

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

**Mariane Paula Bobermin**

**ESTUDO GEOTÉCNICO DE UM COLÚVIO DA RODOVIA  
RS/115: SIMULAÇÃO DE FLUXO D'ÁGUA**

Porto Alegre  
julho 2011

**MARIANE PAULA BOBERMIN**

**ESTUDO GEOTÉCNICO DE UM COLÚVIO DA RODOVIA  
RS/115: SIMULAÇÃO DE FLUXO D'ÁGUA**

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

**Orientador: Luiz Antônio Bressani**

Porto Alegre  
julho 2011

**MARIANE PAULA BOBERMIN**

**ESTUDO GEOTÉCNICO DE UM COLÚVIO DA RODOVIA  
RS/115: SIMULAÇÃO DE FLUXO D'ÁGUA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação.

Porto Alegre, julho de 2011

Prof. Luiz Antônio Bressani  
PhD pelo Imperial College of London  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Wai Ying Yuk Gehling (UFRGS)**  
PhD pela Universitat Politecnica de Catalunya

**Alexandre Nichel**  
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Marcelo Heidemann**  
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Udo e Elci, que sempre se preocuparam com a minha felicidade e proporcionaram as oportunidades para a conclusão deste Curso e deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Luiz Bressani, orientador deste trabalho, pela dedicação e tempo devotados a realização do mesmo, pelos conhecimentos passados durante todo esse percurso e pela tranquilidade demonstrada frente aos desafios enfrentados.

Agradeço ao “Seu” Alexandre, hoje Mestre em Engenharia Civil, pela oportunidade de trabalhar em conjunto neste trabalho, pela paciência em me ter como estagiária, pelos ensinamentos e pelo auxílio em todas as etapas deste trabalho.

Agradeço à professora Carin Schmitt pela disponibilidade e orientação visando sempre à melhoria e à concretização deste e de todos os trabalhos de graduação desenvolvidos na Engenharia Civil da UFRGS.

Agradeço à UFRGS pelas oportunidades e ferramentas disponibilizadas para a realização deste trabalho, inclusive ao pessoal do LAGEOtec pelo auxílio na elaboração dos ensaios.

Agradeço a todos da Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. por acreditarem em meu potencial, terem me proporcionado uma visão prática da Engenharia e disponibilizado o material necessário para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de faculdade e todas as pessoas que, de algum modo, colaboraram para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à minha família, em especial meus pais, Udo e Elci, pelo suporte que sempre me deram, pelo empenho de colocarem minha educação em primeiro lugar e por tudo que me ensinaram na vida.

Agradeço ao meu namorado e colega de Engenharia, Fabrício, pelo apoio na faculdade e na vida. Amo-te.

*Do what you can, with what you have, where you are.*

*Theodore Roosevelt*

## RESUMO

BOBERMIN, M. P. **Estudo geotécnico de um colúvio da rodovia RS/115**: simulação de fluxo d'água. 2011. 77 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho versa sobre o estudo de um colúvio localizado na RS-115, entre os km 23+400 e 23+600, e que, atualmente, serve de leito para a rodovia. Esta massa de solo se apresenta em constante processo de rastejo, sendo formada pela alteração da encosta proveniente de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e assente sobre o arenito da Formação Botucatu. Este tipo de talude está geralmente ligado a processos de instabilização, que normalmente são agravados pelos altos níveis pluviométricos que ocorrem na estação chuvosa do clima subtropical de altitude, no qual está inserido o colúvio. Aconteceram estudos na área por parte da empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda., no ano de 1998, e pelo engenheiro Alexandre Nichel, no ano de 2010, através da realização de sua dissertação. Nestes estudos ocorreram investigações geotécnicas que contribuíram para a execução desta pesquisa, bem como a sugestão de uma solução de estabilização dos movimentos do colúvio: implantação de drenos sub-horizontais e poço para coleta das águas. Neste trabalho foi ampliada a pesquisa sobre o solo coluvionar e foi analisada a resposta do colúvio quanto à implantação do sistema de drenagem, através do programa SEEP/W, que permite a análise do fluxo de água no terreno através do Método dos Elementos Finitos. Fizeram-se considerações sobre a anisotropia do solo em relação aos valores de condutividade hidráulica vertical e horizontal, e a ocorrência de camadas mais pedregulhosas entre a massa coluvionar. Os resultados das análises do programa SEEP/W foram transferidas para o programa SLOPE/W, que verificou a estabilidade do talude, através do Método do Equilíbrio Limite. Com isso concluiu-se que a presença de camadas pedregulhosas na massa coluvionar facilita a drenagem e portanto apresentou menores níveis d'água e pressões. Já a anisotropia quanto à condutividade hidráulica influencia na resposta da encosta apresentando maiores níveis d'água no terreno e maiores pressões, porém que não foram significativas ao caso estudado. Ao final pode-se afirmar que o sistema de drenagem sugerido por Nichel (2011) respondeu de maneira positivas às propostas sugeridas neste trabalho, apresentando fatores de segurança quanto a estabilidade maiores que 1,3.

Palavras-chave: colúvio, análise de fluxo d'água, condutividade hidráulica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento da pesquisa .....	17
Figura 2: processo de formação de um colúvio .....	20
Figura 3: gráfico tensão-deformação de um solo que apresenta o estado de pico (b) e de um que não apresenta (a) .....	22
Figura 4: envoltórias de resistência de pico e do estado crítico .....	22
Figura 5: curvas tensão-deformação indicando pico, estado crítico e residual .....	23
Figura 6: processo de deslocamento de massa de solo .....	26
Figura 7: ensaio de cisalhamento direto de um colúvio .....	27
Figura 8: mapa morfológico do Rio Grande do Sul .....	31
Figura 9: localização da Bacia do Paraná .....	33
Figura 10: unidades de vegetação do Rio Grande do Sul .....	34
Figura 11: mapa climático do Rio Grande do Sul .....	36
Figura 12: mapa da distribuição das chuvas no Rio Grande do Sul .....	37
Figura 13: desníveis e mudança do traçado da rodovia devido aos deslocamentos .....	38
Figura 14: medidas amenizadoras dos efeitos na rodovia: à esquerda, adição de sucessivas camadas de concreto asfáltico e à direita, deslocamento da pista ....	39
Figura 15: desnível devido aos movimentos rotacionais e a presença de blocos basálticos de diferentes dimensões .....	39
Figura 16: lençol freático aflorante .....	39
Figura 17: foto aérea da área onde se encontra o colúvio e suas delimitações .....	40
Figura 18: perfil longitudinal do colúvio e localização das sondagens .....	41
Figura 19: planta baixa da situação da área em 1998 .....	43
Figura 20: localização dos equipamentos e das sondagens .....	46
Figura 21: perfil geológico da encosta em estudo .....	47
Figura 22 resultante dos deslocamentos medidos nos dois eixos do inclinômetro IN 01	48
Figura 23: dados obtidos das leituras realizadas pelo sistema automático de aquisição de dados de poro-pressão instalado no piezômetro PZ 01 .....	50
Figura 24: dados de pluviosidade acumulada em 24 horas .....	50
Figura 25: localização da sede do Corpo de Bombeiros do município de Três Coroas em relação ao colúvio em estudo .....	51
Figura 26: local e procedimento da coleta de amostras indeformadas .....	52
Figura 27: curvas granulométricas .....	53
Figura 28: gráfico utilizado na definição do limite de liquidez .....	54
Figura 29: envoltória de resistência ao cisalhamento .....	56



Figura 30: gráfico do deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante para os diferentes níveis de tensões aplicados .....	57
Figura 31: gráfico do deslocamento horizontal <i>versus</i> deslocamento vertical para os diferentes níveis de tensões aplicados .....	57
Figura 32: resultado gráfico da retroanálise realizada .....	59
Figura 33: retroanálise resultante do rebaixamento do nível de água no terreno .....	60
Figura 34: esquema da medida de estabilização sugerida .....	61
Figura 35: testemunho de sondagem .....	61
Figura 36: seção tipo 1 – solo homogêneo .....	63
Figura 37: seção tipo 2 – estratos definidos a partir dos ensaios SPT .....	63
Figura 38: seção tipo 3 – estratos inferidos .....	63
Figura 39: detalhe do sistema de drenagem .....	64
Figura 40: pressão de água no colúvio seção tipo 1 e $kh/kv = 1$ .....	67
Figura 41: pressão de água no colúvio seção tipo 3 e $kh/kv = 1$ .....	68
Figura 42: pressão de água no colúvio seção tipo 1 $kh/kv = 40$ .....	69
Figura 43: resultado da análise de estabilidade para o solo homogêneo isotrópico .....	71
Figura 44: resultado da análise de estabilidade para o solo homogêneo anisotrópico $kh/kv = 40$ .....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: parâmetros de resistência averiguados nos diferentes estados .....	24
Quadro 2: causas de movimentos de massas .....	28
Quadro 3: data das realizações das leituras nos inclinômetros .....	44
Quadro 4: porcentagem média dos materiais encontrados nas amostras .....	54
Quadro 5: valores obtidos com o ensaio de limites de Atterberg .....	55
Quadro 6: índice de vazios e peso específico obtidos das amostras ensaiadas .....	56
Quadro 7: parâmetros estimados dos solos locais a partir de retroanálise parametrizada pelo uso dos parâmetros obtidos no ensaio <i>Ring Shear</i> para a camada argilosa da base do colúvio .....	59
Quadro 8: coeficientes de permeabilidade adotados .....	65
Quadro 9: parâmetro utilizados na análise de estabilidade .....	71

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	15
2.3 PRESSUPOSTO .....	15
2.4 DELIMITAÇÕES .....	16
2.5 LIMITAÇÕES .....	16
2.6 DELINEAMENTO .....	16
<b>3 COLÚVIOS</b> .....	18
3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS .....	18
3.2 FORMAÇÃO .....	19
<b>4 COMPORTAMENTO DE MASSAS COLUVIONARES</b> .....	21
4.1 ESTADO CRÍTICO .....	21
4.2 ESTADO RESIDUAL .....	23
4.3 PERMEABILIDADE .....	24
4.4 INSTABILIDADE DE ENCOSTAS .....	25
<b>5 ASPECTOS REGIONAIS</b> .....	30
5.1 GEOLOGIA .....	30
5.2 CLIMA E VEGETAÇÃO .....	33
<b>6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COLÚVIO</b> .....	38
6.1 HISTÓRICO DE ESTUDOS .....	40
6.2 INTERVENÇÕES .....	44
6.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS .....	45
6.3.1 Ensaios SPT .....	45
6.3.2 Inclinômetros .....	47
6.3.3 Piezômetros .....	49
<b>7 ENSAIOS COMPLEMENTARES</b> .....	52
7.1 GRANULOMETRIA .....	53
7.2 LIMITES DE ATTERBERG .....	54
7.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO .....	55
<b>8 ANÁLISES COMPUTACIONAIS</b> .....	58
8.1 ANÁLISE DA PROPOSTA DE ESTABILIZAÇÃO .....	58
8.2 ANÁLISE DO REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA .....	64

8.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE .....	70
<b>9 CONCLUSÃO</b> .....	73
REFERÊNCIAS .....	74



## 1 INTRODUÇÃO

Os solos são classificados em dois grandes grupos: residuais e transportados. Solos residuais resultam da decomposição da rocha matriz, permanecem no mesmo local e guardam, de certa forma, a estrutura da rocha da qual foi originado. Já os solos transportados são aqueles que foram levados ao seu local atual por algum agente de transporte e, portanto, as características desses solos são função do agente transportador (PINTO, 2006).

Os solos coluvionares são solos transportados formados pela ação da gravidade e não guardam qualquer estrutura da rocha de origem. Um exemplo desse tipo de solo são os escorregamentos das Escarpas da Serra do Mar, onde ocorrem massas de materiais muito diversos e sujeitos a movimentações de rastejo (LARA et al., 1997; PINTO, 2006). Este tipo de solo abrange grande parte do território brasileiro, aparecendo com frequência em situações de instabilidade de taludes. Apesar disso, pouco se sabe sobre as características e propriedades geotécnicas destes solos (SILVA et al., 2005).

Este trabalho trata do estudo de um colúvio em particular, localizado entre o km 23+400 e 23+600 da RS-115, que liga o município de Taquara ao de Gramado, no estado do Rio Grande do Sul. Essa massa de solo provém da alteração de dois tipos distintos de litologias: rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu.

Esse colúvio foi alvo de estudos pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. no ano de 1998. Nas análises realizadas, constatou-se que qualquer intervenção de contenção definitiva do talude seria extremamente onerosa, inviabilizando-a. Foi então aconselhada a implantação de um projeto de drenagem e de dispositivos de monitoramento como marcos de deslocamento superficiais e inclinômetros para posteriormente se estudar com mais clareza o caso. O projeto de drenagem não se concretizou, porém alguns dispositivos de monitoramento foram instalados, apesar de não serem acompanhados plenamente.

A avaliação geológica superficial de campo da época mostrou que o colúvio está limitado à montante por uma escarpa arenítica (sudeste) e um depósito de tálus composto essencialmente por blocos de basalto (nordeste). Sendo que tálus nada mais é do que um caso específico de solo coluvionar, porém este aparece com maior quantidade de blocos e matacões e sua

localização quase sempre é no sopé e nos talvegues das encostas (SOARES; POLITANO, 1997). Nas demais direções, o colúvio não apresenta confinamento, possibilitando a dispersão de materiais em forma de leque.

Desta forma, o depósito de solo coluvionar representa riscos à rodovia e seus arredores quanto a sua segurança, já que a encosta encontra-se em processo de rastejo há muitos anos. Esses movimentos de rastejo aceleraram com a construção do aterro rodoviário, que passou a exercer papel de sobrecarga e de barragem, bloqueando a passagem da água, tornando maiores as poro-pressões, fator de grande importância no processo de rupturas em taludes.

Esta encosta foi, também, estudada na dissertação **Diagnóstico, Monitoramento e Concepção de Medidas de Estabilização do Colúvio do km 23+400 da rodovia RS/115** (NICHEL, 2011), onde o autor, além de apresentar detalhes sobre a geologia e a dinâmica do movimento do colúvio, também cria uma concepção de estabilização deste material, que consiste na implantação de um poço para a coleta das águas de drenos sub-horizontais e posterior deságue das mesmas à jusante do colúvio.

Neste trabalho, foram realizados ensaios de laboratório no solo do colúvio e feitas considerações sobre a geometria da encosta para a investigação da resposta do colúvio ao emprego deste sistema de estabilização, considerando a anisotropia do solo, especialmente no que concerne ao coeficiente de permeabilidade, e a existência de camadas pedregulhosas inseridas no corpo da massa coluvionar. Esta investigação foi realizada através do emprego do programa SEEP/W, utilizado comumente na prática da Engenharia, que faz uso do Método dos Elementos Finitos para a determinação do fluxo de água no material. Determinado o comportamento do fluxo de água no material com a aplicação do sistema de drenagem, foi realizada a análise de estabilidade da encosta com o uso do programa SLOPE/W através da Teoria do Equilíbrio Limite.

A estrutura deste trabalho está, então, disposta em capítulos, sendo que no capítulo 1 se apresenta uma introdução aos elementos deste estudo, que é complementada pelo capítulo 2, onde se observam as variantes que envolvem a metodologia de pesquisa adotada.

No capítulo 3 temos as definições e características atribuídas a estes tipos de solos pela literatura, bem como seu mecanismo de formação. Já o capítulo 4 mostra como o

comportamento deste tipo de solo pode variar devido à situação geomecânica em que se encontra e as variáveis que levam a instabilidade dessas massas coluvionares.

O capítulo 5 aborda os aspectos regionais em que está inserido o colúvio dando ênfase à geologia, ao clima e à vegetação como fatores de maior importância ao estudo desse tipo de solo.

No capítulo 6 são apresentados os estudos realizados anteriormente no colúvio, as conclusões a que se chegaram à época e as intervenções implantadas na área. No capítulo 7 mostram-se as novas investigações geotécnicas e os dados obtidos através destas.

O capítulo 8 apresenta as análises numéricas, fruto dos dados obtidos com as investigações geotécnicas, e, finalizando, o capítulo 9 faz a apresentação dos resultados e conclusões alcançados através deste trabalho.



## 2 MÉTODO DE PESQUISA

A realização deste trabalho é uma complementação à dissertação **Diagnóstico, Monitoramento e Concepção de Medidas de Estabilização do Colúvio do km 23+400 da rodovia RS/115**, apresentada em abril de 2011 para a obtenção do título em Mestre em Engenharia, por Alexandre Nichel, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS em Porto Alegre. Neste capítulo, será apresentada a questão de pesquisa que se pretende responder com este trabalho, os objetivos, pressupostos, delimitações e limitações do mesmo e, também, o delineamento das tarefas concretizadas.

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a resposta do colúvio ao sistema de drenagem projetado se considerarmos o solo como anisotrópico?

### 2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho consiste na verificação do nível d'água, e das pressões por ele exercidas, devido à anisotropia da condutividade hidráulica horizontal e vertical e da presença de camadas pedregulhosas no corpo do colúvio, bem como a determinação da influência destes resultados no projeto de estabilização sugerido.

### 2.3 PRESSUPOSTO

Este trabalho tem por pressuposto que:

- a) os ensaios de laboratório realizados são adequados para a obtenção dos parâmetros do solo;
- b) os resultados dos programas empregados nas análises representam fielmente o comportamento do talude.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

Este trabalho delimita-se ao estudo de um colúvio localizado no Rio Grande do Sul na RS-115, entre os km 23+400 m e 23+600 m.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) análise de apenas uma seção da massa coluvionar, considerada mais representativa, na aplicação dos programas computacionais;
- b) utilização de parâmetros inferidos nas análises computacionais, baseados em valores obtidos da literatura sobre o assunto.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas expostas a seguir, que estão representadas no desenho esquemático da figura 1, e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) pesquisa documental;
- c) instalação de equipamentos;
- d) coleta de amostras;
- e) estudo do programa computacional;
- f) análises em laboratório;
- g) coleta de dados;
- h) análise computacional;
- i) conclusões.

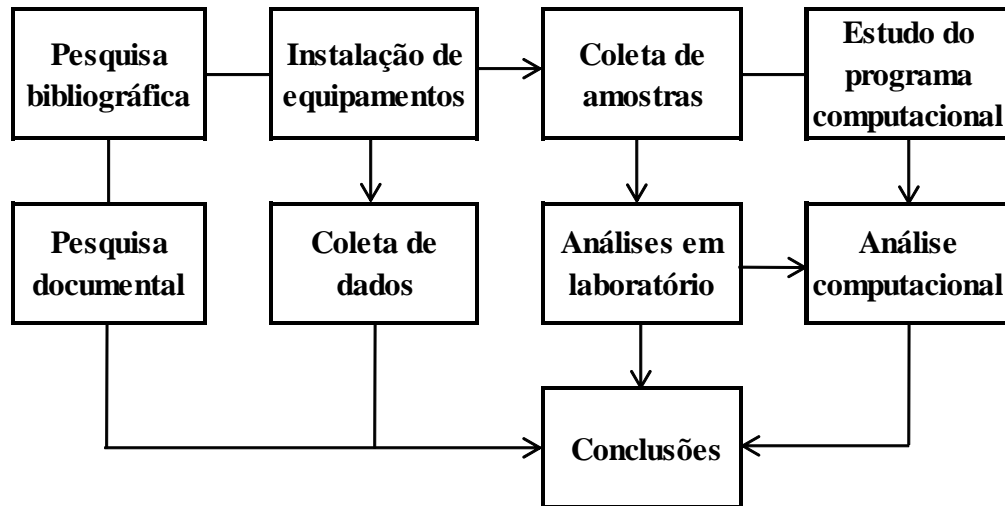


Figura 1: delineamento da pesquisa

A pesquisa bibliográfica foi baseada em livros e publicações sobre o tema, abordaram-se assuntos como a caracterização desse tipo de talude, a influência dos parâmetros do solo em seu comportamento e o estudo da região em que se encontra. A pesquisa documental consistiu na investigação do histórico de estudos realizados na área pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, no ano de 1998, e nos resultados apresentados na dissertação de Nichel (2011).

A etapa de instalação de equipamentos e de coleta de dados se refere ao trabalho realizado em conjunto com o engenheiro Alexandre Nichel para o detalhamento da seção utilizada nas análises computacionais. Foram instalados e monitorados inclinômetros e piezômetros na área.

Posteriormente, amostras indeformadas de solo foram coletadas com o objetivo de complementar os resultados e aprimorar as análises computacionais. Concomitantemente, um estudo sobre a utilização dos programas SEEP/W e SLOPE/W, empregados na avaliação do problema, foi realizado. Foram, então, definidos os parâmetros de representação do comportamento do talude e a seção típica a ser analisada, permitindo assim, a realização das análises numéricas e a obtenção das conclusões deste trabalho.

### 3 COLÚVIOS

Neste capítulo é feita uma introdução ao assunto tratado por esta pesquisa, colúvios, exibindo uma visão geral sobre a formação desse tipo de solo e suas características.

#### 3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

O termo colúvio, genericamente, é usado para caracterizar depósitos de solos predominantemente originados pela ação da gravidade. Desta maneira, essa definição, engloba um vasto leque de materiais com características normalmente muito distintas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995; SILVA et al., 2005).

Segundo Brand (1982), um colúvio pode ser derivado de qualquer rocha e composto desde material grosseiro com predominância de blocos até material fino. Já Lacerda e Sandroni (1985), de maneira geral, afirmam que os colúvios podem ser descritos como materiais com grande variabilidade de textura, comportamento mecânico dúctil-plástico sem pico definido e com rede de fluxo bem estabelecida nos períodos chuvosos.

Na definição que Lara et al. (1997) apresentam, colúvios são solos que sofreram um processo de transporte ao longo da encosta e não mostram qualquer estrutura da rocha de origem, podendo apresentar alguns blocos e/ou fragmentos de rocha imersos numa matriz de solo, porém a matriz é sempre predominante em todo o depósito.

Sendo assim, estes tipos de solos apresentam grande variabilidade em suas características, implicando na ausência de uma tendência única de propriedades geotécnicas que englobe todos os solos coluvionares em seu sentido genérico (SILVA et al., 2005).

Até mesmo a distinção exata, em campo, do início da camada coluvionar é por si só uma tarefa difícil, pois devido à ação da gravidade essa camada frequentemente ocorre sobre solo residual, carreando-o e depositando-o a pequenas distâncias, sendo notável a semelhança entre ambos. As características físicas principais que o solo coluvionar apresenta para a sua distinção são o local de deposição, quase sempre no sopé e a meia encosta, e o aspecto **poroso** (SOARES; POLITANO, 1997).

Segundo Lacerda (2002), o índice de vazios dos colúvios, que lhe garante este aspecto **poroso**, é nitidamente superior ao do solo residual subjacente. A explicação para este fato é que, além do empolamento devido ao escorregamento que lhe deu origem, o solo coluvionar é lixiviado pelo fluxo d'água infiltrado pela chuva, carreando minerais solúveis e partículas mais finas para zonas inferiores.

Assim, o tamanho dos materiais, e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica, tende a diminuir a jusante do talude. É comum que a água possa mais facilmente entrar a montante do talude do que sair a jusante do mesmo. Outra característica dos colúvios é a formação de zonas de condutividade hidráulica distintas dentro das camadas de colúvio ou entre as mesmas devido ao adensamento de sucessivas camadas que possam ter sido depositadas em diferentes épocas (DEERE; PATTON, 1971).

### 3.2 FORMAÇÃO

Na região nordeste do Rio Grande do Sul, que possui uma topografia bastante acidentada, a formação de colúvios é bastante comum. Conforme Perazollo (2003), pode-se, de uma forma bastante abrangente, dividir estas formações em dois grandes grupos, sendo eles colúvios sobre:

- a) solo residual, ocorrendo principalmente nas encostas menos íngremes;
- b) rocha, encontrados nas encostas mais íngremes.

A formação dos colúvios, conforme Lacerda (2002), pode ser relacionada a dois processos erosivos atuando continuamente e intermitentemente. O primeiro processo é a erosão superficial, ou laminar, em que a água, ao escorrer pela superfície da encosta, carrega partículas de solo para as cotas mais baixas. Este solo é depositado suavemente e acrescenta poucos centímetros à camada superficial da encosta a cada evento. O outro processo é mais violento, pois ocorre quando uma porção do solo residual escorrega e se deposita sobre a própria encosta. Esta nova capa de colúvio pode acrescentar vários metros de uma só vez aos depósitos de encostas. Na figura 2 é ilustrado, de forma geral, o processo de formação dos solos coluvionares.

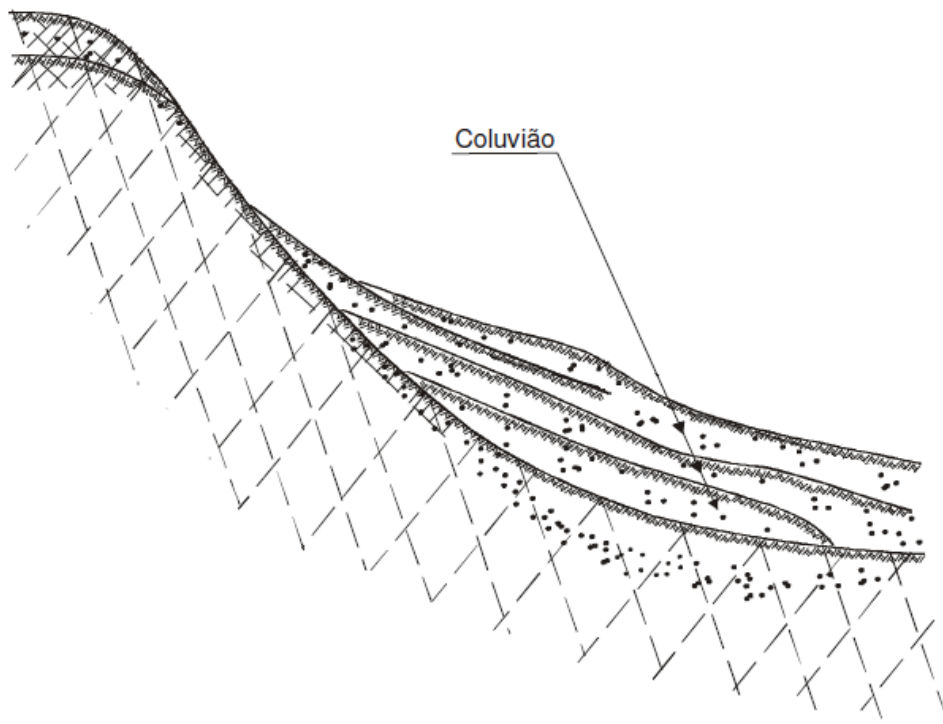


Figura 2: processo de formação de um colúvio  
(adaptado de DEERE; PATTON, 1971)

Este processo de formação é contínuo e deve-se admitir que não existe uma encosta inteiramente estável ao longo do tempo. A maior parte das encostas está submetida aos efeitos do tempo, com um risco de ruptura variável, porém jamais nulo (CARREGÃ; BALZAN, 1997).

## 4 COMPORTAMENTO DE MASSAS COLUVIONARES

Neste capítulo são expostos o comportamento típico dos solos coluvionares e alguns conceitos básicos para o entendimento do mesmo.

### 4.1 ESTADO CRÍTICO

Conforme Dalla Rosa (2009), a teoria do estado crítico é definida a partir do comportamento de solos submetidos a grandes deformações cisalhantes. Nesta situação, o comportamento que os materiais apresentam é representado pela contínua deformação de cisalhamento sem que esta promova alterações de volume ou mesmo de tensões efetivas. Em muitos casos, o comportamento de solos na ruptura envolve, relativamente, grandes deformações plásticas sem a perda completa de resistência.

Na figura 3, são apresentados gráficos tensão-deformação mostrando o comportamento de uma areia fofa (esquerda) e uma areia compacta (direita), por exemplo, onde as duas curvas, no final do ensaio, tendem para o mesmo valor de resistência, independentemente do estado inicial, ou seja, tanto uma areia fofa, quanto uma compacta, tendem a um estado estável em que a resistência e o índice de vazios não variam mais. Este estado é denominado de estado crítico. O ângulo de atrito correspondente a esse estado é denominado ângulo de atrito crítico  $\phi'_{cr}$  (SCHOFIELD; WROTH, 1986).

O mesmo ocorre para argilas, pois gráficos tensão-deformação de argilas pré-adensadas se assemelham aos de areias compactas e, argilas normalmente adensadas, aos de areias fofas. Sendo que a queda de resistência desde o valor de pico até o de estado crítico está relacionada ao aumento do índice de vazios do solo (BIANCHINI, 2000).

Na figura 4 são exibidos os círculos de Mohr representativos dos estados de tensões máximas que definem a envoltória de resistência de pico e do estado crítico e os respectivos ângulos de atrito (PINTO, 2006).

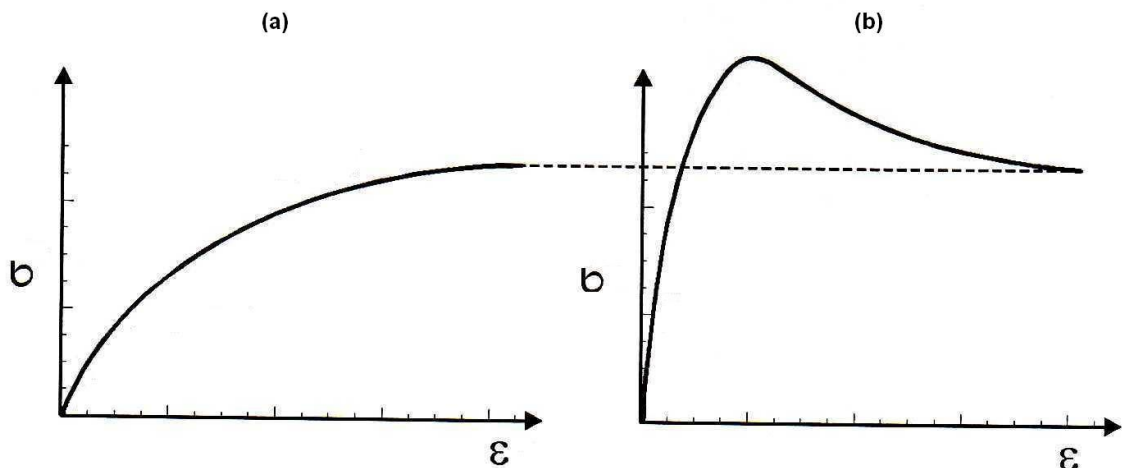


Figura 3: gráficos tensão-deformação de um solo que apresenta o estado de pico (b) e de um que não apresenta (a) (adaptada PINTO, 2006)<sup>1</sup>

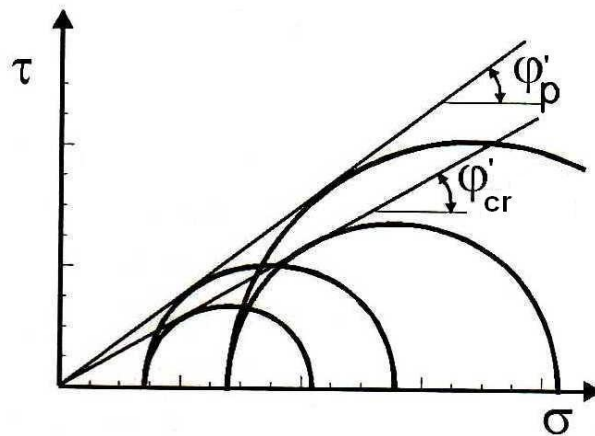


Figura 4: envoltórias de resistência de pico e do estado crítico (adaptada PINTO, 2006)<sup>2</sup>

As consequências imediatas para aplicação prática destes conceitos são que (ORTIGÃO, 2007):

- a)  $\varphi'_{cr}$  pode ser interpretado como uma propriedade do material, pois é independente do estado, ou seja, da compactidade;
- b)  $\varphi'_{cr}$  é um valor conservador e, adotando-o em projetos, fica-se a favor da segurança.

<sup>1</sup> Considerando incorretas as informações prestadas pelo autor, foram corrigidas as referências ao ângulo de atrito residual para ângulo de atrito do estado crítico.

<sup>2</sup> Idem.



## 4.2 ESTADO RESIDUAL

A resistência residual ao cisalhamento ocorre nos solos argilosos quando sujeitos a deformações muito grandes, da ordem de metros. Isto se verifica, por exemplo, em encostas sujeitas a deslizamentos antigos e a grandes movimentos de massa. A resistência residual, entretanto, não é abrangida pelas teorias de estado crítico, pois estas se aplicam somente à condição em que a massa de solo ainda se desloca como um meio contínuo e suas partículas apresentam orientação randômica. Quando a ruptura da massa de solo ocorre segundo um plano bem definido de deslizamento, partículas em sua vizinhança se alinham segundo a direção da ruptura, ocorrendo então, a situação residual (ORTIGÃO, 2007).

Tal estado é conhecido como resistência residual ou estado residual. Na figura 5 é apresentado um esquema de quando este estado é alcançado.

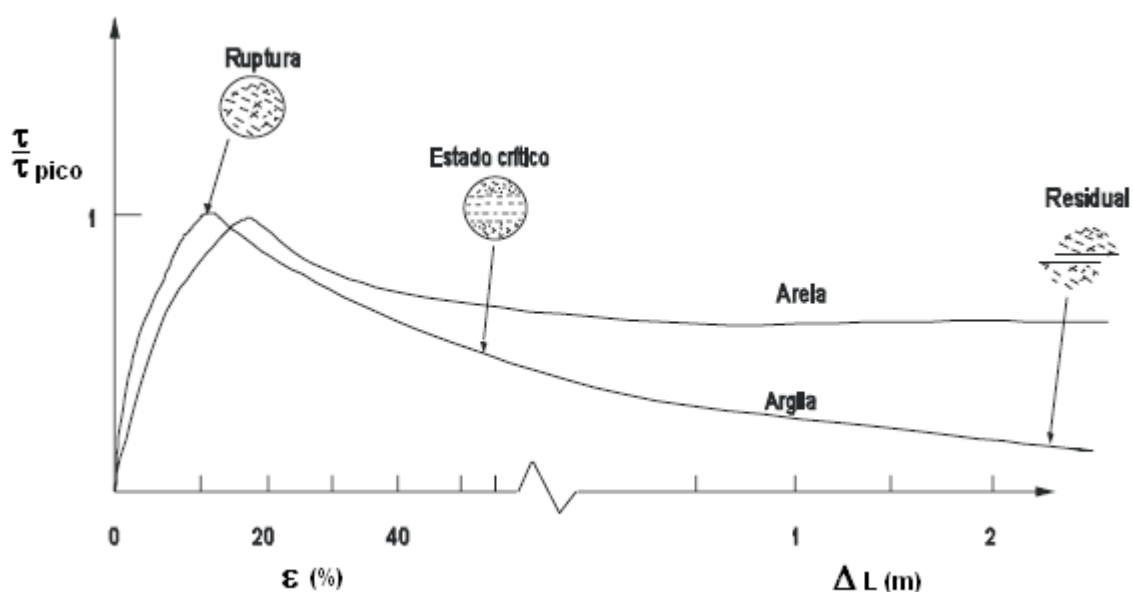


Figura 5: curvas tensão-deformação indicando pico, estado crítico e residual (ORTIGÃO, 2007)

Diferente do que ocorre em alguns solos argilosos, em uma areia, a condição de pico caracteriza-se pelo grande entrosamento entre grãos. Com o prosseguimento das deformações, a areia dilata e atinge o estado crítico com os grãos mais afastados e desentrosados. Prosseguindo os deslocamentos, não há mais queda de resistência, pois o atrito é devido ao rolamento e ao deslizamento entre grãos, que não sofrem grandes alterações. Sendo assim,

areias não apresentam orientação de partículas e, desta forma, não possuem estado de resistência residual (ORTIGÃO, 2007).

Conforme Ortigão (2007), em se tratando de uma argila pré-adensada, esta apresenta um pico de resistência e, em seguida, atinge a condição de estado crítico a relativas grandes deformações, em que as partículas têm orientação randômica. Prosseguindo os deslocamentos, formam-se um plano de deslizamento e uma descontinuidade, segundo os quais há uma direção preferencial de orientação das partículas. Assim, os parâmetros efetivos de resistência residual ( $c'_r$ ,  $\phi'_r$ ) podem ser muito inferiores aos de pico ou do estado crítico, como é apresentado no quadro 1.

Parâmetros efetivos de resistência	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (graus)
Pico	10	35
Crítico	0	30
Residual	0	17

Quadro 1: parâmetros de resistência averiguados nos diferentes estados (ORTIGÃO, 2007)

Skempton (1964), em seus estudos, demonstrou a importância prática da resistência residual em fenômenos de ruptura progressiva e na análise da estabilidade de taludes com deslizamentos reativados, observando que a resistência mobilizada era aproximadamente igual à resistência ao cisalhamento residual, determinada em laboratório.

### 4.3 PERMEABILIDADE

Comumente utilizada durante muitos anos em projetos de engenharia e análises para resolver problemas de percolação, as técnicas de linhas de fluxo exigem uma distribuição isotrópica e homogênea de permeabilidade. Infelizmente os solos não são assim. Intrinsecamente eles serão não-homogêneos, talvez anisotrópicos de maior ou menor grau, e quase certamente irão alterar a sua permeabilidade conforme forem sujeitos à tensões (BROMHEAD, 1992).

Bromhead (1992) cita que a estratificação dos solos pode ser uma fonte de anisotropia significativa da permeabilidade e a não-homogeneidade pode ocorrer devido a mudanças na

deposição, trazendo uma mudança no tamanho de grãos ou efeitos químicos, precipitando alguns minerais nos poros do solo, entre outros fatores.

Conforme Lambe e Whitman (1979), as propriedades físicas dos solos que mais influenciam a condutividade hidráulica, mas que não devem ser considerados isoladamente, são:

- a) tamanho das partículas;
- b) índice de vazios;
- c) composição mineralógica;
- d) estrutura e;
- e) grau de saturação.

Para Cedergren (1989), muitas variações na condutividade hidráulica ocorrem dependendo da forma como os depósitos de solos são formados, portanto o entendimento dos processos de formação dos solos é importante para avaliar suas propriedades. Fonseca et al. (1982) chamam a atenção para o fato de áreas de colúvios apresentarem coeficientes de condutividade hidráulica bastante variados para diferentes pontos da massa coluvionar, mostrando a existência de veios drenantes pertencentes à macro-estrutura.

Ensaio de condutividade hidráulica realizados por Lacerda (2002), *in situ* e em laboratório, com colúvios, mostraram valores do coeficiente de permeabilidade da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s. Estes valores parecem ser incompatíveis, na maioria dos casos, com o elevado teor de argila encontrado nos ensaios de granulometria, porém, estes resultados, evidenciam que as partículas finas dos solos coluvionares estão geralmente agrupadas em grumos, o que faz com que os solos tenham condutividades hidráulicas elevadas.

#### 4.4 INSTABILIDADE DE ENCOSTAS

Segundo Pinheiro et al. (1997), as regiões Sul e Sudeste do Brasil, por suas condições climáticas e pelas grandes extensões de maciços montanhosos (Serra Geral e Serra do Mar), estão sujeitas a desastres associados aos movimentos gravitacionais de massa nas encostas. Além da grande quantidade dos escorregamentos de origem natural, ocorre nestas regiões, um elevado número de escorregamentos induzidos pela ação do homem.

Colúvios são constituídos de materiais que, devida à baixa resistência que apresentam são sujeitos ao rastejo e rupturas em taludes que podem ocorrer sem qualquer intervenção humana (DEERE; PATTON, 1971). A forma como esse processo de rastejo ocorre pode ser vista na figura 6, nela, se mostra a zona de degradação na qual ocorrem movimentos rotacionais e a zona de acumulação na qual ocorre a dispersão do material.

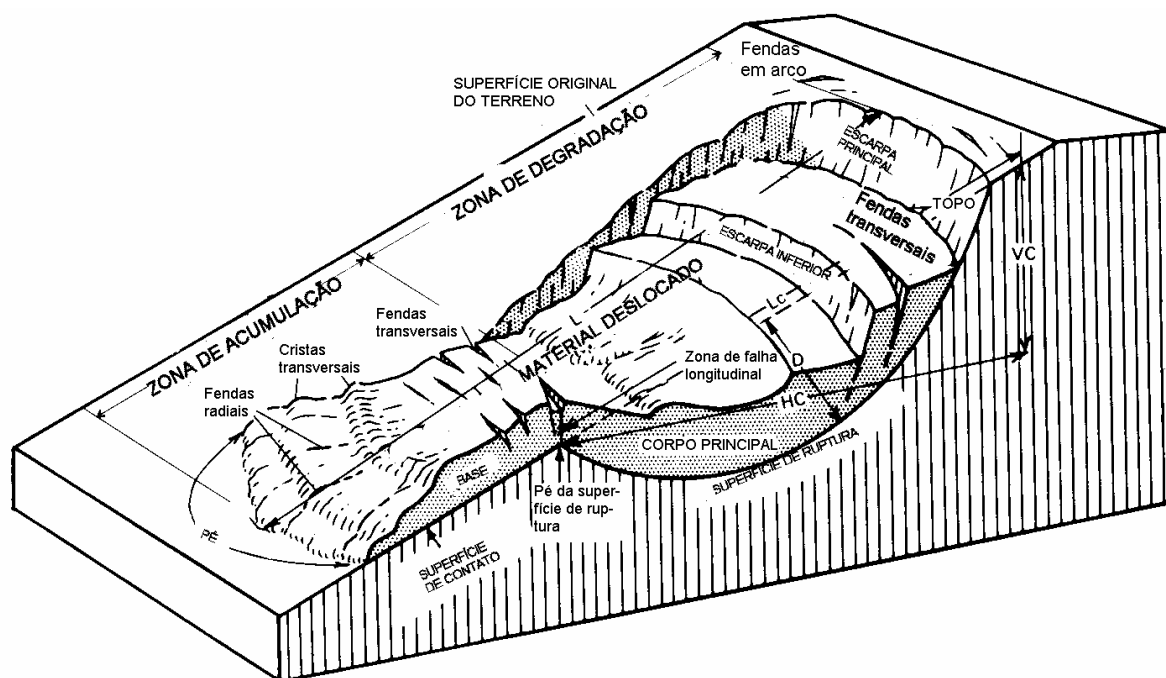


Figura 6: processo de deslocamento de massa de solo (VARNES, 1978)

Nos casos de lento movimento da massa de solo, vários podem ser os sinais de instabilidade passíveis de serem notados através da simples observação. Se as superfícies de deslizamento são rasas, o movimento ao longo da encosta pode cortar as raízes e causar a morte das árvores. Cercas, dutos e cabos enterrados podem ser esticados e comprimidos, alternadamente ao longo do seu comprimento, e pequenas ondulações podem se formar em superfícies niveladas (BROMHEAD, 1992).

Outro sinal de instabilidade é o aumento das taxas de movimento lateral no pé da encosta e a formação de fissuras na crista, que inicialmente serão apenas fissuras abertas na largura, mas quando a falha progredir haverá uma separação vertical. Normalmente, esses movimentos laterais e de qualquer elevação no pé do talude serão imperceptíveis no início e só poderão ser captados por instrumentos adequados no subsolo e levantamento topográfico da superfície. Estes são, portanto, uma parte integrante e essencial de qualquer programa de controle, pois

sem um ponto de referência adequado os movimentos podem não ser óbvios (BROMHEAD, 1992). Assim, segundo Bressani (2010), quando a instabilidade se apresenta de forma lenta a instrumentação do talude se torna bastante válida.

Nos casos de escorregamentos catastróficos, segundo Freitas et al. (2005), os colúvios saturados, que estão situados em encostas com inclinação inferior a 20°, movem-se de maneira intermitente, acelerando ou desacelerando, de acordo com as oscilações piezométricas. A ocorrência desse tipo de escorregamento necessita de um fator a mais para que possa acontecer, pois seu comportamento tensão-deformação é do tipo *strain-hardening*, ou seja, não apresenta um pico de resistência, como é mostrado na figura 7. Essa figura apresenta o resultado de um ensaio de cisalhamento direto realizado em uma amostra indeformada retirada de um colúvio em sua região de maior movimentação.

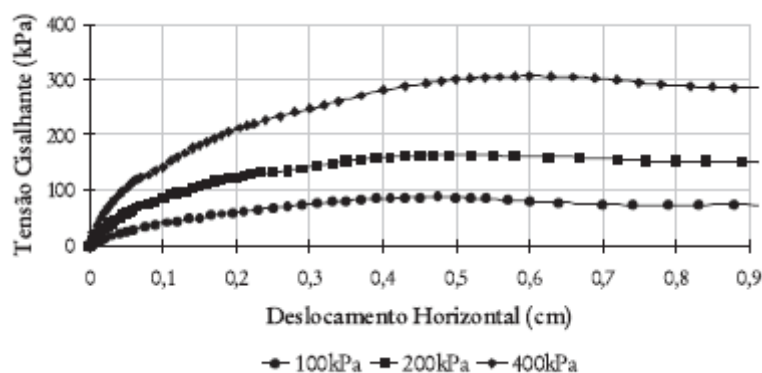


Figura 7: ensaio de cisalhamento direto de um colúvio (FREITAS et al., 2005)

Segundo Varnes (1978), os principais fatores que contribuem para a redução da resistência ao cisalhamento e conseqüente ruptura do talude são:

- a) o estado inicial do material (composição, textura, estrutura e geometria do talude);
- b) mudanças devidas ao intemperismo e outras reações químicas;
- c) mudanças nas forças intergranulares devidas ao teor de umidade e à pressão nos poros e fraturas;
- d) mudanças na estrutura.

Os autores Cruden e Varnes (1996) resumiram os processos e as características que contribuem para os movimentos de massa e listaram as causas destes movimentos, divididas em grupos conforme mostrado no quadro 2.

Causas Geológicas	Causas Morfológicas	Causas Físicas	Causas Humanas
Materiais fracos	Levantamento tectônico ou vulcânico	Chuvas intensas	Escavações de taludes
Materiais sensíveis	Alívio por degelo	Derretimento rápido de neve	Sobrecarga no talude ou na crista
Materiais intemperizados	Erosão fluvial no pé do talude	Precipitações excepcionalmente prolongadas	Rebaixamento (reservatórios)
Materiais fissurados ou fraturados	Erosão glacial no pé do talude	Terremotos	Irrigação
Orientação desfavorável de descontinuidades (acamamento, xistosidade, etc.)	Erosão nas margens laterais	Erupções vulcânicas	Mineração
Orientação desfavorável de descontinuidades estruturais (falhas, contatos, inconformidades, etc.)	Erosão subterrânea (Solução e piping)	Descongelamento	Vibração artificial
Contraste de permeabilidade	Deposição de cargas no talude ou na crista	Intemperismo por congelamento e descongelamento	Vazamento de água
Contraste de rigidez (materiais densos, rígidos sobre materiais plásticos)	Remoção da vegetação (fogo, seca)	Intemperismo por expansão e retração	

Quadro 2: causas de movimentos de massas (CRUDEN; VARNES, 1996)

Um aspecto sobre o qual parece haver consenso nos estudos realizados até os dias atuais é que entre os principais agentes deflagradores dos processos de instabilização de taludes estão as precipitações pluviométricas de alta intensidade. Estas alteram o regime hidrogeológico do talude, elevando o nível d'água, que por sua vez provoca o aumento das poro-pressões na superfície potencial de ruptura (PERAZZOLO, 2003).

Entretanto, segundo Lacerda (1989), algumas vezes ocorrem rupturas com valores de poro-pressão inferiores àqueles necessários para que a trajetória de tensões atinja a envoltória de resistência ao cisalhamento. O autor atribui isto à perda de resistência ao cisalhamento devida às variações cíclicas de poro-pressão, causadas pelas variações pluviométricas, que levam o solo a uma espécie de fadiga. Porém, durante a fase de ocorrência de elevadas poro-pressões, ocorre o acúmulo de deformações que provocam a quebra das ligações entre as partículas, as

quais são responsáveis pela coesão do material. O autor sugere, então, que o limite inferior a partir do qual o estado de tensões efetivas leva a deformações por *creep*, deformação lenta do solo, e, portanto, ao acúmulo de deformações, seja a envoltória de resistência ao cisalhamento residual.

Em solos coluvionares, a interface do solo residual e do colúvio está quase sempre nesta condição de resistência ao cisalhamento residual devido ao deslocamento já sofrido pela massa no passado (LACERDA, 2002).

Segundo Bromhead (1992), para que seja possível a formação de uma superfície de deslizamento, deve ocorrer a orientação do plano de partículas minerais de argila no sentido do cisalhamento. O que é essencial na formação destas superfícies de cisalhamento é que a forte orientação das partículas no plano e a relação de vazios, em equilíbrio com a tensão aplicada faz com que as partículas entrem em atrito umas com as outras.

## 5 ASPECTOS REGIONAIS

Neste capítulo são apresentados aspectos regionais da área em estudo que são considerados de grande influência na formação e na evolução da massa coluvionar.

### 5.1 GEOLOGIA

O estado do Rio Grande do Sul, como pode ser visto na figura 8, é formado por quatro províncias geomorfológicas: o Escudo Sul Riograndense, a Depressão Periférica, o Planalto e a Planície Costeira. A Depressão Periférica e o Planalto, em conjunto, formam um importante domínio geológico, denominado Bacia da Paraná. A região em estudo situa-se no Planalto, onde a diferença de resistência à erosão entre o basalto e o arenito forma as *cuestas*, localmente conhecidas como serras (HAUCK, 2009).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1998), o Rio Grande do Sul é constituído por terrenos rochosos cuja origem ou transformação recuam aos mais diferentes períodos da história da crosta terrestre, trazendo o registro de distintos eventos geodinâmicos. Do Arqueano Precoce aos tempos cenozóicos, os processos magmáticos, metamórficos e sedimentares, aliados aos movimentos tectônicos, foram engendrando uma crosta cada vez mais diferenciada e mais estável, com predomínio, de modo geral crescente, da atividade sedimentogênica sobre as atividades ígneo-metamórficas. Assim, o panorama geológico atual do Estado é o de uma região que abrange três grandes domínios geológicos: Terrenos Pré-Cambriânicos, Bacia do Paraná e Cobertura de Sedimentos Cenozóicos.

Dentre as formações que foram desenvolvendo o que é chamada hoje de Bacia do Paraná, as unidades geológicas mais importantes são o Arenito Botucatu e a Formação Serra Geral.



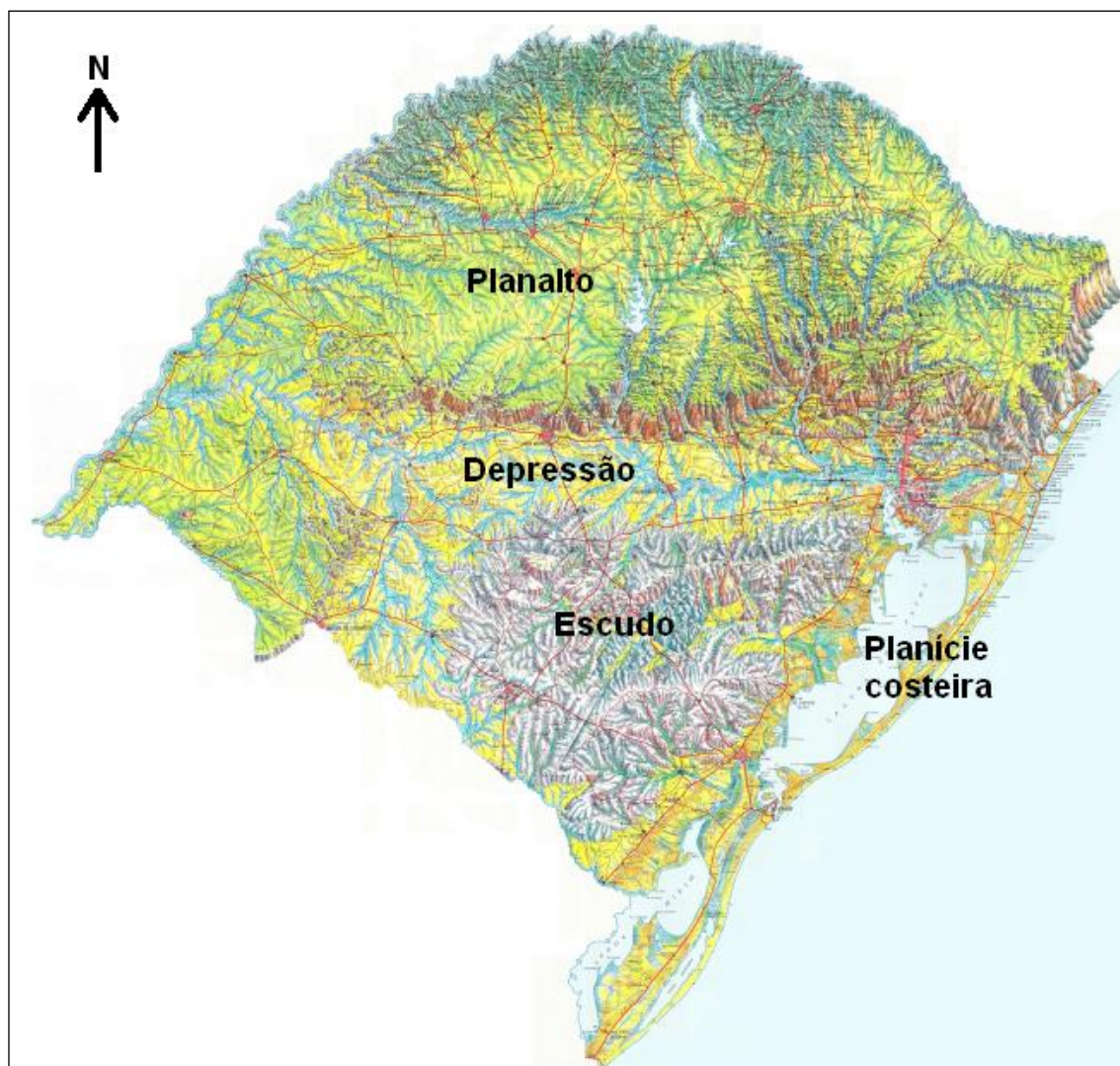


Figura 8: mapa morfológico do Rio Grande do Sul  
(adaptada de RIO GRANDE DO SUL, 1989)

Assim, estando o colúvio em estudo inserido na Bacia do Paraná, o mesmo encontra-se assente sobre um arenito da Formação Botucatu e é constituído, principalmente, de materiais originários das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Segundo Maack<sup>3</sup> (1952 apud ZALÁN et al., 1997), o nome da Bacia do Paraná é devido ao rio Paraná, que corre paralelo ao seu eixo maior, na direção NNE-SSW, por 1.500 km até alterar a sua direção para E-W, cruzando o Arco de Assunção e formando a fronteira entre o Paraguai e a Argentina (Bacia Chaco-Paraná).

<sup>3</sup> MAACK, R. Die entwicklung der gondwana. Schichten suedbrasilien und ihre beziehungen zur korruformation suedafrikas. In: GEOLOGICAL SOCIETY OF ALGIERS, 1952, Algiers. **Proceedings...** Algiers: International Geological Congress, 1952. v. 19, p. 339-372.

Esta bacia compreende a parte meridional do Brasil, com área de 1,1 milhões km<sup>2</sup>, a metade oriental do Paraguai, parte da Argentina, e Uruguai, com 100 mil km<sup>2</sup> em cada um desses países, totalizando, aproximadamente, 1,4 milhões km<sup>2</sup>. A bacia tem formato alongado na direção NNE-SSW, com aproximadamente 1.750 km de comprimento e largura média de 900 km. Apresenta derrames de lava basáltica em dois terços da porção brasileira, que atingem, aproximadamente, 1.300 m de espessura. Os valores máximos de espessura de rochas sedimentares e vulcânicas, somados, ultrapassam 6 000 m (ZALÁN et al., 1988). Na figura 9 é possível visualizar os contornos da bacia e também a localização aproximada da área em estudo.

Segundo Almeida<sup>4</sup> (1980 apud ZALÁN et al., 1997) e Zalán et al. (1988), o pacote de rochas sedimentares e vulcânicas que constituem a Bacia do Paraná representa a superposição de, no mínimo, três bacias diferentes, cujas geometrias e limites variam de uma para outra, em decorrência do movimento das placas que conduziu a evolução do Gondwana no tempo geológico. A primeira bacia teria sido depositada em um golfo aberto para o paleo-Oceano Pacífico, já a segunda, desenvolveu-se em mar interior e a fase de erupção das lavas corresponderia à terceira fase da bacia do Paraná.

Nesta terceira fase da Bacia do Paraná ocorreu o surgimento da Formação Serra Geral, que consiste em uma sequência de rochas vulcânicas extrusivas. Esta sequência cobre quase todo o norte e o leste do estado do Rio Grande do Sul, sendo a principal formadora do planalto. Sua espessura varia de 1.200 m a leste, junto ao Oceano Atlântico, até cerca de 400 m a oeste, junto ao rio Uruguai. Os derrames inferiores desta formação são básicos, consistindo essencialmente de basalto. Os derrames superiores são ácidos, predominando o riodacito e o riolito (PINHEIRO; SOARES, 2003).

Já a Formação Botucatu, conhecida por ser uma rocha porosa que hoje armazena água, formando o aquífero Guarani, encontra-se subjacente à Formação Serra Geral, possui estratificação cruzada, que mostra que foi depositado por vento em ambiente seco e dunar, portanto constituída por arenitos eólicos, sendo resultado da grande desertificação do ainda continente Gondwana. Em alguns locais, o arenito Botucatu é também encontrado entre os derrames basálticos, mostrando que houve fases sucessivas de vulcanismo e sedimentação (HAUCK, 2009; PINHEIRO; SOARES, 2003).

---

<sup>4</sup> ALMEIDA, F. F. M. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. **Relatório da PAULIPETRO**, São Paulo, n. 14091, p. 187, 1980.

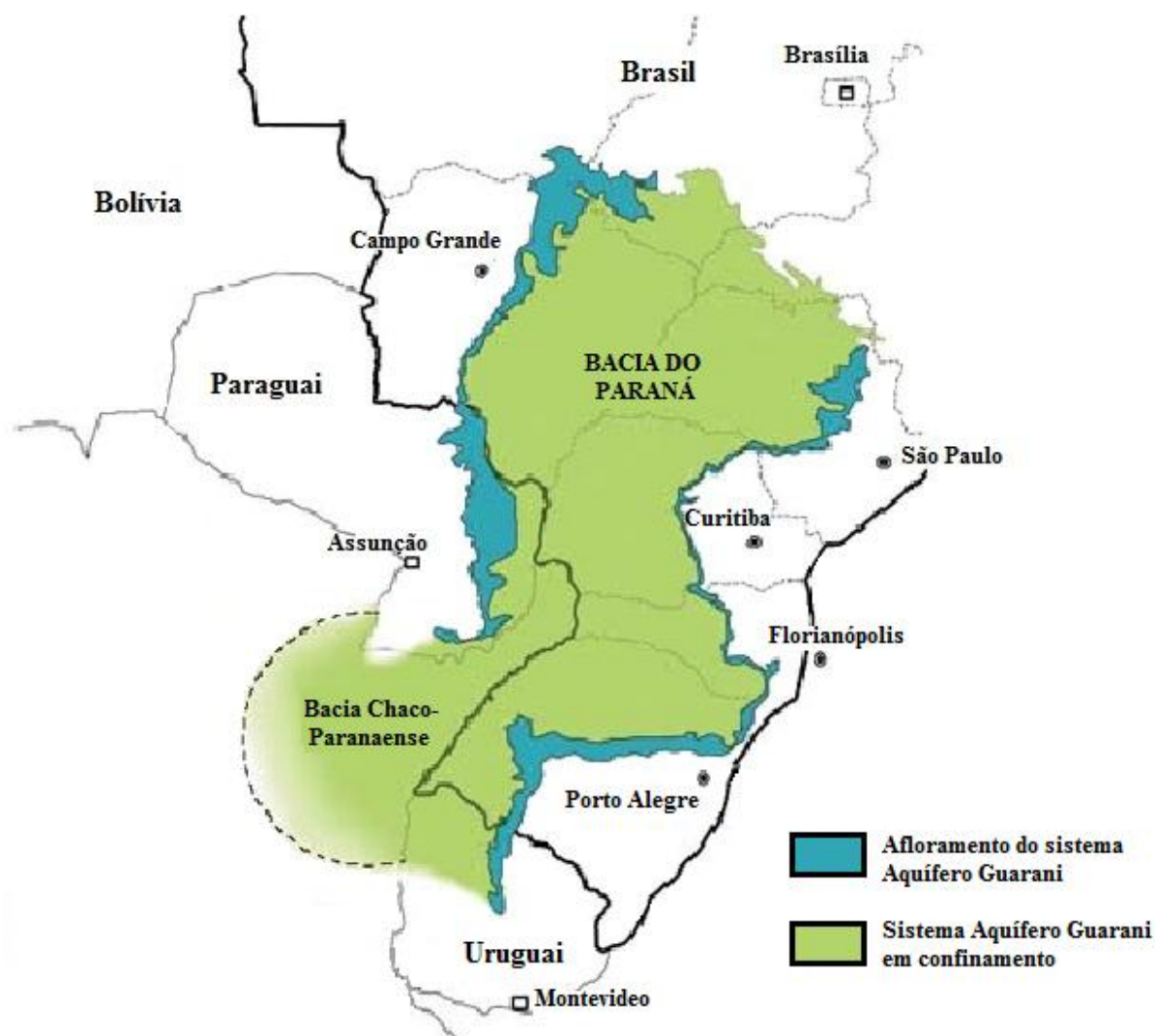


Figura 9: localização da Bacia do Paraná (CORTEZ, 2011)

## 5.2 CLIMA E VEGETAÇÃO

Segundo Wu et al. (1994) a vegetação em encostas fornece proteção contra a erosão, sendo que as raízes das plantas podem reforçar ou ligar o solo e aumentar a sua coesão, o que causa uma melhora na estabilidade contra deslizamentos superficiais. Além disso, acredita-se que as raízes das plantas são eficazes para reduzir as poro-pressões dentro das encostas por meio da interceptação das chuvas, reduzindo a infiltração e, por evapotranspiração.

No mapa da figura 10 pode ser vista a distribuição dos diferentes tipos de vegetação que ocorrem no estado.

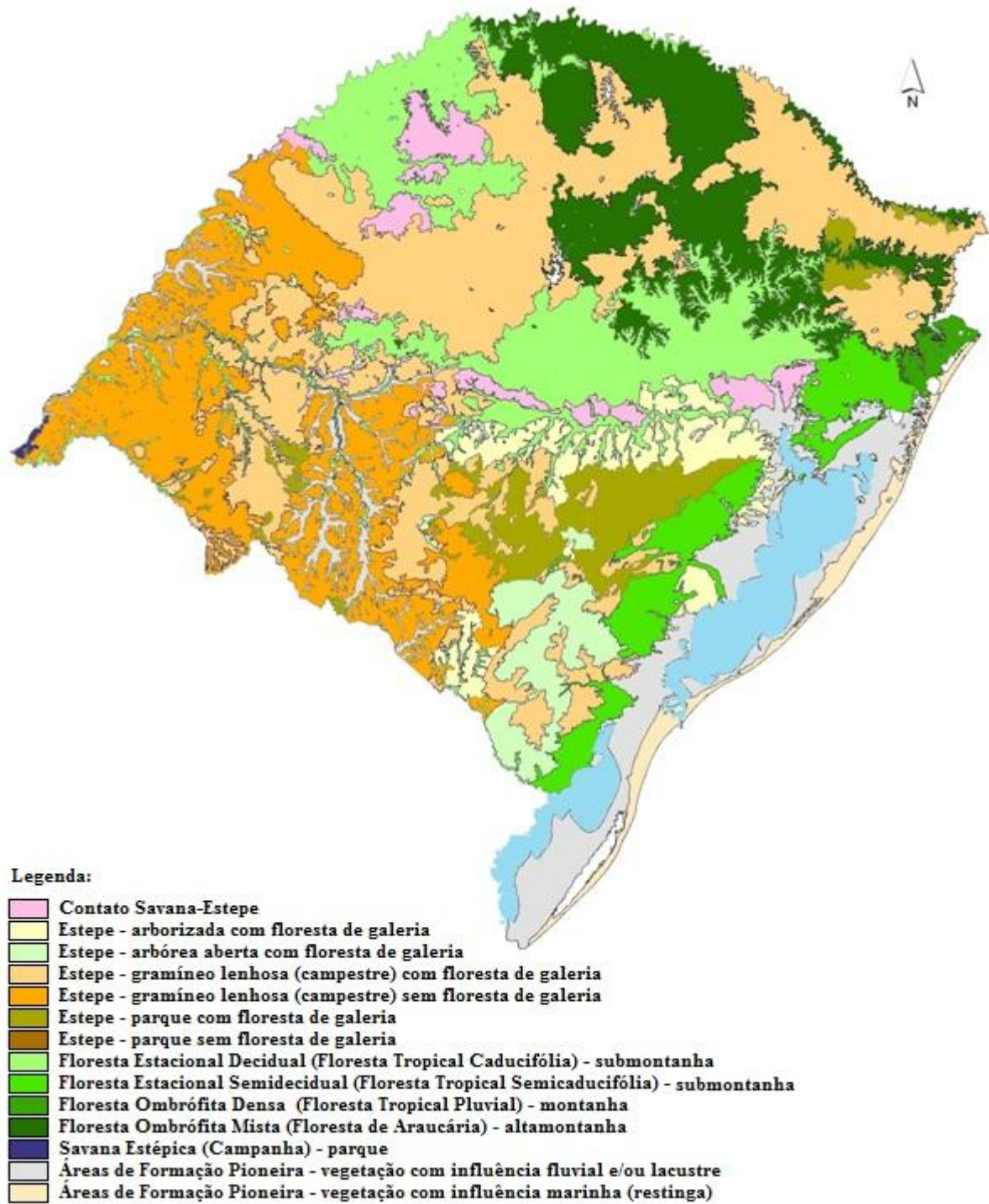


Figura 10: unidades de vegetação do Rio Grande do Sul  
(RIO GRANDE DO SUL; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2001)

Na área de estudo os tipos de vegetação predominante são (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 1992):

- a) Floresta Estacional Decidual: este tipo de vegetação é caracterizado por duas estações climáticas bem demarcadas. No Rio Grande do Sul, embora o clima seja ombrófilo, possui uma curta época muito fria e que ocasiona, provavelmente, a estacionalidade fisiológica da floresta. Esta formação ocorre na forma de disjunções florestais apresentando o estrato dominante predominantemente caducifólio, com mais de 50% dos indivíduos despidos de folhas no período frio. Sua ocorrência é destacada na região do Alto Uruguai, ao norte do Estado, e na borda sul do Planalto, acompanhando a Serra Geral, até as proximidades do rio Itu (afluente do rio Ibicuí), fazendo limite com os campos da Campanha gaúcha;
- b) Floresta Ombrófila Mista: caracterizada por apresentar o estrato superior dominado pela Araucária angustifolia, que dá a paisagem uma fisionomia própria. O estrato inferior é constituído por árvores mais baixas ou arbustos arborescentes, pertencente em grande parte às Mirtáceas. É uma floresta típica do Planalto Meridional, ocorrendo no Rio Grande do Sul em altitudes entre 500 m ao oeste a 1.000 m a leste.

Deve-se lembrar, entretanto, que em grande parte da área ocupada pelo colúvio a vegetação primária já não existe mais devido à intervenção dos habitantes da área para o uso da terra e, também, devido à implantação da rodovia.

Sobre a classificação climática, todo o Estado do Rio Grande do Sul se enquadra no tipo climático Cf, temperado chuvoso, da classificação de Köppen. Considerando as diferentes regiões climáticas, e analisando segundo a temperatura, é possível enquadrar o Estado nas variedades climáticas Cfa e Cfb (BURIOL; KUINCHTNER, 2001).

A variedade **Cfa** se caracteriza por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A variedade **Cfb** também apresenta chuvas durante todos os meses do ano, tendo a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C e a do mês mais frio superior a 3°C. A variedade **b** se restringe ao planalto basáltico superior e ao escudo Sul-Rio-Grandense, enquanto que as demais áreas pertencem à variedade **a**, conforme o mapa da figura 11 (RIO GRANDE DO SUL; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2001).

Das regiões geográficas do Globo, bem regadas por chuvas, o Sul do Brasil é, segundo Nimer (1990), a que apresenta distribuição espacial mais uniforme. Com efeito, ao longo de quase todo seu território a altura média da precipitação anual varia de 1.250 a 2.000 mm. Portanto,

não há no Rio Grande do Sul nenhum lugar caracterizado por carência de chuva como pode ser visto do mapa da figura 12 que apresenta a distribuição média de chuvas para o estado, somente em restrita área em torno de São Francisco de Paula, situada acima de 900 m de altitude, na borda da escarpa do Planalto das Araucárias, a barlavento das correntes perturbadoras de origem polar, chove 2.500 mm, aproximadamente, o mais alto índice pluviométrico da Região Sul.

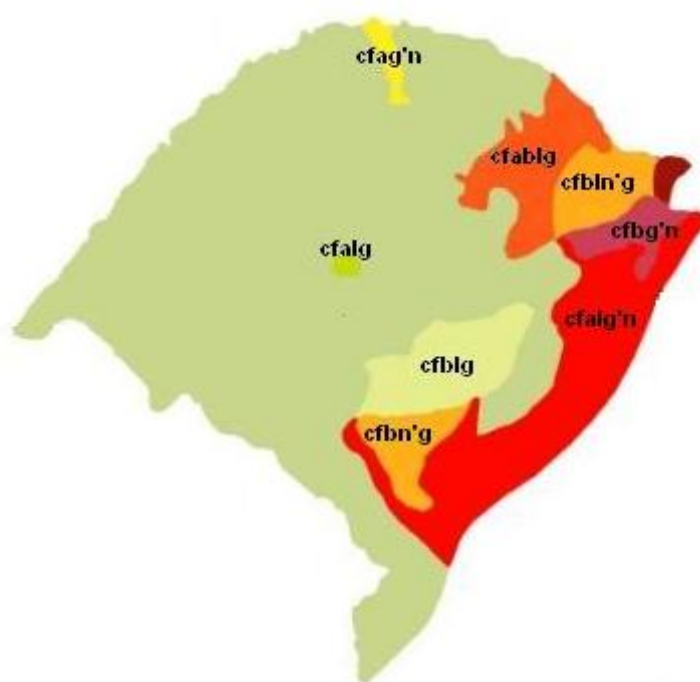


Figura 11: mapa climático do Rio Grande do Sul  
(RIO GRANDE DO SUL; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2001)

Para Mota et al. (1971) as chuvas ocorrem bem distribuídas durante todos os meses do ano. A amplitude de variação entre os meses de máxima e mínima não chega a ser significativa para caracterizar o clima como tendo um período chuvoso e outro seco. A relativa uniformidade do regime de chuva do Estado não reside apenas nos índices dos totais anuais de chuva, mas, principalmente, na forma pela qual as chuvas se distribuem ao longo do ano, emprestando ao regime anual de chuva, um notável equilíbrio.

É importante destacar que as características climáticas, particularmente a taxa pluviométrica, interferem de forma significativa no comportamento geotécnico do terreno. Uma maior intensidade de chuvas resulta em maior probabilidade de rupturas e escorregamentos de taludes (NUMMER, 2003).

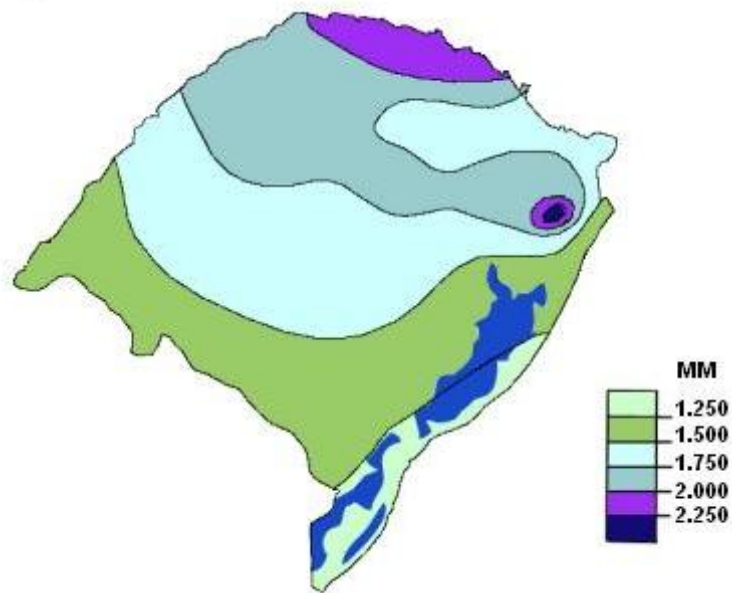


Figura 12: mapa da distribuição das chuvas no Rio Grande do Sul  
(RIO GRANDE DO SUL; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2001)

## 6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COLÚVIO

Atualmente, na área de estudo deste trabalho, pode-se observar sinais do processo de rastejo que o colúvio vem sofrendo continuamente. Através de um reconhecimento do local, foram detectados vários indícios desta movimentação, mostrados nas figuras 13 a 16, bem como aspectos característicos desse tipo de formação, dentre eles:

- a) mudança do traçado da rodovia devida aos deslocamentos;
- b) blocos basálticos em meio à matriz de solo;
- c) trincas de tração, devidas ao movimento rotacional;
- d) nível freático superficial.

Como já citado, este colúvio foi alvo de estudos anteriormente realizados e os resultados dos mesmos e as ações previstas e implantadas no colúvio serão apresentadas neste capítulo para melhor entendimento da situação atual da área.



Figura 13: desníveis e mudança do traçado da rodovia devido aos deslocamentos





Figura 14: medidas amenizadoras dos efeitos na rodovia: à esquerda, adição de sucessivas camadas de concreto asfáltico e à direita, deslocamento da pista



Figura 15: desnível devido aos movimentos rotacionais e a presença blocos basálticos de diferentes dimensões



Figura 16: lençol freático aflorante

## 6.1 HISTÓRICO DE ESTUDOS

O colúvio situa-se na RS-115, que liga os municípios de Taquara e Gramado no Rio Grande do Sul, ele abrange uma extensão de aproximadamente 200 m sobre a rodovia, partindo do km 23+400 m e terminando no km 23+600 m como pode ser visto na figura 17, uma foto aérea do local.



Figura 17: foto aérea da área onde se encontra o colúvio e suas delimitações (GOOGLE EARTH, 2010)

No ano de 1998 a empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. foi contratada para uma avaliação de risco da área e para a sugestão de medidas preventivas pela empresa concessionária responsável por este trecho da rodovia. Visando uma análise inicial da área, foram realizadas sondagens mistas, SPT e rotativa, no eixo do colúvio, que mostraram que este apresentava espessuras da ordem de 20 m. A locação dessas sondagens pode ser vista na figura 18 e os resultados das mesmas podem ser resumidos da seguinte forma (trabalho não publicado)<sup>5</sup>:

<sup>5</sup> Informações obtidas através do relatório técnico **Diagnóstico e Projeto de Estabilização da Ruptura de Colúvio RS115, km 12+840 a km 13+120** executado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. no ano de 1998.

- a) S01: mostra a espessura da massa coluvionar, que alcança até 20 m sem registrar o limite com a interface de alteração do arenito;
- b) S02: mostra que o material argiloso tem espessura aproximada de 15 m e o arenito começa apresentar pedaços coesos a partir dos 20 m de profundidade. Neste intervalo, entre 15 e 10 m, contato da interface de alteração do arenito, foi verificado um fluxo expressivo d'água, com ligeiro artesianismo;
- c) S03: mostra uma espessura da ordem de 16 m para a massa coluvionar.

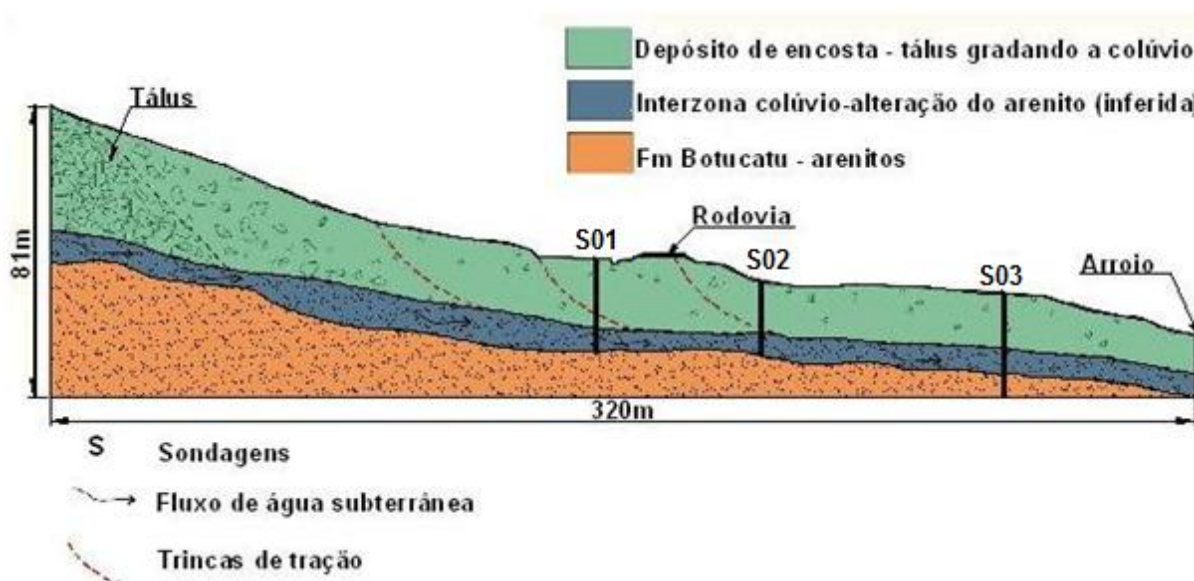


Figura 18: perfil longitudinal do colúvio e localização das sondagens (trabalho não publicado)<sup>6</sup>

Além das sondagens mistas, foram executadas quatro sondagens elétricas verticais, que auxiliaram na determinação da interface arenito-colúvio onde há predominância de fluxo d'água.

A partir da profundidade média de 20 m obtida pelas sondagens, foi feita uma cubagem para estimar o volume de material instável. Para tal, foi empregado o programa Surfer 6.02 no cálculo de volume, os resultados mostraram valores da ordem de 2.160.000 m<sup>3</sup>.

A partir destes estudos, constatou-se que a encosta envolvida encontrava-se há muitos anos em processo de rastejo, devido ao intermitente aporte de água subterrânea, através de juntas e fraturas situadas à montante da encosta e que provavelmente haveria uma diminuição da resistência do solo no plano de descontinuidade pela orientação das partículas devido a esta

<sup>6</sup> Informações obtidas através do relatório técnico **Diagnóstico e Projeto de Estabilização da Ruptura de Colúvio RS115, km 12+840 a km 13+120** executado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. no ano de 1998.

condição. Os movimentos de rastejo aceleraram com a construção do aterro rodoviário, que passou a exercer papel de sobrecarga e de barragem, bloqueando a passagem d'água, tornando maiores as poro-pressões no material argiloso presente à montante da rodovia. A linha principal de dispersão de materiais e as estruturas originadas a partir desta podem ser vistas na figura 19 (trabalho não publicado)<sup>7</sup>.

Foi também observado que o trecho da rodovia está disposto sobre um depósito de encosta, constituído por pacotes de materiais pouco coesos, originários da alteração de dois tipos distintos de litologias, rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu. Sendo assim, o colúvio serve de leito para a rodovia e apresenta materiais com um elevado grau de alteração, onde estão presentes blocos de rocha basáltica imersos em solos e pacotes argilosos e arenosos (trabalho não publicado)<sup>8</sup>.

A avaliação geológica superficial de campo mostrou que o colúvio está limitado à montante por uma escarpa arenítica (sudeste) e um depósito de tálus (nordeste), sendo este essencialmente composto por blocos de basalto. Nas demais direções, o colúvio não apresenta confinamento, possibilitando a dispersão de materiais em forma de leque (trabalho não publicado)<sup>9</sup>.

---

<sup>7</sup> Informações obtidas através do relatório técnico **Diagnóstico e Projeto de Estabilização da Ruptura de Colúvio RS115, km 12+840 a km 13+120** executado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. no ano de 1998.

<sup>8</sup> Idem.

<sup>9</sup> Idem.

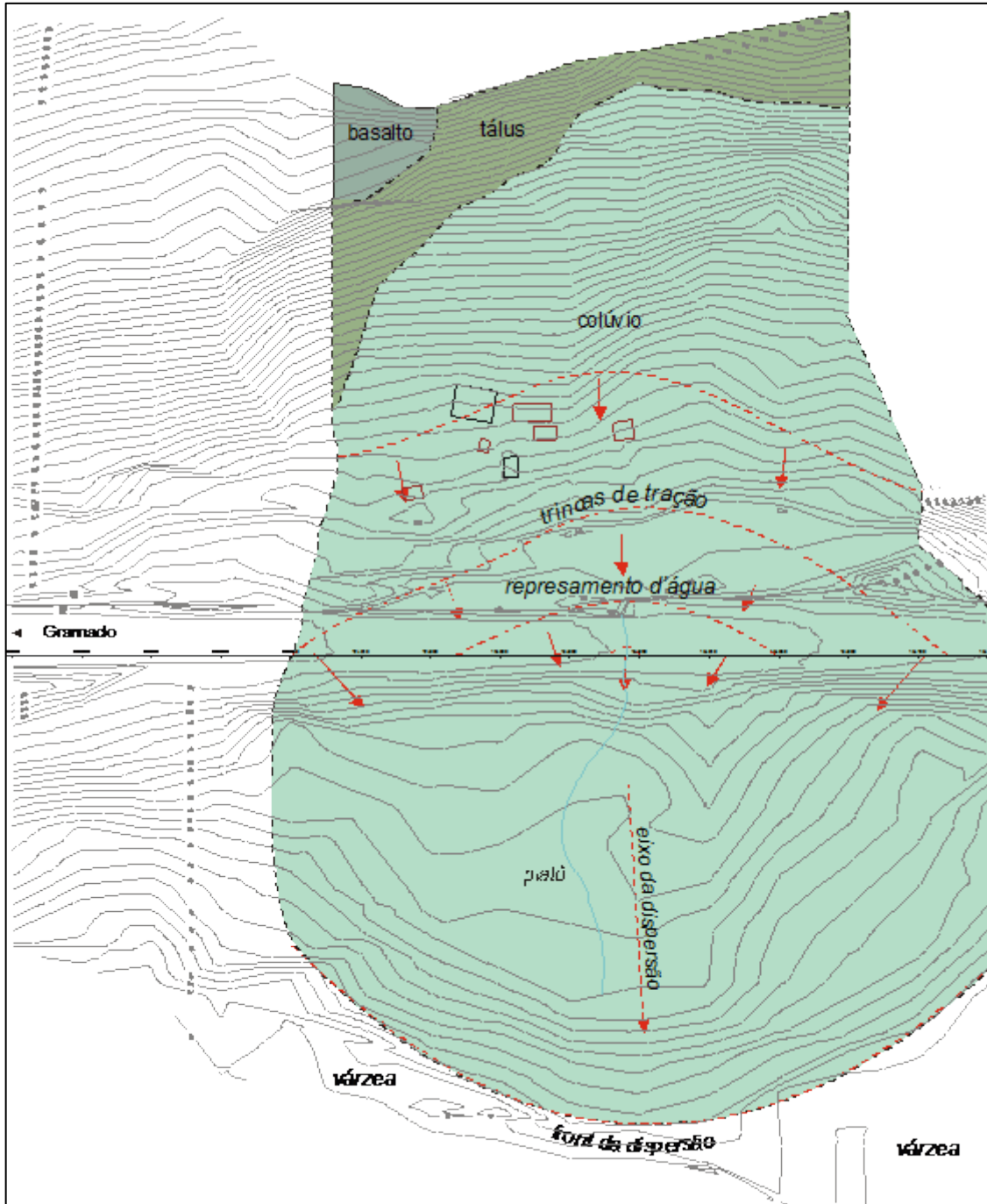


Figura 19: planta baixa da situação da área em 1998 (trabalho não publicado)<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Informações obtidas através do relatório técnico **Diagnóstico e Projeto de Estabilização da Ruptura de Colúvio RS115, km 12+840 a km 13+120** executado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. no ano de 1998.

## 6.2 INTERVENÇÕES

Após o estudo do caso, considerou-se a melhor solução procurar minimizar as deformações do colúvio diminuindo o volume de água subterrânea que flui no plano de ruptura aumentando assim, a resistência no contato, melhorando a estabilidade do conjunto (trabalho não publicado)<sup>11</sup>. Esta intervenção deveria ser feita considerando dois sistemas: um de drenagem profunda e outro de drenagem superficial. O primeiro visa retirar água diretamente da superfície de ruptura e tende a ser mais eficaz. O segundo visa evitar que a água superficial venha a alcançar a superfície de ruptura (trabalho não publicado)<sup>12</sup>.

A drenagem profunda é mais eficaz para a retirada da água subterrânea, porém concluiu-se que os dados disponíveis eram insuficientes para identificar com clareza a zona de rastejo do colúvio, onde deveriam ser posicionados os drenos profundos. Portanto, o projeto de drenagem profunda deveria ser necessariamente reavaliado à luz de novos dados obtidos dos seguintes ensaios: sondagens, monitoramento da encosta com piezômetros, inclinômetros e marcos topográficos (trabalho não publicado)<sup>13</sup>.

Entretanto, por existirem outros trechos na rodovia com prioridade quanto à segurança, na época, não se pode investir como se pretendia na estabilização desta área, então, nem todas as intervenções foram adotadas. Não foi possível implantar o projeto de drenagem, porém o projeto de monitoramento foi parcialmente implantado. Assim, foram instalados três inclinômetros, dois no ano de 2005 e um em 2009. O quadro 3 apresenta as datas das leituras realizadas.

Leituras			
Datas	IN 01	IN 02	IN 03
14/06/2005	x	x	
14/09/2005		x	
22/08/2009	x	x	
06/11/2009			x

Quadro 3: datas das realizações das leituras nos inclinômetros

<sup>11</sup> Informações obtidas através do relatório técnico **Diagnóstico e Projeto de Estabilização da Ruptura de Colúvio RS115, km 12+840 a km 13+120** executado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. no ano de 1998.

<sup>12</sup> Idem.

<sup>13</sup> Idem.

## 6.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

No ano de 2010 retomaram-se as investigações geotécnicas no local pelo engenheiro Alexandre Nichel para a realização de sua dissertação. O início destas investigações foi efetuado em conjunto com o desenvolvimento deste trabalho.

### 6.3.1 Ensaios SPT

Durante os estudos realizados por Nichel (2011), conjuntamente com este trabalho, fizeram-se cinco sondagens mistas que serviram para a implantação dos piezômetros e para a retirada de amostras destinadas a análise laboratorial. A localização dos dispositivos pode ser verificada na figura 20.

O perfil típico dos solos locais encontrado nas sondagens consiste de uma camada de pedregulhos com argila marrom de espessura aproximada de dois a três metros, variando para argila com pedregulhos, cor marrom a marrom-amarelado, de espessura superior a cinco metros e, na base do colúvio, sobre uma alteração de rocha, com cor marrom-amarelada, uma camada de argila, também, na cor marrom, de elevada umidade e plasticidade. Blocos de rocha basáltica foram encontrados em todas as perfurações nas duas camadas superficiais de pedregulhos com argila e de argila com pedregulhos, o que constitui um perfil característico de solos coluvionares. Nas sondagens mais próximas à rodovia foram verificadas, sobre o pacote de solos descrito acima, uma camada de argila orgânica de cor acinzentada e, sobre esta, o material do aterro rodoviário (NICHEL, 2011).

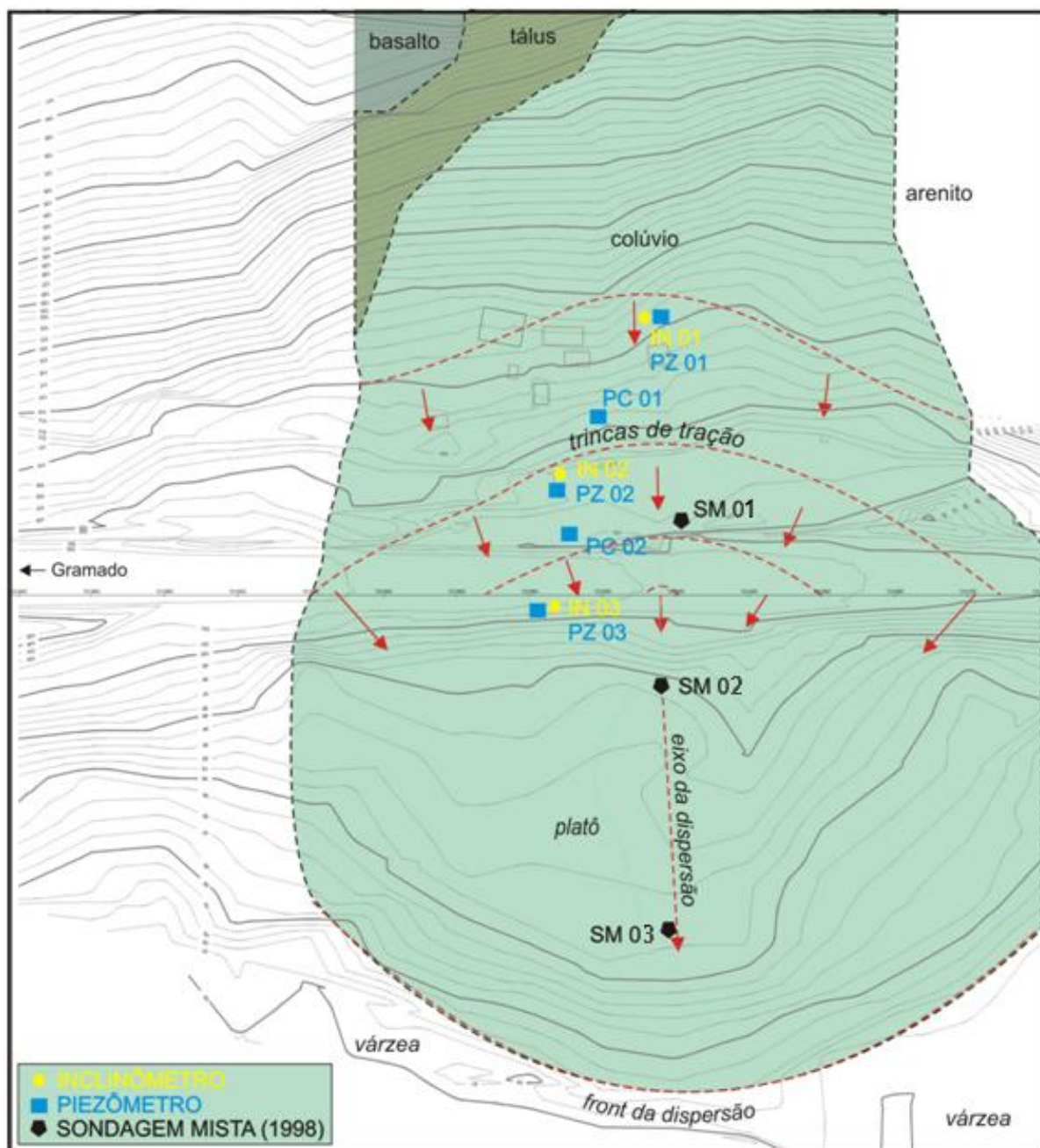


Figura 20: localização dos equipamentos e das sondagens (NICHEL, 2011)

Através da análise das informações existentes e dos resultados da interpretação dos dados obtidos pelos equipamentos instalados e das amostras ensaiadas, Nichel (2011) elaborou um novo perfil geológico característico do eixo da encosta de acordo com o levantamento topográfico atualizado. Este perfil é apresentado na figura 21.



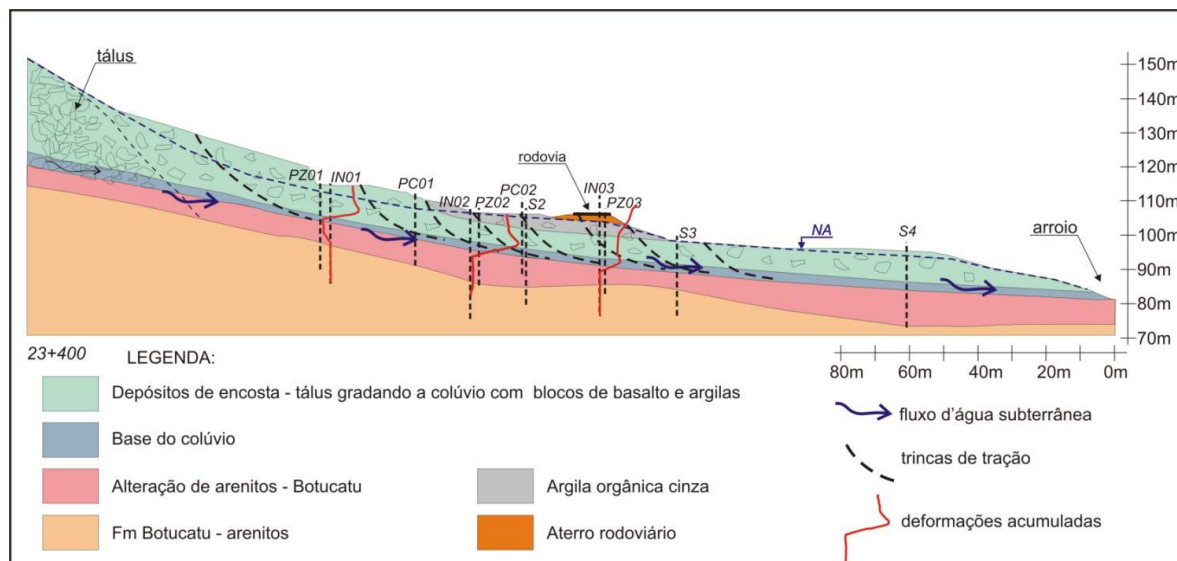


Figura 21: perfil geológico do eixo da encosta em estudo (NICHEL, 2011)

### 6.3.2 Inclinômetros

Para o estudo das movimetações do colúvio foram realizadas três campanhas de leituras nos três inclinômetros presentes na área nos dias 28 de abril (leitura zero), 22 de maio e 23 de outubro de 2010. Essas leituras foram realizadas em intervalos de 50 cm e os deslocamentos foram acumulados a cada ponto de leitura a partir da base, definida pela capacidade de leitura do equipamento de até 19,5m.

Os deslocamentos são medidos em duas direções perpendiculares entre si, eixo A-A e eixo B-B, sendo o eixo A-A dos inclinômetros praticamente perpendicular ao eixo da rodovia, estes resultados são combinados a fim de resultarem em um deslocamento total.

As leituras de inclinometria foram realizadas com a intenção de se definir claramente a profundidade a partir da qual os movimentos da encosta cessam e para determinar os níveis nos quais são verificados os maiores deslocamentos horizontais nos inclinômetros, podendo-se assim, identificar as interfaces dos materiais que compõe o colúvio. O resultado destas leituras e das leituras realizadas anteriormente para o inclinômetro 01 é mostrado na figura 22, representando como fica clara a identificação de uma camada, à 9 m de profundidade, na base do colúvio, onde os deslocamentos registrados são consideravelmente maiores.

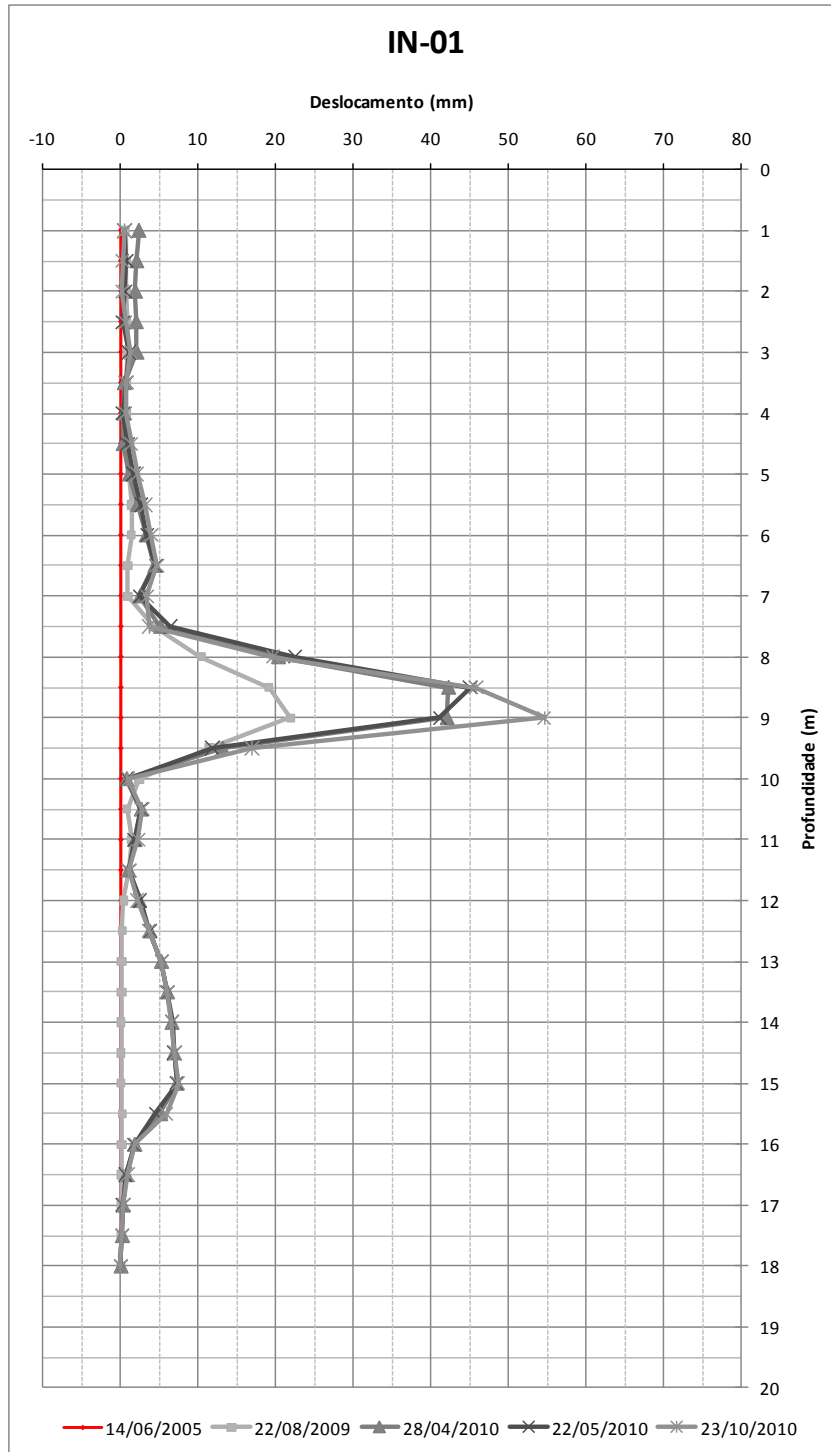


Figura 22: resultante dos deslocamentos medidos nos dois eixos do inclinômetro IN 01

### 6.3.3 Piezômetros

Foram implantados dois piezômetros do tipo Casagrande com a possibilidade de leitura em dois níveis distintos – PZ 01 e PZ 02 – e três piezômetros do tipo Casagrande simples – PC 01, PC 02 e PZ 03 – para a verificação do nível d'água no interior da massa coluvionar. A locação destes dispositivos pode ser vista na figura 20 já apresentada.

Os piezômetros com leitura em dois níveis foram posicionados de forma a viabilizar a leitura dos níveis piezométricos existentes nos limites inferior e superior da camada onde, através das leituras realizadas nos anos de 2005 e 2009 foram verificados os maiores deslocamentos. Porém, através das leituras seguintes dos piezômetros, não se constatou a existência de um confinamento do nível d'água abaixo da camada de base do colúvio, injustificando a necessidade de leitura em dois níveis.

De forma geral, os níveis piezométricos não apresentavam variações significativas nas leituras manuais, então se optou por automatizar as leituras de poro-pressão em dois dos piezômetros instalados através do uso de transdutores de pressão, os quais realizam leituras de maneira automática e em intervalos de tempo pré-determinados, sendo que estas leituras são armazenadas no próprio equipamento. A instalação foi realizada no piezômetro PZ 01, com ponta porosa localizada na massa coluvionar a uma profundidade entre 7,6 e 8,5 m e no piezômetro PZ 02, com ponta porosa localizada no solo residual da base do colúvio a uma profundidade entre 9,5 e 10,5 m. As leituras iniciaram-se em 23 de outubro de 2010 e se estenderam até 10 de março de 2011. A figura 23 apresenta as leituras realizadas no piezômetro PZ 01 para o período.

Durante o período em que foi realizado o monitoramento piezométrico também foram monitoradas as precipitações ocorridas na região através dos dados disponibilizados pela Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul para o município de Três Coroas, apresentadas na figura 24. O equipamento de medição utilizado para a obtenção da pluviometria pelo Corpo de Bombeiros de Três Coroas situa-se a, aproximadamente, 5 km do colúvio, como pode ser visto da figura 25.



Figura 23: dados obtidos das leituras realizadas pelo sistema automático de aquisição de dados de poro-pressão instalado no piezômetro PZ 01

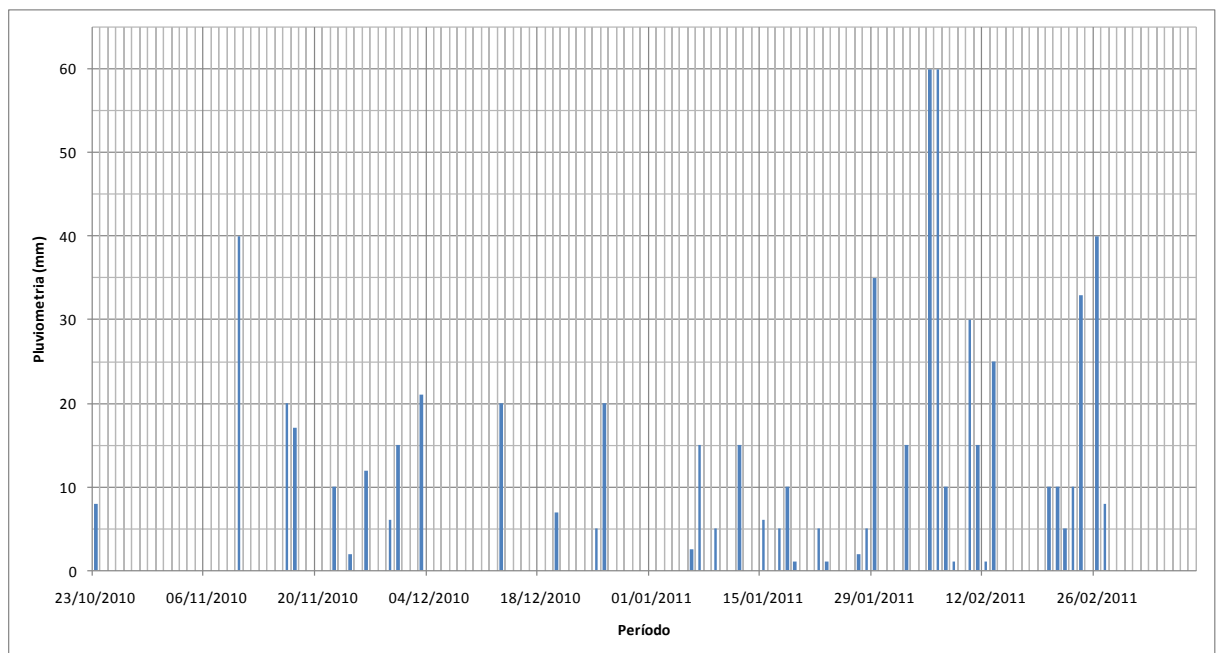


Figura 24: dados de pluviosidade acumulada em 24 horas (RIO GRANDE DO SUL; DEFESA CIVIL, 2011)

Após a análise dos resultados, mesmo sendo estes deficientes, por não representarem na amostragem um período chuvoso anual completo e pela distância entre os pontos de leitura da pluviometria e da piezometria, pode-se concluir que os níveis freáticos do colúvio são regidos

prioritariamente por descargas de aquíferos regionais que afloram junto ao pé dos derrames basálticos situados a montante da encosta, tendo as precipitações locais, apenas um papel coadjuvante na definição desses níveis (NICHEL, 2011).

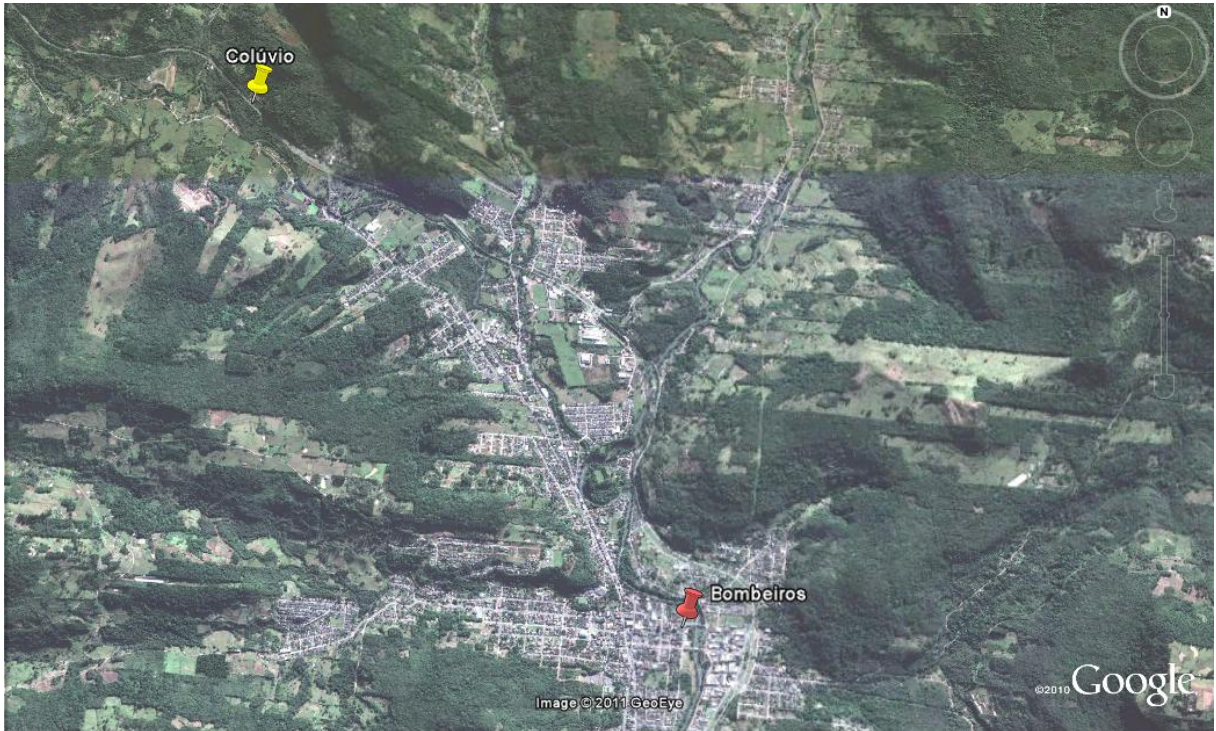


Figura 25: localização da sede do Corpo de Bombeiros do município de Três Coroas em relação ao colúvio em estudo (GOOGLE EARTH, 2011)

## 7 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Para a realização deste trabalho houve a retomada e aprofundamento dos estudos na área com a execução de análises em laboratório complementares. Para isto foram retiradas cinco amostras indeformadas da massa coluvionar. As coletas foram feitas a partir da extração de anéis do próprio ensaio de cisalhamento direto, que seria posteriormente executado.

O local escolhido para a coleta situa-se em uma das trincas de tração que o colúvio apresenta, próximo ao inclinômetro IN 01, sendo uma área bastante superficial, com aproximadamente 1 m de solo sobre o local exato da coleta das amostras. Imagem do local e da extração pode ser vista na figura 26. Também foram coletadas amostras deformadas do solo na mesma localidade para os ensaios de caracterização. Neste capítulo são apresentados estes ensaios e os resultados através deles obtidos.



Figura 26: local e procedimento da coleta de amostras indeformadas

## 7.1 GRANULOMETRIA

A granulometria é caracterizada pela distribuição da curva granulométrica que apresenta determinado material, sendo que esta pode ser feita por peneiramento, sedimentação ou ambos. Utiliza-se o peneiramento para a determinação da distribuição granulométrica das partículas maiores de 0,075 mm e a sedimentação quando as partículas apresentam tamanhos inferiores a este.

Para a confecção da curva granulométrica, o material retirado do colúvio foi secado ao ar livre, destorroado e submetido aos dois procedimentos: peneiramento e sedimentação, conforme NBR 7181/1984. Foram obtidas duas curvas granulométricas, mostradas na figura 27, com e sem a adição de agente defloculante na sedimentação, e o quadro 4, que apresenta a quantidade média de materiais encontrados nas duas amostras ensaiadas. Nota-se que a influência do defloculante não é significativa no resultado das curvas granulométricas.

Segundo a classificação da USCS o solo se enquadra como SC, areia argilosa, e segundo a classificação de acordo com a HBR o solo corresponderia à nomenclatura A-2-7, solos granulares, com graduação irregular e pouco material fino, porém plástico.

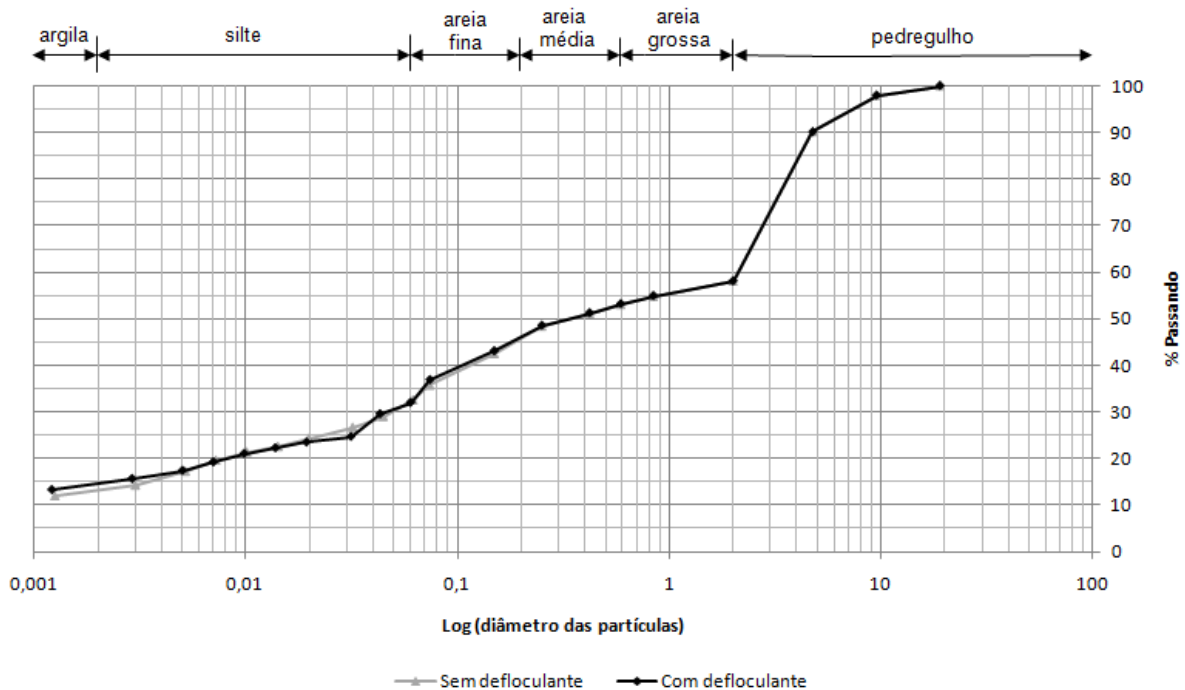


Figura 27: curvas granulométricas

Granulometria	%
Pedregulho	42
Areia	26
Silte	17
Argila	15

Quadro 4: porcentagem média dos materiais encontrados nas amostras

## 7.2 LIMITES DE ATTERBERG

O método de avaliação da sensibilidade do material ao teor de umidade, Limites de Atterberg, demarca quatro estados – líquido, plástico, semi-sólido e sólido – e três limites – de liquidez, plasticidade e contração – que definem a consistência do mesmo. Para a amostra foram encontrados somente os limites de liquidez e plasticidade do solo, no intuito de obter o índice de plasticidade, intervalo no qual o solo sofre deformações sem a ocorrência apreciável de variação volumétrica.

O limite de liquidez foi realizado através do método de Casagrande, seguindo os preceitos da NBR 6459/1984. Os resultados obtidos geraram a reta da figura 28, utilizada para encontrar o percentual de umidade que fixa o limite de liquidez.

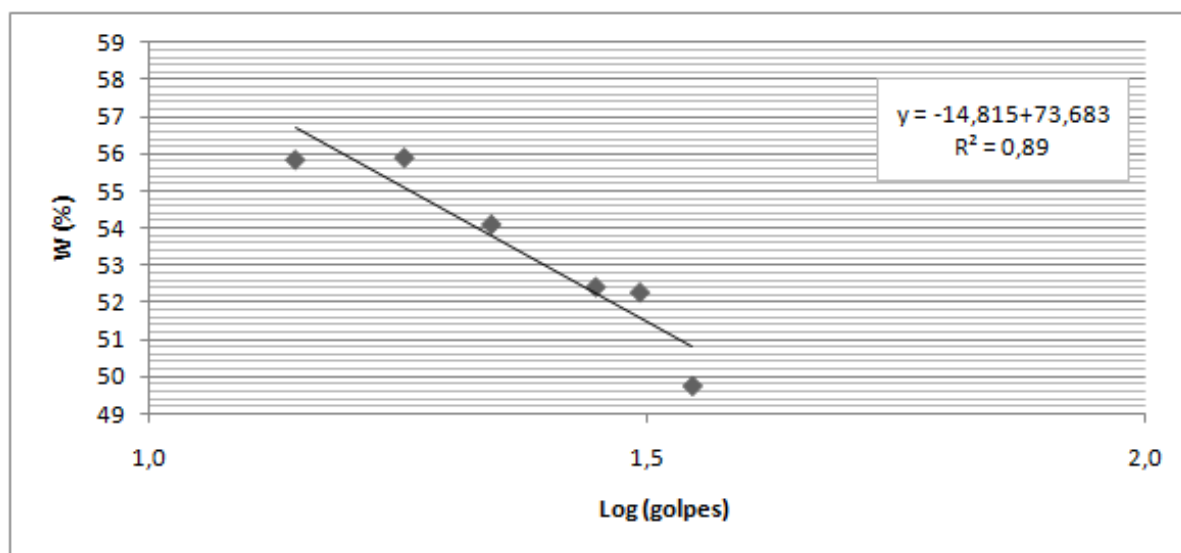


Figura 28: gráfico utilizado na definição do limite de liquidez

O limite de plasticidade foi encontrado obedecendo ao método da NBR 7180/1984 fazendo-se a média do percentual de umidade das seis amostras ensaiadas. Definidos estes dois limites,



pode-se verificar a plasticidade do material através do valor do índice de plasticidade. Os resultados são mostrados no quadro 5.

Limite de Plasticidade (%)	33
Limite de Liquidez (%)	53
IP	20

Quadro 5: valores obtidos com o ensaio de limites de Atterberg

### 7.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em três amostras indeformadas coletadas do colúvio e talhadas em anéis metálicos com 6 cm de diâmetro e 2 cm de altura. Após a montagem na caixa de cisalhamento, cada corpo de prova foi adensado com tensão normal de 50 kPa por aproximadamente 20 min. Em seguida, a caixa era inundada com água destilada e o adensamento prosseguia até que as deformações apresentadas pelos corpos de prova se estabilizassem.

Ao final deste processo, iniciava-se o cisalhamento propriamente dito, onde se aplicaram tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Estas tensões foram escolhidas por representarem as tensões geostáticas previstas em campo.

O ensaio é realizado a velocidade constante e suficientemente baixa para garantir a dissipação de eventuais excessos de poro-pressão. A velocidade utilizada foi de 0,00064 pol/min ou 0,016 mm/min. Os ensaios decorreram até que o deslocamento horizontal atingisse 6 mm, desta forma os ensaios tinham uma duração total de aproximadamente 6,6 horas. Todos os dados foram coletados automaticamente com equipamentos disponíveis no laboratório LAGEOtec da UFRGS.

As amostras apresentaram um índice de vazios inicial médio de 1,28 e peso específico aparente úmido de 16,4 kN/m<sup>3</sup>. O quadro 6 mostra os resultados individuais desses parâmetros para cada amostra.

Amostra	$e_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
50 kPa	1,35	15,69
100 kPa	1,18	17,04
200 kPa	1,31	16,37

Quadro 6: índice de vazios e peso específico obtidos das amostras ensaiadas

Neste ensaio são medidos a força de cisalhamento no plano de ruptura imposto ao corpo de prova pela divisão da célula, o deslocamento horizontal entre as partes superior e inferior da célula e o deslocamento vertical do cabeçote de carga durante o ensaio. Um dos gráficos resultantes deste ensaio determina a envoltória de resistência ao cisalhamento do material, apresentada na figura 29, que contem as tensões mais elevadas registradas durante os ensaios. A partir deste gráfico encontrou-se a coesão do material, com valor de 3,5 kPa, e o valor de ângulo de atrito de 31,5°.

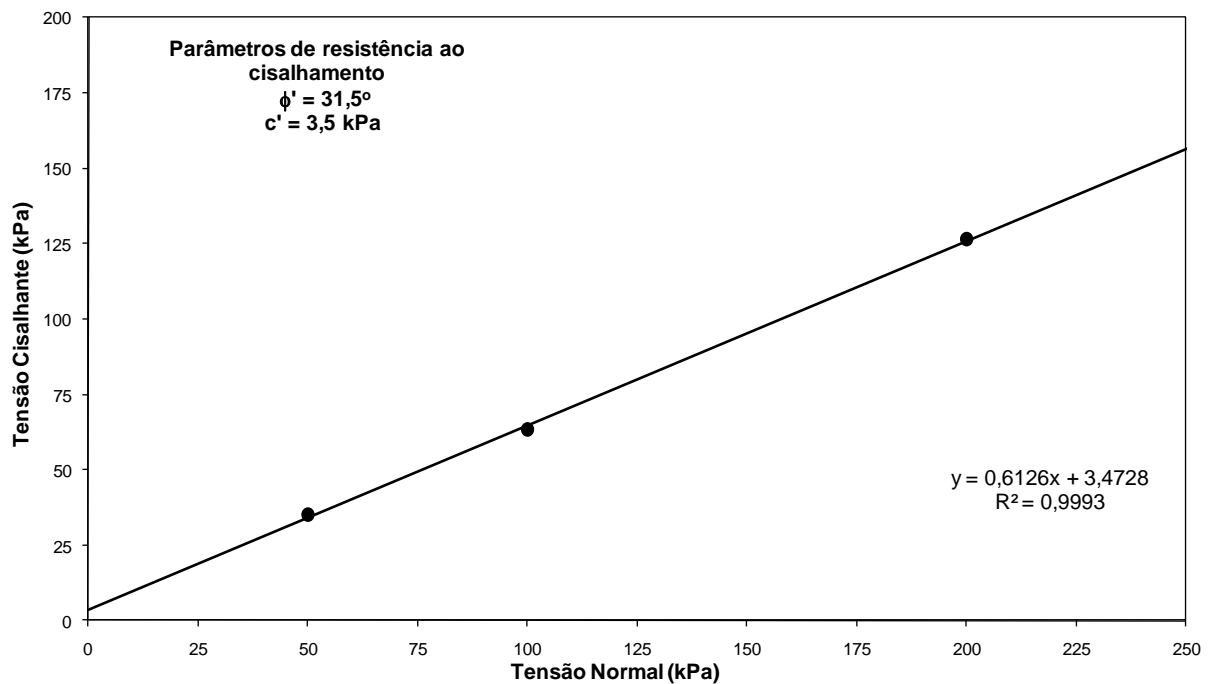


Figura 29: envoltória de resistência ao cisalhamento

Outro gráfico obtido dos ensaios mostra, na figura 30, a variação do deslocamento horizontal pela tensão cisalhante aplicada para os três níveis de tensões normais. Nenhuma das amostras apresenta pico de resistência nesta trajetória. Já o gráfico apresentado na figura 31, exibe a relação do deslocamento horizontal com o deslocamento vertical ocorrido nos corpos de prova. Analisando-se estes resultados pode-se perceber que todos apresentam um

comportamento de contração durante este processo, sendo que a amostra submetida à tensão de 100 kPa apresenta uma contração menor do que a submetida à tensão de 200 kPa. Isto é explicado pelo menor índice de vazios apresentado pelo corpo de prova submetido à tensão de 100 kPa.

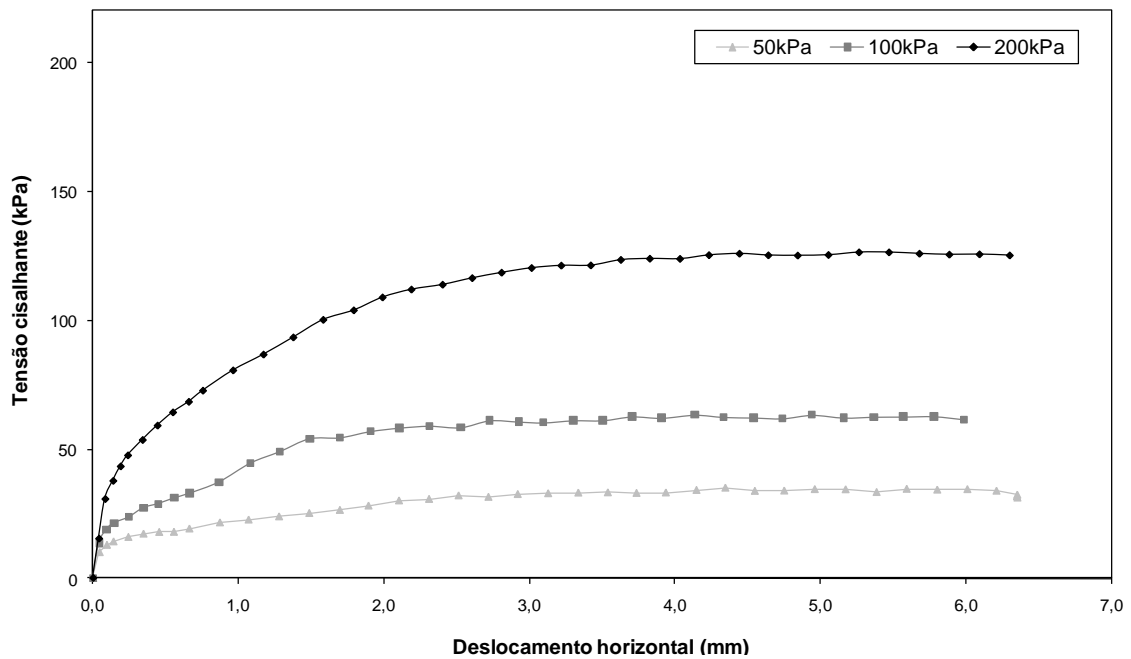


Figura 30: gráfico do deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante para os diferentes níveis de tensões aplicados

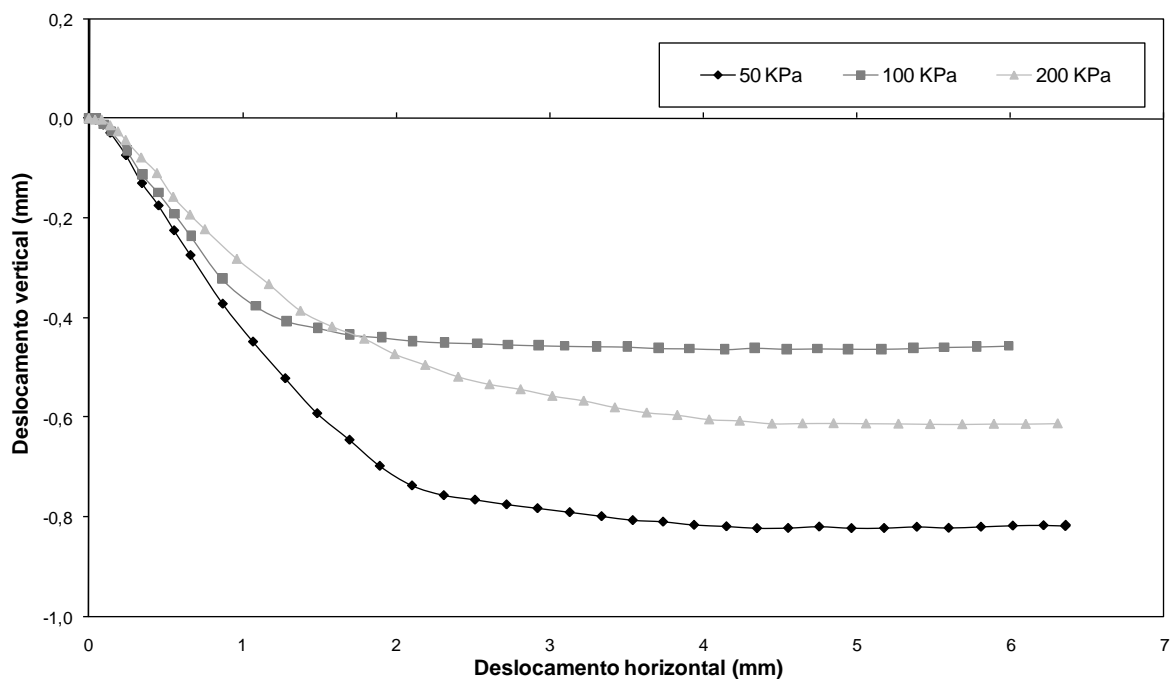


Figura 31: gráfico do deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical para os diferentes níveis de tensões aplicados

## 8 ANÁLISES COMPUTACIONAIS

Este capítulo trata, principalmente, das análises numéricas empregadas para prever o comportamento do talude. Primeiramente, aborda-se brevemente a análise paramétrica realizada na dissertação **Diagnóstico, Monitoramento e Concepção de Medidas de Estabilização do Colúvio do km 23+400 da rodovia RS/115** (NICHEL, 2011), e se faz uma comparação com os resultados obtidos do ensaio de cisalhamento direto das amostras indeformadas da massa coluvionar, que, à época, não se tinha acesso. Após, passa-se a focar a resposta do colúvio à solução de estabilização sugerida com a inserção desses novos dados e das considerações de anisotropia do solo e de ocorrência de camadas de materiais diferentes, também não consideradas anteriormente.

### 8.1 ANÁLISE DA PROPOSTA DE ESTABILIZAÇÃO

Nichel (2011) realizou uma análise paramétrica de estabilidade aplicando o método proposto por Spencer, em 1967, com o uso do programa SLOPE/W. A mesma análise será realizada novamente neste trabalho, acrescentando-se os dados obtidos nessa pesquisa, para verificar esta análise anterior e a estabilidade do colúvio.

O autor analisou a seção corresponde ao perfil geológico apresentado na figura 21, do capítulo 6. Para a camada de base do colúvio, foram utilizados os parâmetros de coesão e ângulo de atrito residual verificados através de ensaios *Ring Shear* realizados em uma amostra de base do colúvio. Foram empregados, ainda, os níveis máximos de piezometria verificados no monitoramento realizado. Os parâmetros de resistência das demais camadas de solo foram obtidos pelo processo de retroanálise tendo como base valores apresentados pela literatura.

Na análise paramétrica, mostrada na figura 32, o autor estudou superfícies circulares e não circulares, sendo que as superfícies não circulares foram as que apresentaram menores parâmetros de resistência. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos pela retroanálise são apresentados no quadro 7.

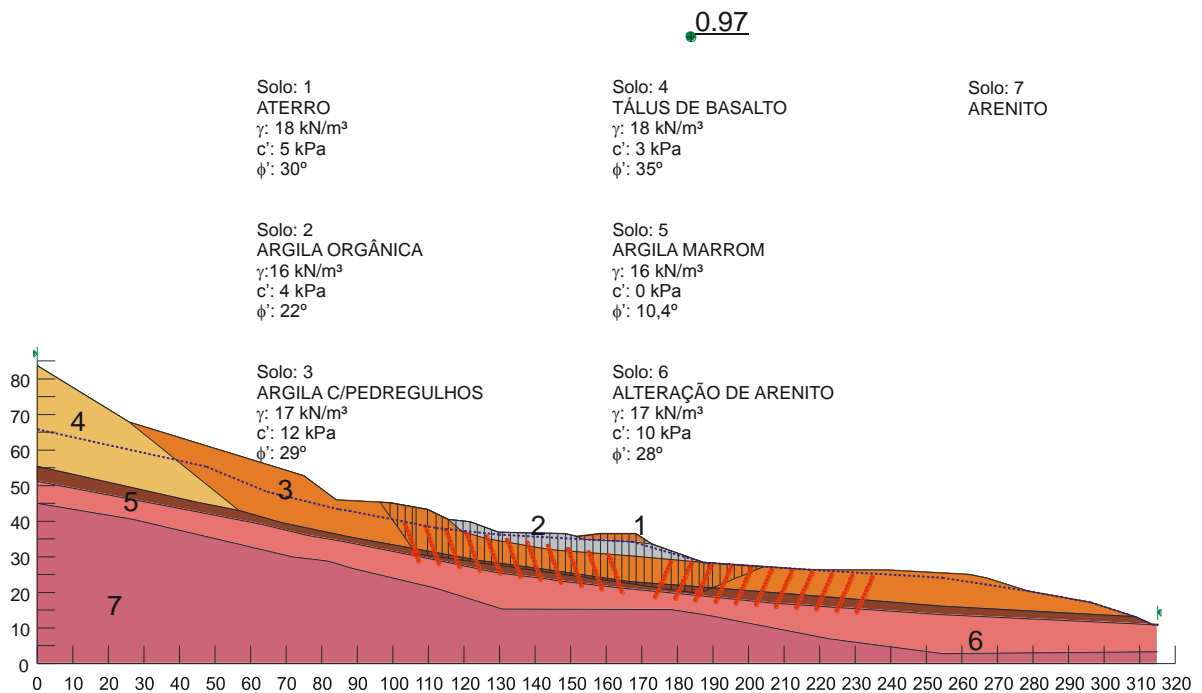


Figura 32: resultado gráfico da análise paramétrica realizada (NICHEL, 2011)

MATERIAL	PARÂMETROS		
	c' (kPa)	$\phi$ ' (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Aterro rodoviário	5	30	18
Argila orgânica cinza	4	22	16
Pedregulhos com argila variando para argila com pedregulhos	<b>12</b>	<b>29</b>	<b>17</b>
Tálus de basalto	3	35	18
Alteração de basalto/arenito	10	28	17
Camada argilosa da base do colúvio cor marrom (parâmetros residuais)	<b>0</b>	<b>10,4</b>	<b>16</b>

Quadro 7: parâmetros estimados dos solos locais a partir de retroanálise parametrizada pelo uso dos parâmetros obtidos no ensaio *Ring Shear* para a camada argilosa da base do colúvio (NICHEL, 2011)

O solo, definido como **pedregulhos com argila variando para argila com pedregulhos**, representa grande e importante parte da análise do comportamento do talude, e, através dos resultados das análises em laboratório nas amostras indeformadas deste solo, pode-se observar que os dados obtidos através da retroanálise não foram totalmente confirmados pelo ensaio de cisalhamento direto descrito no item 7.3. O valor do ângulo de atrito se aproximou bastante do

encontrado pelas análises laboratoriais, de  $31,5^\circ$ , porém a coesão resultou em um valor de 3,5 kPa, abaixo do esperado.

Este menor valor de coesão pode implicar na instabilidade da massa coluvionar. Na pesquisa de Nichel (2011), o autor demonstrou que era possível atingir a estabilidade do colúvio se houvesse o rebaixamento do nível de água no terreno. A figura 33 mostra o resultado da análise feita considerando este rebaixamento e o resultado positivo, atingindo um fator de segurança igual a 1,33.

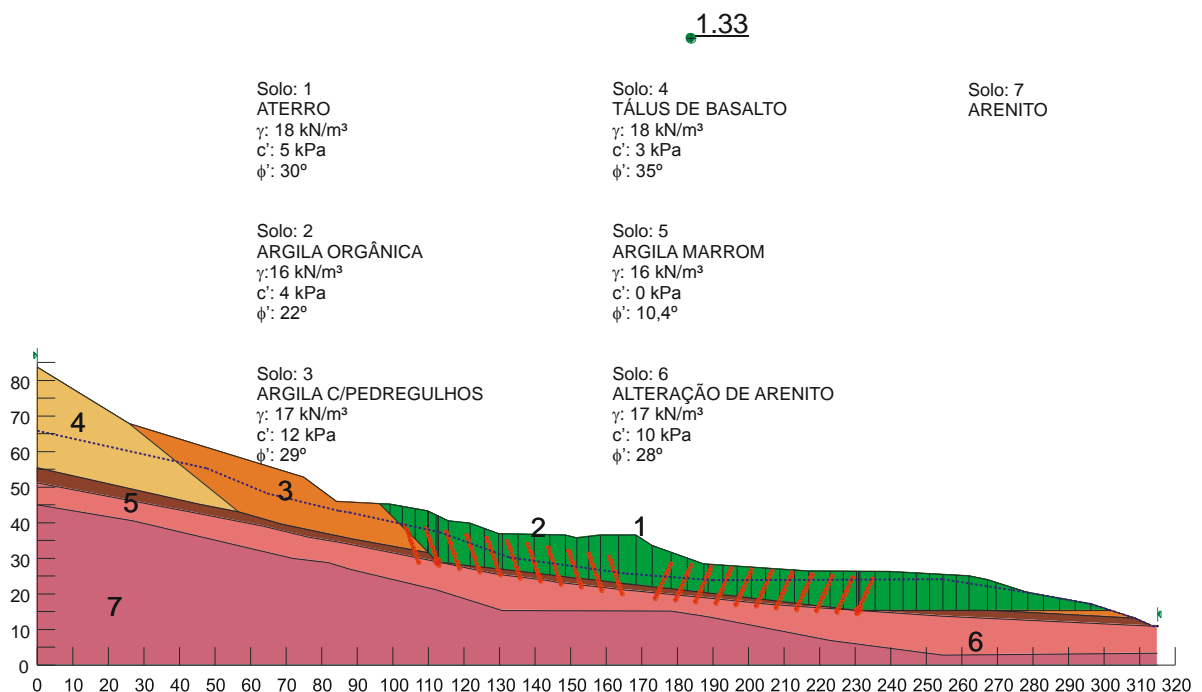


Figura 33: retroanálise resultante do rebaixamento do nível de água no terreno (NICHEL, 2011)

Nichel (2011) sugeriu uma forma de estabilização para o material que consiste no emprego de um sistema de drenos sub-horizontais dispostos em três níveis e radialmente a um poço para a coleta das águas e posterior deságue das mesmas, propiciando assim o rebaixamento do nível freático necessário a estabilidade da encosta. A figura 34 mostra um esquema da medida de estabilização sugerida. Esta proposta considerou a massa coluvionar como homogênea e isotrópica.

Entretanto, devido aos processos de formação do colúvio, a possibilidade de que se observem diferenças entre a condutividade hidráulica vertical e a horizontal é bastante grande, sendo

sempre a condutividade horizontal maior do que a vertical. Também é possível a ocorrência de estratos de materiais com coeficientes de condutividade diferentes entre si, o que pode influenciar na resposta ao sistema de drenagem e, portanto, na estabilidade do colúvio.

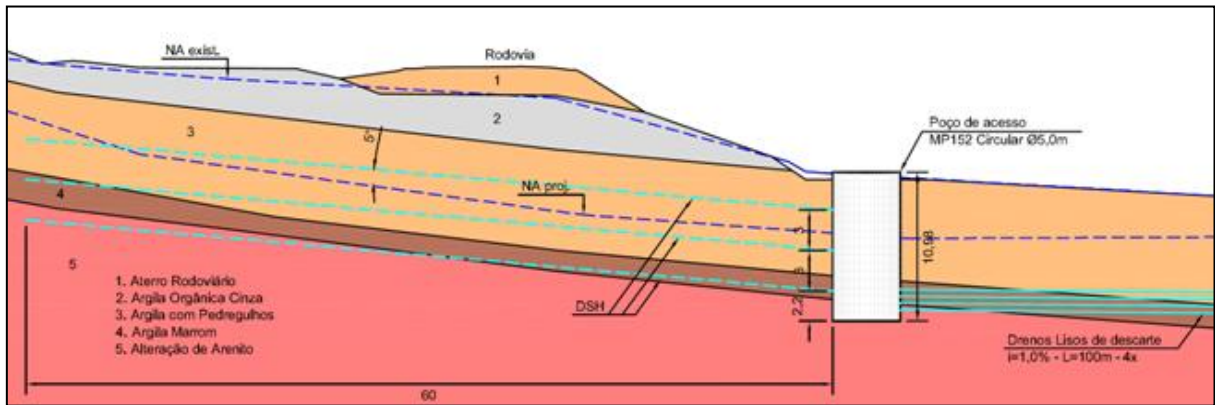


Figura 34: esquema da medida de estabilização sugerida (NICHEL, 2011)

Na tentativa de identificar a existência de estratos no corpo do colúvio, combinaram-se os resultados das sondagens SPT com a porcentagem de umidade medida nas amostras dos testemunhos. Porém, devido à qualidade destas amostras tornou-se bastante difícil a identificação clara da mudança de materiais. Um testemunho obtido nas sondagens é mostrado na figura 35.



Figura 35: testemunho de sondagem

Assim, apenas uma possível camada de material mais permeável foi passível de ser identificada na massa coluvionar. Contudo, apesar de não se ter evidências concretas da existência de outros estratos, também foi considerada nas análises uma seção com a presença de duas camadas mais permeáveis no interior da massa coluvionar para aumentar os efeitos gerados pela presença de tais estratos. Então, definiram-se as seções para análise, apresentadas nas figuras 36 a 38, da seguinte forma:

- a) seção 1: massa coluvionar homogênea, sem presença de estratos;
- b) seção 2: massa coluvionar com presença de um estrato mais permeável, observado nas sondagens SPT;
- c) seção 3: massa coluvionar com a presença de dois estratos mais permeáveis, um observado nas sondagens SPT e outro inferido.

Acrescentando-se a isso a possibilidade de ocorrência de anisotropia em relação aos valores de condutividade hidráulica vertical ( $k_v$ ) e horizontal ( $k_h$ ) foram analisadas quatro possibilidades para a relação  $k_h/k_v$ :

- a)  $k_h/k_v = 1$ ;
- b)  $k_h/k_v = 10$ ;
- c)  $k_h/k_v = 20$ ;
- d)  $k_h/k_v = 40$ .

A escolha desses valores deveu-se à possibilidade de se observarem diferenças entre os coeficientes de condutividade hidráulica horizontal e vertical, optando-se por valores razoáveis até valores mais exagerados, para a verificação dos efeitos desta escolha no caso estudado. Para todas as razões foram realizadas análises empregando-se a seção 1, solo homogêneo. Já as seções 2 e 3 foram somente empregadas para as relações de  $k_h/k_v = 1$  e  $k_h/k_v = 20$ .

Pode-se observar, em todas as seções, a presença do poço de coleta de água e os drenos sub-horizontais dispostos em três níveis, mostrado com detalhe na figura 39, e também alguns ajustes na geometria da seção, como a redução da ocupação do material **tálus de basalto** e também a restrição da camada de argila na base do colúvio, que não se estende até o final da seção (lado esquerdo). Estas mudanças foram julgadas necessárias para uma melhor representação do problema.



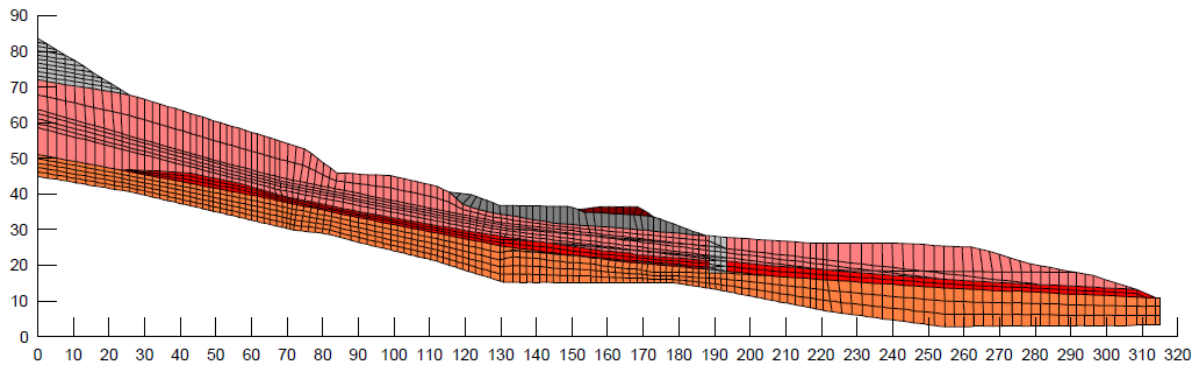


Figura 36: seção tipo 1 – solo homogêneo

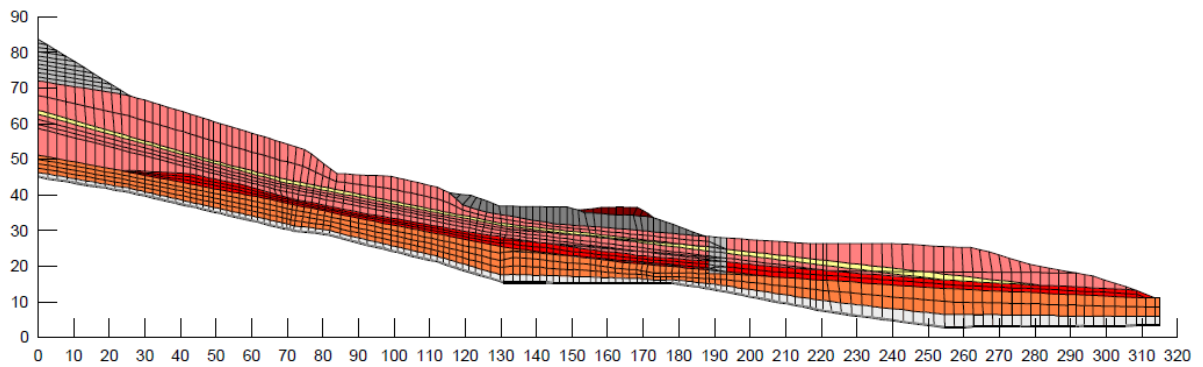


Figura 37: seção tipo 2 – estratos definidos a partir dos ensaios SPT

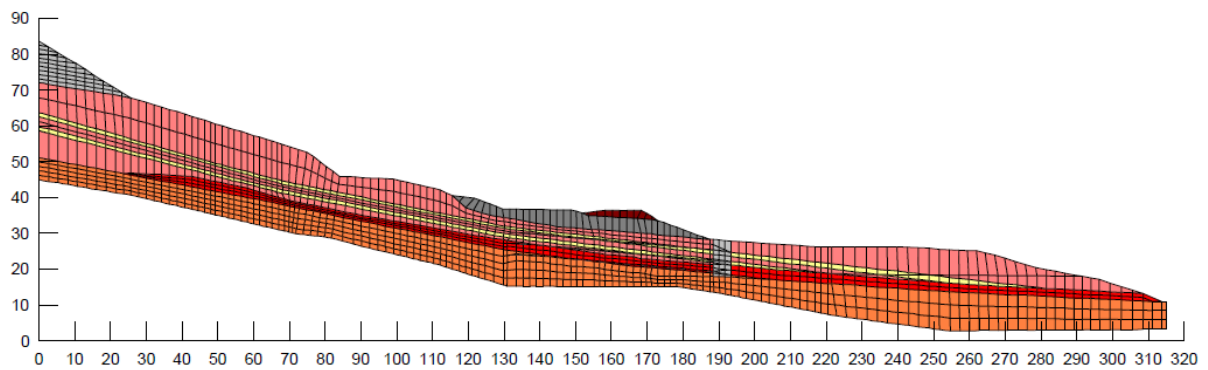


Figura 38: seção tipo 3 – estratos inferidos

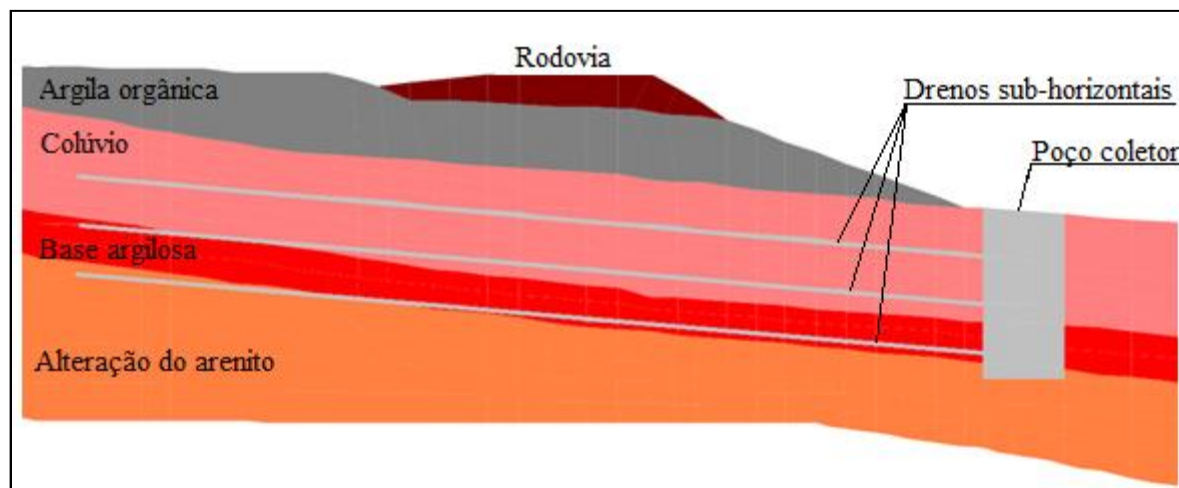


Figura 39: detalhe do sistema de drenagem

## 8.2 ANÁLISE DO REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA

Definidas as seções, a geometria e as condições do problema, empregou-se o programa SEEP/W para a análise do rebaixamento do nível de água no terreno. Inicialmente foi definida a malha de elementos finitos, usando-se preferencialmente a malha quadrangular quando possível, acompanhando as interfaces dos materiais e diferenciando os materiais encontrados. Também foram implantados o sistema de drenagem, composto pelo poço de coleta de água e os drenos sub-horizontais, e o nível máximo de água verificado no terreno através dos piezômetros.

Os parâmetros empregados nestas análises foram somente os valores de condutividade hidráulica horizontal e vertical, e são esses parâmetros que diferenciam os materiais. Também foi considerado que estes valores se mantinham constantes em todo o material, independente do nível de tensão atuante. O quadro 8 mostra os coeficientes de condutividade horizontal adotados.

No programa entra-se com valores de  $k_x$ , condutividade horizontal, e a relação  $k_h/k_v$  (ou  $k_x/k_y$ ). Para o problema ainda foi considerado que os eixos  $x$  e  $y$  estavam rotacionados em  $7^\circ$  horários, portanto eles se encontram levemente inclinados, acompanhando a inclinação média do terreno.

Como condições de contorno foram definidos elementos que mantinham o aporte de água no colúvio, com o nível de água na condição observada nos piezômetros, através do limite

esquerdo e inferior da seção. O modelo foi validado ao se observar que, retirando-se o sistema de drenagem da seção, o nível d'água se mantinha bem próximo à condição inicial.

MATERIAIS	$k_x$ (cm/s)
Aterro rodoviário	$10^{-7}$
Argila orgânica	$10^{-7}$
Massa coluvionar	$10^{-5}$
Estrato pedregulhoso	$10^{-3}$
Tálus	1
Alteração arenito	$10^{-4}$
Base do colúvio	$10^{-8}$
Material drenante	$10^{-2}$

Quadro 8: coeficientes de condutividade horizontal adotados

Assim, os resultados obtidos através das análises mostraram que a consideração de camadas mais pedregulhasas no colúvio colabora com o sistema de drenagem ao atenuar a linha do nível d'água. Por outro lado, a anisotropia quanto ao coeficiente de condutividade hidráulica, fez o nível d'água, e a pressão por ela exercida, apresentarem-se mais elevados em comparação com os demais casos estudados. De um modo geral as mudanças observadas foram bastante tênues.

As figuras 40 a 42 mostram os resultados mais importantes dessas análises. Em todas elas pode-se perceber a existência de pressão, ainda que muito baixa, entre os tubos dos drenos sub-horizontais. Este é um erro apresentado pelo programa que, entretanto, não interferiu de modo expressivo na análise do problema.

Todas as seções apresentaram um alívio das pressões e um rebaixamento no nível d'água em torno do sistema de drenagem. A figura 41, considerando a presença de camadas mais pedregulhasas e solo isotrópico quanto ao coeficiente de permeabilidade, apresentou os melhores resultados ao diminuir o nível d'água a montante do sistema de drenagem, sendo que este nível é controlado pelo dreno mais elevado.

A figura 40, que representa o solo isotrópico quanto ao coeficiente de permeabilidade e homogêneo (sem estratos pedregulhasos), apresentou a situação mediana em relação ao rebaixamento do nível de água, porém com o diferencial de que o nível é controlado pelo

dreno médio, localizado entre os outros dois drenos. Isto significa que o dreno mais elevado, nesta situação de equilíbrio, não estará mais drenando água para o poço.

Já a figura 42, representando o solo homogêneo com razão de coeficiente de condutividade hidráulica  $k_h/k_v = 40$ , apresentou a pior situação, registrando as maiores pressões e o maior nível de água, que, em um trecho, coincide com a linha do terreno, com pressão maior que zero, sugerindo um afloramento d'água. Constata-se que, podendo a água fluir com maior facilidade horizontalmente que verticalmente, o rebaixamento do nível de água é dificultado.

A situação analisada por Nichel (2011) se aproxima mais dos resultados obtidos na seção da figura 40, solo homogêneo, sendo que a pior situação encontrada foi a da figura 42 considerando a anisotropia da condutividade hidráulica com valor de 40. Devido a isso, somente estas duas seções foram analisadas, quanto à estabilidade, no programa SLOPE/W.

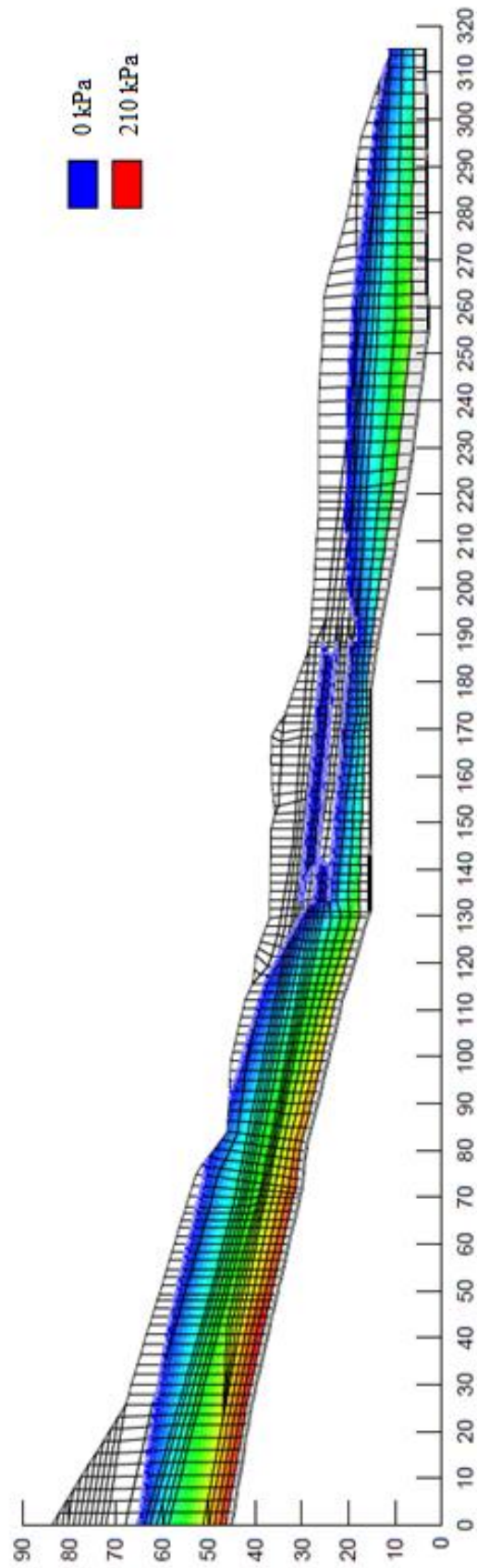


Figura 40: pressão de água no colúvio seção tipo 1 e  $kh/kv = 1$

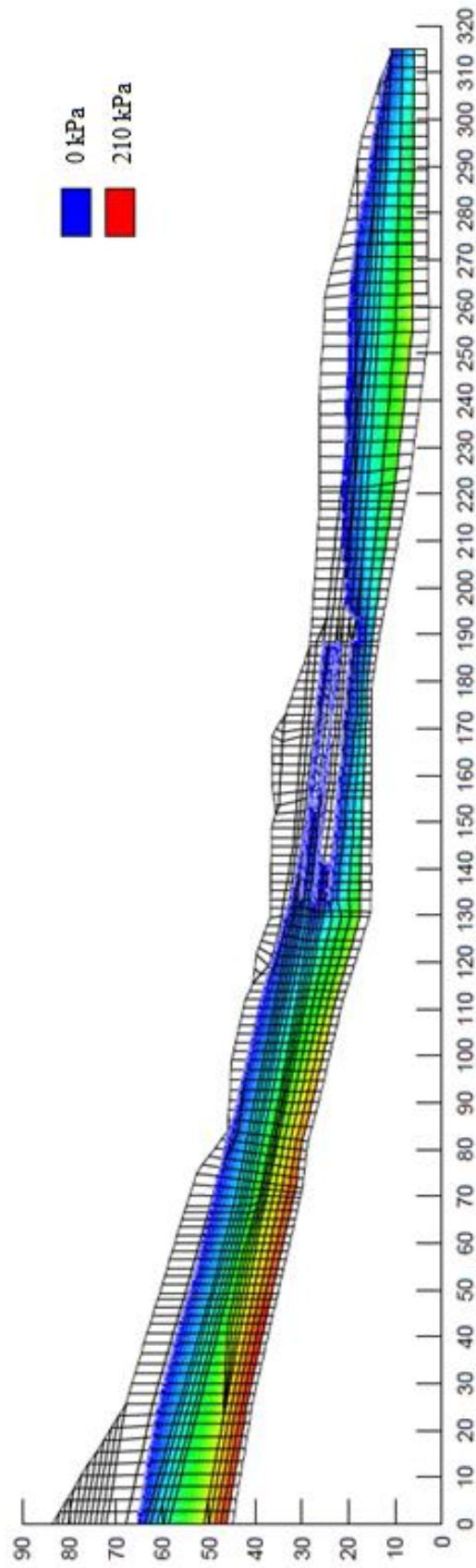


Figura 41: pressão de água no colúvio seção tipo 3 e  $kh/kv = 1$

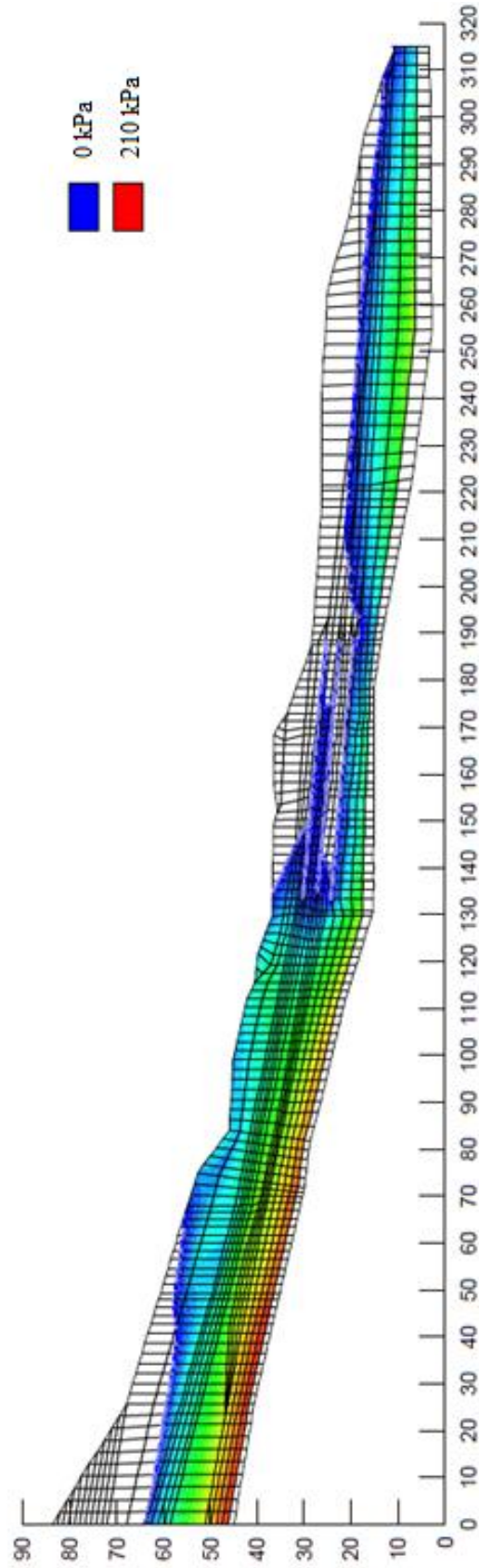


Figura 42: pressão de água no colúvio seção tipo 1 e  $kh/kv = 40$

### 8.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a análise de estabilidade das seções foi utilizado o programa SLOPE/W, que é baseado na teoria de equilíbrio limite, para o cálculo do fator de segurança de taludes. O método empregado foi o de Spencer, apresentado em 1967, por ser um método rigoroso que possibilita a melhor avaliação dos resultados, especialmente porque admite a ocorrência de uma superfície de ruptura qualquer, não necessariamente circular, sendo importante em perfis de solo que apresentam zonas de fraqueza, as quais atraem a superfície de ruptura para estas regiões.

Como citado anteriormente, as seções analisadas correspondem ao solo homogêneo isotrópico e ao solo homogêneo com anisotropia de razão kh/kv 40 vezes. Foi feita esta escolha visto que estas seções representam a seção tipo analisada por Nichel (2011) e a seção tipo de maior nível d'água apresentado nas análises, através do programa SEEP/W, respectivamente.

Os parâmetros dos solos componentes do modelo foram praticamente mantidos os mesmo dos utilizados por Nichel (2011) em sua dissertação, com exceção óbvia do material coluvionar considerado como **pedregulhos com argila variando a argila com pedregulhos**, os quais foram utilizados os resultados obtidos em laboratório e exibidos no item 7.3. O quadro 9 mostra o resumo destes dados.

Transferindo os resultados de pressão de água obtidos pelo programa SEEP/W para o programa SLOPE/W pode-se verificar a estabilidade da encosta considerando a implantação do sistema de drenagem. Nestas análises não se implantou o poço de drenagem e os drenos sub-horizontais como parte do modelo, mas somente o resultado deles, expresso através do rebaixamento do nível de água.

Nas análises se pretendia atingir um fator de segurança mínimo de 1,3, definido através dos preceitos da NBR 11682/2009, considerando-se que a rodovia é de tráfego moderado, portanto, de médio risco quanto à perda de vidas humanas e de baixo risco ambiental.



MATERIAL	PARÂMETROS		
	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Aterro rodoviário	5	30	18
Argila orgânica	4	22	16
Massa coluvionar	<b>3,5</b>	<b>31,5</b>	<b>16,4</b>
Tálus de basalto	3	35	18
Alteração de arenito	10	28	17
Camada argilosa da base do colúvio	<b>0</b>	<b>10,4</b>	<b>16</b>

Quadro 9: parâmetros utilizados na análise de estabilidade

O fator de segurança obtido na seção isotrópica e homogênea foi da ordem de 1,41. A figura 43 mostra este resultado e a provável superfície de ruptura, que coincide com a camada de base do colúvio. Esta camada resiste aos esforços instabilizantes através da resistência residual, representando um ponto de fragilidade do talude.

1.41

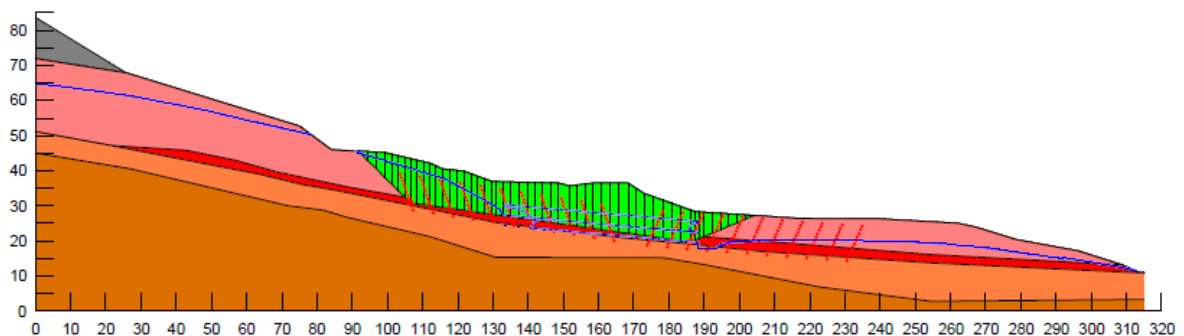


Figura 43: resultado da análise de estabilidade para o solo homogêneo isotrópico

Já a análise considerando o solo homogêneo e anisotrópico com relação à condutividade hidráulica vertical e horizontal, resultou em um fator de segurança no valor de 1,32, como

mostra a figura 44. A provável superfície de ruptura, nas duas seções, se apresenta translacional, típica deste tipo de geometria onde a profundidade do material, comparada com o comprimento da seção, é pequena.

1.32

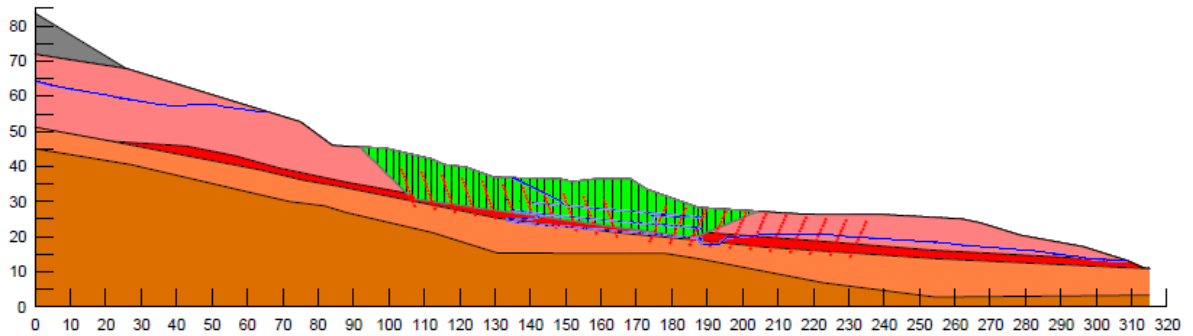


Figura 44: resultado da análise de estabilidade para o solo homogêneo anisotrópico  
 $kh/kv = 40$

## 9 CONCLUSÃO

Com relação à amostra analisada do material do colúvio, a granulometria mostrou que a utilização do agente defloculante na sedimentação do material não possui influência, o que indica que não existem partículas agregadas na amostra, que poderiam reduzir a plasticidade e influenciar o comportamento mecânico do solo. As classificações realizadas, segundo a USCS e HBR, entram em acordo ao classificar o solo como granular com presença de argila plástica. Esta classificação evidencia o que foi demonstrado pelo ensaio de Limites de Atterberg, que identifica o material do colúvio como plástico devido ao seu valor de índice de plasticidade.

Os ensaios de cisalhamento direto revelaram que o solo das amostras analisadas apresenta uma coesão de 3,5 kPa, e um ângulo de atrito de 31,5°. Também por meio destes ensaios, pode-se perceber o comportamento *strain-hardening* do material evidenciado no gráfico tensão-deformação, que não apresenta um pico de resistência, bem como a tendência à contração das partículas do solo indicando a baixa compactação do mesmo.

A simulação de fluxo, realizada considerando a solução de rebaixamento proposta por Nichel (2011), utilizando-se o programa SEEP/W, permitiu verificar que a possível existência de camadas mais pedregulhosas no colúvio colaboram com o sistema de drenagem à medida que atenuam o nível d'água no terreno, diminuindo as pressões atuantes.

Já na análise considerando a anisotropia dos valores de condutividade hidráulica horizontal e vertical, constatou-se que, com o aumento da relação  $k_h/k_v$ , a redução do nível freático pelo sistema de drenagem diminui. Entretanto, foi verificado que, mesmo essa relação sendo de 40 vezes, a condição do nível freático não conduz a uma situação de instabilidade do talude. Isto se comprova nas análises realizadas no programa SLOPE/W, onde não se identificou situação crítica para os casos analisados.

Assim, considerando as proposições feitas, a alternativa de estabilização dos deslocamentos horizontais do colúvio estabelecida por Nichel (2011) em sua dissertação, com a implantação de um sistema de drenagem profunda com drenos sub-horizontais, apresentou respostas positivas, sugerindo que esta alternativa atenderia ao objetivo proposto.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6502**: rochas e solos – terminologia. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11682**: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- BIANCHINI, M. R. **Estudo da instabilidade de um talude rodoviário em São Jerônimo/RS**. 2000. 108 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BRAND, E. W. Analysis and design in residual soils. In: GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION SPECIALTY CONFERENCE ON ENGINEERING AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, 1982, Honolulu. **Proceedings...** New York: ASCE, 1982. p. 89-143.
- BRESSANI, L. A. Escorregamentos de terra desastrosos: algumas características e possíveis lições para o futuro. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 7., 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, 2010. p. 309-318. 1 CD-ROM.
- BROMHEAD, E. N. **The Stability of Slopes**. 2. ed. London: Taylor & Francis, 1992.
- BURIOL, A. G.; KUINCHTNER, A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**: ciências exatas, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.
- CARREGÃ, D. L.; BALZAN, G. Aspectos do comportamento de encostas argilosas no “Creep”. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. p. 233-242.
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- CORTEZ, H. Estudo do IPT indica as áreas de risco para o Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. **Ecodebate: Cidadania & Meio Ambiente**, 2011. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2011/03/29/estudo-do-ipt-indica-as-areas-de-risco-para-o-aquifero-guarani-no-estado-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 9 abr. 2011.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. **TRB Special Report: Landslides: investigation and mitigation**, Washington DC, n. 247, p. 36-75, June 1996.

DALLA ROSA, F. **Efeito do Estado de Tensões de Cura no Comportamento de Uma Areia Artificialmente Cimentada**. 2009. 191 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DEERE, D. V.; PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. In: PAN AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4th, 1971, San Juan. **Proceedings...** San Juan: International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1971. p. 87-170.

FONSECA, A. M. M. C. C.; QUEIROZ, P. E. S.; SILVA, M. C. M. Estabilização de encosta de talus em área urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7., 1982, Recife. **Anais...** São Paulo: ABMS, 1982. p. 41-58.

FREITAS, N. C.; LACERDA, W. A., ALMEIDA, M. S. S.; AMARAL, C. S. Estudos dos movimentos de um colúvio no sudeste brasileiro. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 4., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: ABMS, 2005. p. 465-474.

GOOGLE EARTH. Rodovia RS-115. Documento eletrônico disponibilizado com o ambiente Google Earth Professional. Acesso em: 10 ago. 2010.

\_\_\_\_\_. Município de Três Coroas. Documento eletrônico disponibilizado com o ambiente Google Earth Professional. Acesso em: 30 abr. 2011.

HAUCK, P. Origens e evolução da Serra do Mar. 2009. Disponível em <<http://altamontanha.com/colunas.asp?NewsID=1448>>. Acesso em: 11 jul. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manuais Técnicos em Geociências**: manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro: 1992. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20%20RJ/ManuaisdeGeociencias/Manual%20Tecnico%20da%20Vegetacao%20Brasileira%20n.1.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2010.

\_\_\_\_\_. **Manuais Técnicos em Geociências**: manual técnico de geologia. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Geofísica, 1998. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20%20RJ/ManuaisdeGeociencias/Manual%20Tecnico%20de%20Geologia.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2010.

LACERDA, W. A.; SANDRONI, S. S. Movimentos de massas coluviais. In: MESA REDONDA SOBRE OS ASPECTOS GEOTÉCNICOS DE ENCOSTAS, 1985, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Clube de Engenharia, 1985. p. 1-19.

LACERDA, W. A. Fatigue of residual soils due to cyclic pore pressure variation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12th, 1989, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1989. p. 3085-3087.

\_\_\_\_\_. Comportamento geotécnico de massas coluviais. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 3, 2002, Joinville. **Anais...** Joinville: Palotti, 2002. p. 219-231.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LARA, A. A.; MARQUES, E. A. G.; ALMEIDA, A. C. R. Mapeamento de risco de acidentes associados a escorregamentos – morro da Serrinha. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. p. 837-846.

MOTA, F. S.; BEIRSDORF, F.; GARCEZ, J. R. B. Zoneamento Agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Circular Técnica**, Pelotas, v. 1, n. 50, jun. 1971.

NICHEL, A. **Diagnóstico, monitoramento e concepção de medidas de estabilização do colúvio do km 23+400 da rodovia RS/115**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NIMER, E. Geografia do Brasil: Região Sul. **Climatologia do Brasil**, Rio de Janeiro, v. 2, p. 151-157, 1990.

NUMMER, A. V. **Parâmetros geológico-geotécnicos controladores dos movimentos de massa na rota do sol/ RS 486 – Itati**. 2003. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

PERAZZOLO, L. **Estudo geotécnico de dois taludes da formação Serra Geral, RS**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PINHEIRO, R. J. B.; BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D. A Study on the Residual Shear Strength of two Unstable Slope in the State of Rio Grande do Sul. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. p. 443-452.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. Instrumentação e monitoramento de duas encostas coluvionares na região central do estado do Rio Grande do Sul. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 3, n. 3, p. 15-22, jun. 2003. Disponível em: <[http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Sumario\\_Numero3.htm](http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Sumario_Numero3.htm)>. Acesso em: 20 mar. 2010.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. **Mapa morfológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1989.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001. Disponível em <<http://coralx.ufsm.br/ifcrs/>>. Acesso em: 12 jul. 2010.

RIO GRANDE DO SUL. Defesa Civil. **Índices pluviométricos**. Porto Alegre, 2011. Disponível em <<http://www.defesacivil.rs.gov.br/>>. Acesso em: 19 mar. 2011.

SEEP/W, version 5.14: for finite element seepage analysis. Geo-Slope International, 2002.

SILVA, T. R. M.; NUNES, A. L. L. S.; LACERDA, W. A. Resistência ao cisalhamento de dois solos coluvionares lateríticos através de ensaios de: compressão diametral e cisalhamento direto. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 4., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: ABMS, 2005. p. 193-204.

SCHOFIELD A.; WROTH P. **Critical State Soil Mechanics**. London: McGraw-Hill, 1986.

SKEMPTON, A. W. Long-term Stability of Clay Slopes. **Géotechnique**, London, v. 14, n. 2, p. 77-102, 1964.

SLOPE/W, version 5.14: for slope stability analysis. Geo-Slope International, 2002.

SOARES, J. E. S.; POLITANO, C. F. Deslizamento de massa de solo de grandes dimensões, encosta de Piraquara. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1997. p. 475-484.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. **TRB Special Report: Landslides: analysis and control**, Washington DC, n. 176, p. 11-33, Jan. 1978.

WU, T. H.; RIESTENBERG, M. M.; FLEGE, A. Root properties for design of slope stabilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VEGETATION AND SLOPES: Stabilization, Protection and Ecology, 1994, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1994. p. 52-59.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A.; MARQUES, A. Tectonics and sedimentation of the Paraná basin. In: SIMPÓSIO DO GONDWANA, 1988, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s. n.], 1988.

ZALÁN, P. V.; QUINTAS, M. C. L.; MANTOVANI, M. S. M. Contribuição para o estudo da evolução mecânica da Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1/2, p. 48-73, jan./dez. 1997.