naturais, exacerbados por fenômenos climáticos intensos e o crescimento urbano desordenado, representam uma ameaça constante às comunidades, especialmente em regiões topograficamente vulneráveis, como a região serrana do Rio de Janeiro. O desastre de 2011 destaca a necessidade de desenvolver e implementar estratégias eficazes de mitigação para proteger vidas humanas e minimizar danos materiais. A análise e o monitoramento contínuo de encostas por meio de tecnologias avançadas são essenciais para prever e prevenir futuros deslizamentos.

A aplicação de inclinômetros e piezômetros se mostra promissora nesse contexto, fornecendo dados críticos sobre a estabilidade do solo e as pressões intersticiais. Os inclinômetros, ao medir variações na inclinação do terreno, podem detectar movimentos iniciais de deslizamento, permitindo a identificação precoce de áreas em risco. Simultaneamente, os piezômetros monitoram a pressão da água nos poros do solo, um fator importante que influencia diretamente a estabilidade das encostas. A integração desses dados oferece uma visão abrangente das condições geotécnicas, facilitando a tomada de decisões.

A implementação de tecnologias de monitoramento, aliada a um planejamento urbano responsável e políticas públicas eficazes, são fundamentais para mitigar os riscos associados a desastres naturais. Investir em pesquisa e desenvolvimento de soluções tecnológicas, bem como na educação e conscientização das comunidades sobre os riscos e as medidas de segurança, é crucial para construir um futuro mais resiliente e seguro. A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro deve servir como um alerta e um incentivo para a adoção de práticas preventivas

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

robustas e sustentáveis, garantindo que desastres dessa magnitude não se repitam. A mobilização de esforços coletivos, que envolvam governos, pesquisadores e a sociedade civil, são essenciais para enfrentar de forma eficaz os desafios impostos pelos desastres naturais e garantir a segurança e o bem-estar das comunidades vulneráveis.

8.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de que se amplifique a gama de conhecimento sobre instrumentação em instabilidade em taludes, a partir de observações feitas no decorrer deste trabalho, são propostas algumas sugestões para futuros estudos e projetos:

- a) Desenvolvimento de equipamento integrado para análise em tempo real que integre dados de inclinômetros e piezômetros, capaz de processar essas informações em tempo real e fornecer alertas precisos sobre a necessidade de evacuação da área. Este sistema deve utilizar algoritmos de inteligência artificial para analisar padrões de deslocamento e pressão da água nos poros do solo, correlacionando-os com históricos de deslizamentos e condições meteorológicas. Esse dispositivo ajudaria a identificar situações de risco iminente, permitindo ações preventivas rápidas e eficientes.
- b) Estudo comparativo de técnicas de mitigação de deslizamentos em encostas urbanizadas utilizando dados de inclinômetros e piezômetros. Este estudo pode avaliar a eficácia de diversas abordagens, como sistemas de drenagem, muros de contenção e revegetação, em termos de redução de movimentos de solo e estabilização das encostas. A pesquisa pode incluir a análise de casos históricos e a aplicação de modelos numéricos para simular os efeitos das intervenções.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. The role of topography in controlling throughflow generation. Em: **Earth surface processes and landforms**, p. 331-344
- AUGUSTO FILHO, O. (1992). **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: 1ª. Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (COBRAE). Rio de Janeiro. p. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGÍLI, J.C. (1998). **Estabilidade de taludes**. In: OLIVEIRA, A.M. dos S. e BRITO, S.N.A. de. (org). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE-CNPq- FAPESP. p.243-269.
- ASsmus, H. E. & Ferrari, A. L. (1978). **Hipótese sobre a causa do tectonismo Cenozóico na região sudeste do Brasil**. Projeto REMAC, 4, 75-88.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. (1996). **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, v. 2. 875 p.
- BRAGA, R. A. P.. **Avaliação dos instrumentos de políticas públicas na conservação integrada de florestas e águas, com estudo de caso na bacia do Corumbataí (SP)**. Tese (Doutorado em Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- BONNARD, C. (1984) Determination of Slow Landslide Activity by Multidisciplinary Measurement Techniques. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 1, 1983, Zurich. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, p. 619-637.
- Busch, A., & Amorim, S. (2011). **Tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011: buscando respostas**. Enap Casoteca de Gestão Pública.
- CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS, J. F.; SANTOS, R. D., 2001. **Os solos do Estado do Rio de Janeiro**. In: CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Rio de Janeiro: geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, solos, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geoambiental. Rio de Janeiro.
- CALDERANO FILHO, B. **Análise geoambiental de paisagens rurais montanhosas da Serra do Mar utilizando redes neurais artificiais. Subsídios a sustentabilidade ambiental de ecossistemas frágeis e fragmentados sob interferência antrópica**. 2012. 332 f. Tese

(Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CAMARGO, L. P.. **Análise integrada do meio físico dos ribeirões Braço Serafim e Máximo com ênfase nas áreas de fragilidade estrutural**, Luís Alves (SC). Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CERQUEIRA, Helio. **Critérios de projeto de instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração** [manuscrito]. Tese de Mestrado. 166f. 2017.

COLÂNGELO, A. C. (1995). **Os mecanismos de compensação e o equilíbrio de forças na dinâmica dos materiais de vertente**. Revista do Departamento de Geografia, USP, 9, p. 13-20.

COLLINS, B D.; ZNIDARCIC, M. **Stability analysis of rainfall induced landslides**. p. 362-372.

DANTAS, M. E. **Mapa geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro**. In: CPRM - Estudo Ambiental do Estado do Rio de Janeiro. Brasília (DF): Ministério de Minas e Energia. 2001.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A. I. M.; SILVA, C. R.; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J. F.; CALDERANO, S. B.; CARVALHO FILHO, A. **Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2001. Mapa. CD-ROM. 35 p.

DUNNICLIFF, J. (1988) **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. New Y orle, Wiley-Interscience Publication,. 497p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FAPERJ, 1980. **Anuário Estatístico do Estado do Rio de Janeiro**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 506 p.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. (1996). **Movimentos de massa: uma abordagem Geológico-Geomorfológica**. In: CUNHA, A. J. T. G. S. B.. Rio de Janeiro: Geomorfologia e Meio Ambiente. P. 123-194.

GAO, J. Identification of Topographic Settings Conducive to Landsliding from Nelson County. Em: **A. Earth Surface Processes and Landforms**. Virginia, U.S: 579-591p.

HANNA, T. H. Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. **Field Instrumentation in Geotechnical Engineering**. Clausthall, Ed. **Transtech**. (Transtech Series on Rock and Soil Mechanics), v. 10, 1985.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P.. **O manual de deslizamento: Um guia para a compreensão de deslizamentos**. Reston: US Geological Survey, 2008.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1976.

GUIDICINI, G. ; WOLLE, C. M.; MORUZZI, C. (1977). **Um Caso de Instrumentação de Maciços na Rodovia dos Imigrantes**. São Paulo, IPT, 1977. 21p. (Publicação n° 1070)
[Texto datilografado]

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. (1984). **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher. 196p.

INFANTI, N. J.; FORNASARI, N. F. (1998). **Processos de Dinâmica Superficial**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. & BRITO, S. N. A. de. (org). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE-CNPq- FAPESP. p. 131-152.

LACERDA, W. A. The behavior of colluvial slopes in a tropical environment". Em: EDS., S. (Ed.). **Landslides: Evaluation and Stabilization**. p.1315-1342.

LUMBRERAS, J. F; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F.; PALMEIRI, F.; CALDERANO, S.B.; BARUQUI, A. M.; PEREIRA, N.R.; NAIME, U.J.; LEMOS, A.L. **Macropedoambientes da Região Noroeste Fluminense - uma contribuição ao planejamento ambiental**. Documentos - n64. Embrapa Solos, 2004. 21 p.

Machado, William Gladstone de Freitas **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração** / W.G.F. Machado. -- São Paulo, 2007. 155 p.

MASSAD, F. (2010). **Obras de Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 216 pp.

MAFRA, N. M. C. **Esquema Metodológico para la Planificación de Usos del Suelo en Zonas Tropicales Húmedas: Aplicación a la Región Norte del Estado do Rio de Janeiro, Brasil**. Tese de Doutorado da Universidade de Valência. Faculdade de Farmácia, Unidade de Edafologia. Valência, Espanha, 1997.

MENDES, C. A. R. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pouso no Município de Bom Jardim - RJ**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

NÓBREGA, B. M. A. **Estudo de caso sobre a instrumentação geoambiental instalada no aterro sanitário no município de Campina Grande/PB**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H.. **Para entender a Terra**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

Aplicação de inclinômetros e piezômetros na mitigação de riscos: A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro

PINTO, C. S., 2002. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**, Oficina de Textos, 2a ed. São Paulo, SP, 355 p.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia Aplicada aos EIAs-RIMAs**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da, orgs. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 291-336.

SCHIT.LING, G. H. (1993). **Influências e Correlações entre Pluviosidade Pluviométrica e Creep dos Solos Residuais do Escorregamento da Encosta do Soberbo**. Rio de Janeiro, 1993. Tese de Mestrado, COPPE / UFRJ.

SECRETARIA DE AGRICULTURA E PECUÁRIA RJ, *Diagnóstico do Impacto das Chuvas nas Áreas Agrícolas da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro*, 2011.

SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N. & LIMA, J.M. **Relação entre Parâmetros de Chuva e Perdas de Solo e Determinação da Erodibilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro em Goiânia (GO)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 21:131-137, 1997.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 384p. 2006. Editora Oficina de Textos. São Paulo.

SOUZA PINTO, C.S. (2000). **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos.

SOS MATA ATLÂNTICA; INPE; ISA. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica**. 2001.

TERZAGUI, K. (1967). Mecanismos dos escorregamentos de terra. Publicado pela Revista da Escola Politécnica da USP. 41 p.

TOBIN, G. A.; MONTZ, B. E. **Natural hazards: explanation and integration**. New York: The Guilford Press, 1997.

VARGAS, M. (1972). **Mecânica dos Solos**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 509 pp.

VARNES, D. J. (1978). **Slope movement types and processes**. In S. KRIZEK (ed) Slope movement types and processes, Washington: pp. 11-33.

WILSON, S. D. et al. **Special Report 176: Landslides: Analysis and Control**. Washington, D.C.: p. 112-138

WOLLE, C. M. (1988). **Análise dos escorregamentos translacionais rasos numa região da Serra do Mar**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. USP, São Paulo, pp. 406.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. (1989). **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil**. Solos e Rochas: p.27-36.

WICANDER, R.; MONROE, J. S.. **Fundamentos de geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

WIGGERS, M. M.. **Zoneamento das áreas de risco a movimentos de massa no perímetro urbano do município de Caxias do Sul (RS)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ZÁRUBA, Q.; (ENGINEER), V. M. **Landslides and their control**.