

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM)

**Simulação Numérica e Equilíbrio Limite aplicado a Retroanálise de
Taludes em Mineração de Carvão**

Renan Teixeira Nogueira

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM)

**Simulação Numérica e Equilíbrio Limite aplicado a Retroanálise de
Taludes em Mineração de Carvão**

Renan Teixeira Nogueira
Engenheiro Geólogo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia. Área de concentração: Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa.

Porto Alegre
2016

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa/Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. André Cezar Zingano

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani (PPGEC/UFRGS)

Prof. Dr. Clóvis Gonzatti (DEMIPE/UFRGS)

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe (PPGEM/UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

“If your dreams do not scare you, they are not big enough”

Ellen Johnson Sirleaf

AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer aos meus Pais, Ricardo e Meri Nogueira, por mais uma vez acreditaram e me proporcionarem apoio durante todos os momentos, incluindo este trabalho.

Não posso deixar de citar aqui a minha namorada, Stefanie Isabel Berenguer Juan, tão importante em diversos momentos desta caminhada, conversas, ideias, afeto e sonhos foram compartilhados e realizados.

Gostaria de agradecer ao laboratorista Jair Silva pela dedicação para com minha pesquisa. Obrigado pelas aulas de prática laboratorial, pelas dicas na execução dos ensaios e no tratamento de dados.

Muito obrigado a coordenação e a todos os funcionários do PPGEM por estarem sempre prontos para auxiliar e por fazerem a diferença, sempre comprometidos em manter o bom nível deste programa de pós-graduação.

Gostaria de agradecer a empresa Copelmi, por todo o auxílio que nos foi dado, disponibilizando toda ajuda para coleta do material e obtenção de dados importantes para a realização do trabalho que nos foi cedido.

Expresso meu agradecimento ao Prof. Luiz Antônio Bressani pelas conversas e disponibilidade, sempre disposto a ajudar através de conselhos e debates a cerca do tema.

Por fim gostaria de agradecer a aos companheiros do laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS, em especial ao meu orientador André Cezar Zingano, que me ofereceu a oportunidade de realizar este trabalho, me acolhendo como um amigo e sempre disposto ajudar.

.

RESUMO

A pesquisa voltada para a retroanálise de taludes de mineração está se tornando cada vez mais importante. As dimensões das atuais cavas de mineração visam sempre obter a melhor relação entre custo, benefício e segurança. Isso exige que por vezes o trabalho ocorra próximo destes limites. Neste trabalho o estudo de retroanálise consiste em um talude misto composto por aluvião e rocha em uma mineração de carvão localizada no município de Arroio dos Ratos, RS. O objetivo foi realizar um estudo de retroanálise onde se utilizou dois métodos de análise método dos Elementos Finitos (MEF) e o método do Equilíbrio Limite (EL). A metodologia adotada foi dividida em três fases: uma etapa de campo, para coleta do material e dados geométricos do talude, uma etapa de laboratório para caracterizar todo o material e a última etapa computacional onde foram gerados os modelos e simulações numéricas através dos softwares comerciais da empresa RocScience, sendo eles o SLIDE e o RS2. Os resultados encontrados mostraram que a porção do talude composta por aluvião apresentava seis camadas intercaladas de areias bem graduadas e argilas de média a alta plasticidade. Em relação as simulações, observou uma diferença entre o MEF e EL devido ao grande número de camadas presentes no talude e a interação entre elas. Foram criados quatro diferentes cenários para observar o comportamento do talude, com presença e ausência de água. O MEF mostrou uma superfície de ruptura próxima a encontrada porem com a presença de água o Fator de Segurança (FS) sofreu uma grande depreciação. O EL considerou uma superfície de ruptura satisfatória, nas simulações com presença de água FS sofreu uma depreciação mínima mesmo com máxima saturação de água no talude. Apesar das diferenças ambos os métodos são confiáveis mas devem ser usados de forma adequado ao tipo de problema existente. Situações mais simples e com taludes mais homogêneos o EL trona-se mais indicado, para problemas de maior complexidades e interações entre camadas o MEF se mostrou satisfatório e com boa resposta. O resultados através do MEF se aproximaram mais da situação real encontrada em campo.

Palavras-chave: Retroanálise. Método dos Elementos Finitos. Equilíbrio Limite.

Numerical Simulation and Limit Equilibrium Applied to Retro Analysis in Coal Mining Slopes

ABSTRACT

A research focus on retro analysis on mine slopes is becoming increasingly important. The dimensions of current mining caves aim to always obtain the best cost benefit ratio as well as the highest safety level. This demands that the work sometimes is done within these limits. In this paper the study of retro analysis is made up of a mixed slope composed of alluvial and rocks, in a coal mine in Arroio dos Ratos, RS. The goal was to carry out a retro analysis study using two analysis methods: The Finite Element Method (FEM) and Limit Equilibrium analysis (LE). The methodology adopted was split into three phases: a field stage for the sample collection and slopes geometric , a laboratory stage to classify all the material and a final computacional stage where model and numerical simulations were created by way of commercial software, Slide and RS2, by RocScience. The results showed that the portion of the slope composed of alluvium had six layers interspersed with well graded sands and high plasticity clays. The simulations observed a difference between the FEM and LE due to the number of layers present in the slope and the interaction among them. Four different scenarios were created in order to observe the behavior of the slope. The FEM presents surface failure similar to one found in the field. The LE always takes into consideration the overall critical surface which is not observed in the field, it also show high security factor levels above one 1.3 that does not reflect a real situation since the slope is collapsed. In spite of the differences, both methods are reliable but they must be used according to the existing problems. For simpler situations with homogeneous slopes LE is recommended while more complex problems and interactions among layers calls for FEM.

Keywords: Retro Analysis. Finite Element Method . Limit Equilibrium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização Município Arroio dos Ratos até Porto Alegre	18
Figura 2: Área da mina do Calombo, pela RS-290, 57km até Porto Alegre.	19
Figura 3: Mina do Calombo, ao fundo talude rompido na parte composta pelo aluvião, caminhonete S10 como escala no primeiro plano.	19
Figura 4: Mapa de isópacas da Formação Rio Bonito, modificado de Zalan et al.	22
Figura 5: Carta Arroio dos Ratos, observação das curvas de nível e hidrografia proximo a Mina do Calombo.	26
Figura 6: Mapa Geológico.....	29
Figura 7: Tipos de movimtno de massa; a) Quedas; b) Tombamento; c) Deslizamentos Rotacional; d) Deslizamento Translacional; e) Escomento; d) Fluxo ou Corrida	34
Figura 8: Tipos de ruptura decorrentes da distribuição espacial das descontinuidades em maciços rochosos.....	38
Figura 9: Resistencia mobilizável e resistência mobilizada.....	42
Figura 10: Talude com diferentes superfícies de deslizamento.....	43
Figura 11: Método de Fellenius	45
Figura 12: Método de Bishop.....	46
Figura 13: Método de Janbu (simplificado)	47
Figura 14: Método de Spencer	47
Figura 15: Método de Morgenstern-Price	48
Figura 16: Imagem perfil pontos de coletas nas litologias identificadas.....	53
Figura 17: A) Contato da camada DEF-04 e IND-03, B) Entre o contato existe a percolação constante de água.	54
Figura 18: A) Escavação e moldagem do bloco; B) Colocação do tecido tule em volta do bloco; C) Aplicação de parafina liquida; D) Finalização de retirada do bloco e fechamento da caixa.....	55
Figura 19: Bloco Indeformado amostra, IND-01.	56
Figura 20: Bloco Indeformado amostra, IND-02.	57
Figura 21: Bloco Indeformado amostra, IND-03.	58
Figura 22: Amostras Deformadas nos sacos plásticos e Indeformadas nas caixas de madeira.	59
Figura 23: Amostra deformada DEF-02.....	60
Figura 24: Amostra deformada DEF-03.....	61
Figura 25: Amostra deformada DEF-04.....	62
Figura 26: Areias no laboratório durante a secagem, não lavadas.	63
Figura 27: Talude somente do aluvião	64
Figura 28: Agitador das particulas	66

Figura 29: Ensaio de peso específico; A) Amostras em torno de 40°C de temperatura; B) Amostras com temperatura em torno de 15°C, rebaixamento da temperatura através de gelo.	67
Figura 30: Ensaio das DEF-02 e DEF-03, o material para o ensaio era composto de provetas, cronômetros, densímetro, termômetro e material para anotações.	68
Figura 31: A) Amostra IND-03; B) Amostra IND-02.....	70
Figura 32: Máquina de cisalhamento direto	71
Figura 33 – Anéis de amostras	72
Figura 34 - 1) Corpo de prova; 2) Pedra porosa; 3) Parte fixa da caixa cisalhante; 4) Parte móvel da caixa de cisalhamento; 5) Cabeçote metálico; 6) Extensômetro para medida da variação de altura do corpo de prova; 7) Extensômetro para medida do deslocamento horizontal da parte móvel da caixa de cisalhamento.....	73
Figura 35: Definição de S_{max} e S	75
Figura 36: Raio Mínimo e máximo na pesquisa da superfície crítica.	76
Figura 37: Distribuição granulométrica das Argilas.	77
Figura 38: Distribuição granulométrica das Areias.....	78
Figura 39: Carta de Plasticidade de Casa Grande	80
Figura 40: Sistema Unificado de Classificação de Solos	80
Figura 41: Curvas tensão cisalhante (τ) <i>versus</i> deformação horizontal (A) IND-01; C) IND-02; E) IND-03), e deformação horizontal <i>versus</i> deformação vertical (B) IND-01; D) IND-02; F) IND-03). 82	82
Figura 42: Envoltórias de Ruptura IND-01, IND-02, IND-03	84
Figura 43: Amostras IND-02 pós ensaios 50, 100 e 150kpa.....	86
Figura 44: Perfil Topográfico Mina do Calombo.....	86
Figura 45: Perfil geológico Mina do Calombo.....	87
Figura 46: A) Malha normal; B) Malha com adensamento de elementos no aluvião.....	88
Figura 47: Simulação talude seco RS2.....	89
Figura 48: Simulação Slide talude seco ruptura circular.....	90
Figura 49: Simulação Slide talude seco ruptura não circular	91
Figura 50: Nivel de água máxima saturação 80%	92
Figura 51: Simulação com máxima saturação de água RS2	92
Figura 52: Simulação Slide talude com máxima saturação de água, ruptura circular.....	93
Figura 53: Para fins de avaliar a superfície de ruptura foi feita uma análise de superfície não circular como mostra a.....	93
Figura 54: Nivel de água parcialmente saturado 50%	95
Figura 55: Simulação com saturação parcial de água RS2	95
Figura 56: Simulação Slide talude parcialmente saturado, ruptura circular.....	96
Figura 57: Simulação Slide talude com saturação parcial de água, ruptura não circular	97
Figura 58: Nivel de água visto em campo	98

Figura 59: Simulação com saturação de água vista em campo RS2	98
Figura 60: Simulação Slide talude com saturação de água vista em campo, ruptura circular.....	99
Figura 61: Simulação Slide talude com saturação de água vista em campo, ruptura não circular	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de movimentos gravitacionais de massa.	35
Tabela 2: Causas de movimento gravitacionais de massa.....	36
Tabela 4: Porcentagem passante dos ensaios das argilas	78
Tabela 5 - Porcentagem passante dos ensaios das Areias	79
Tabela 6: Índice LP, LL e IP das amostras.....	79
Tabela 7: Classificação final de cada solo.....	81
Tabela 8: Peso específico das amostras.....	81
Tabela 9: Reúne a informação dos ensaios realizados, mostrando aqui o ângulo de atrito e coesão.	85
Tabela 10: Propriedades de cada uma das litologias, dados usados nos softwares	88

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
SUMÁRIO.....	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	16
1.2 Estrutura e organização da dissertação	17
2 ÁREA DE ESTUDO	18
2.1 Geologia regional	20
2.1.1 Estratigrafia da Bacia do Paraná no Estado do RS.....	20
2.2 Geomorfologia	25
2.3 Clima Regional.....	27
2.4 Geologia local.....	28
2.5 Geologia estrutural.....	30
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1 Aspectos gerais dos movimentos de massa	31
3.2 Classificações dos movimentos de massa	32
3.3 Causas e condicionantes dos movimentos gravitacionais de massa	36
3.4 Processos de instabilização de taludes de mineração	37
3.5 Fatores Condicionantes de Instabilização	40
3.6 Descrição dos Métodos de Análise	40
3.6.1 Fator de segurança	40
3.6.2 A Teoria de Equilíbrio Limite	42
3.6.3 Métodos equilíbrio limites	45
3.7 Introdução aos métodos numéricos	48
3.7.1 Métodos de Elementos finitos	48
3.7.2 Aspectos gerais da formulação	49
3.7.3 Aplicação na simulação de colapso	51

4	METODOLOGIA.....	52
4.1	Etapa Campo	52
4.1.1	Análise Topográfica	53
4.1.2	Coleta de Amostras Indeformadas.....	54
4.1.3	Coleta amostras Deformadas	58
4.2	Etapa Laboratório.....	65
4.2.1	Caracterização Física	65
4.2.2	Índices físicos.....	65
4.2.2.1	Granulometria	67
4.2.3	Limites de Atterberg.....	69
4.2.4	Cisalhamento direto	70
4.2.4.1	Equipamento utilizado	71
4.2.4.2	Preparação das amostras e execução dos ensaios.....	72
4.2.4.3	Fases dos ensaios	72
4.3	Etapa Computacional.....	74
4.3.1	Apresentação do Programa RS2.....	74
4.3.2	Análise de Estabilidade: <i>Shear Strength Reduction</i>	74
4.3.3	Apresentação do Programa Slide	75
5	RESULTADOS	77
5.1	Ensaio de laboratório	77
5.1.1	Caracterização física	77
5.1.2	Resistência ao cisalhamento	81
5.1.2.1	Cisalhamento Direto.....	81
5.2	Análises de estabilidade	86
5.2.1	Geometria e características dos materiais.....	86
5.2.2	Cenários de estudos	89
5.2.2.1	Cenário 01	89
5.2.2.2	Cenário 02	91
5.2.2.3	Cenário 03	94
5.2.2.4	Cenário 4	97
6	CONCLUSÃO	101
7	TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERENCIAS	104

ANEXOS..... 108

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa voltada para a retroanálise de taludes de mineração está sendo tema cada vez mais recorrente. As dimensões das atuais cavas de mineração visam sempre obter a melhor relação entre custo, benefício e segurança. Isso exige que por vezes o trabalho ocorra próximo destes limites. Algumas situações não esperadas, como fortes regimes de chuvas ou mudanças de planejamento, podem desencadear situações que desestabilizem os taludes destes empreendimentos, refletindo em rupturas de taludes.

Esses movimentos devem ter suas causas estudadas, para que assim seja possível realizar um melhor projeto do local. Após estudo e entendimento do problema o tratamento adequado poderá ser sugerido e executado. Desta forma os empreendimentos poderão seguir, obtendo a relação de custo, benefício e segurança em um fator melhor e mais alto, sempre visando ser economicamente rentável e com maior segurança para os taludes estabilizados.

Os taludes são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solo e rocha), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos. Podem apresentar modificações antrópicas, tais como cortes, introdução de cargas, desmatamento, entre outros fatores. O Talude de Corte é entendido como um talude originado de escavações antrópicas diversas, este tipo de intervenção é comum ao se tratar de zonas de mineração.

Atualmente, o estudo e controle da estabilidade de taludes e encostas podem ser relacionados a três grandes áreas de aplicação: construção e recuperação de grandes obras civis (rodovias, ferrovias, barragens, etc); exploração mineral (situação estudada por este trabalho) e consolidação de ocupações urbanas em áreas de encostas.

Terzaghi (1950), salienta que o conhecimento geológico é um requisito essencial para a formação de um conceito claro sobre os processos que podem levar um talude ao colapso. A realização de uma boa caracterização geológico-geotécnica é fundamental quando se visa elaborar um projeto de contenção, retroanálise ou mesmo recomendações de medidas emergenciais.

Os profissionais que atuam na prevenção e no controle de movimentos de encostas e taludes devem se deter em diversos métodos de investigação. Além da caracterização geológico-geotécnica, se utiliza da instrumentação e ensaios *in situ* e de laboratório. Essas questões necessitam de uma metodologia de trabalho que resulte em uma boa execução, para assim obter dados de qualidade e com uma quantidade compatível com o caso de estudo.

Os estudos realizados por meio da metodologia de Equilíbrio Limite, são amplamente utilizados e no geral este método apresenta resultados considerados satisfatórios na maioria dos casos. Esta técnica se mostra muito favorável em projetos que tenham relação com taludes naturais ou artificiais com características mais homogêneas. Nos estudos de retroanálise se busca identificar variáveis desconhecidas no problema e também sequências de eventos que culminam na ruptura. Este tipo de análise acaba por não abordar a influência das características de outros planos que não sejam o da seção considerada mais crítica. Isto acaba gerando um prejuízo de informações, e pode até mesmo induzir a uma análise errada do que realmente está acontecendo.

Uma outra metodologia baseada em análises numéricas (Método dos Elementos Finitos – MEF), pode ser considerada atualmente uma das melhores formas para se conhecer o desenvolvimento de um movimento em taludes. Esta metodologia realiza o cálculo com base nas relações de tensão-deformação dos materiais, possibilitando resolver problemas cada vez mais complexos. No que diz respeito à geometria e estratigrafia dos taludes, as interações entre as camadas de matérias diferentes torna-se possível. Este método, por ser mais complexo, exige uma maior introdução de dados, e recolher estas informações muitas vezes pode ser difícil devido às condições dos taludes em estudo.

Este trabalho procura trazer as duas metodologias de análise de Equilíbrio Limite e MEF, através de dois programas comerciais desenvolvidos pela empresa RocScience, sendo eles o Slide, analisando Morgenstern-Price e Bishop, e o RS2 onde se implementará o MEF.

Este trabalho espera contribuir com o aumento do conhecimento e discussão nesta área tão relevante da geotecnia que é a estabilidade de taludes.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo de caso de retroanálise do rompimento de talude ocorrido na Mina do Calombo. Para que o objetivo principal possa ser alcançado objetivos secundários foram estipulados:

- 1 Obter e organizar informações geológicas, geotécnicas, climáticas e topográficas pré-existentes sobre a área de estudo;
- 2 Realizar a coleta de amostras indeformadas e deformadas, para realizar a caracterização física do material e obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento direto, através de ensaios realizados em laboratório;
- 3 Classificação das amostras coletadas;

- 4 Realizar análise de estabilidade através de duas metodologias: Teoria do Equilíbrio Limite e Métodos de Elementos Finitos;
- 5 Analisar os pontos positivos e negativos de cada metodologia;

1.2 Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação será organizada com o propósito de cumprir os objetivos propostos:

- Capítulo 1: Introdução, apresentação e objetivos;
- Capítulo 2: Apresenta localização da área de estudos, onde foram coletadas as amostras deste trabalho, síntese geológica e geotécnica, aspectos morfológicos e climáticos, além de mapas de localização;
- Capítulo 3: Revisa as principais técnicas e métodos aplicados na caracterização de movimentos de massa, fatores que geram desestabilizações na mineração, métodos de análises de estabilidade de taludes e obtenção do fator de segurança;
- Capítulo 4: Apresenta e aplica a metodologia utilizada separada em três etapas principais: Etapa de Campo, Laboratorial e Computacional;
- Capítulo 5: Os resultados e a discussão deles são mostrados ao longo deste capítulo;
- Capítulo 6: Apresenta as conclusões alcançadas;
- Capítulo 7: Sugere trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 ÁREA DE ESTUDO

A área definida para o estudo pertence a empresa Copelmi Mineração Ltda e está localizada no município de Arroio dos Ratos distante cerca de 61 km da capital Porto Alegre/RS, através da RS-290 Figura 01.

Figura 1: Localização Município Arroio dos Ratos até Porto Alegre

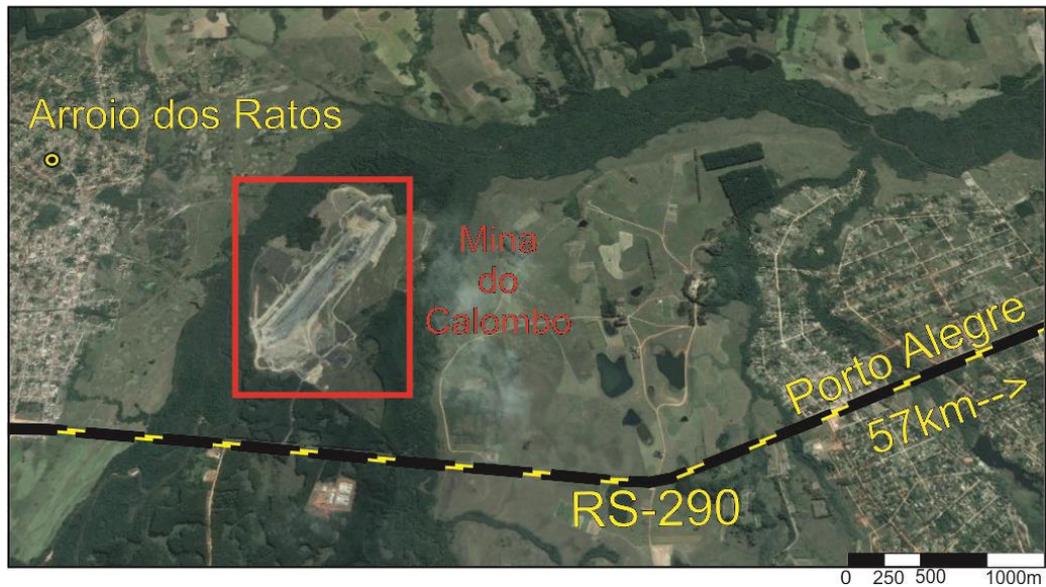


Fonte: Modificado da base cartográfica do IBGE

O empreendimento mineiro consiste em uma mina de carvão mineral a céu aberto onde o processo de lavra a ser executado é em tiras paralelas (*Strip Mining*). Com este método a lavra se desenvolve mantendo um limite de avanço balizado pelo talude final, a partir deste ponto a mineração não ultrapassa.

Um mapa de localização a partir de imagem de satélite da área da mineração pode ser visto em detalhe na Figura 2.

Figura 2: Área da mina do Calombo, pela RS-290, 57km até Porto Alegre.



Fonte: Modificado de Google Earth.

“”

O depósito de carvão onde se situa a mineração apresenta como característica principal um aluvião na porção superior do talude, seguido de camadas de Siltitos e Carvão que completam o perfil do talude. Este aluvião é composto por uma sequência de camadas de areia e argilas intercaladas, com diferentes granulometrias e plasticidade. Assim, os estudos deste trabalho deram foco principal nos materiais que compõem o aluvião, tentando identificar qual das camadas se mostra mais suscetível e propensa a desencadear algum tipo de movimentação. A Figura 3 mostra o local da mineração onde ocorre a ruptura.

Figura 3: Mina do Calombo, ao fundo talude rompido na parte composta pelo aluvião, caminhonete S10 como escala no primeiro plano.



Fonte: Autoria própria

2.1 Geologia regional

Segundo Zalan et al. (1990) a Bacia do Paraná (BP) é uma vasta bacia intracratônica Sul-americana, desenvolvida completamente sobre crosta continental, e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, cujas idades variam entre o Siluriano e o Cretáceo. Abrange uma área de cerca de 1.700.000 km², estendendo-se pelo Brasil (1.100.000 km²), Paraguai (100.000 km²), Uruguai (100.000 km²) e Argentina (400.000 km²), Figura 4.

2.1.1 Estratigrafia da Bacia do Paraná no Estado do RS

Supergrupo Tubarão

O Supergrupo Tubarão constitui-se dos grupos Itararé e Guatá segundo Schneider et al. (1974).

Grupo Itararé

Compreende a sequência sedimentar de idade permo-carbonífera cujos depósitos, caracterizados por diamictitos, refletem influências glaciais em seus diferentes ambientes deposicionais.

É constituída de sedimentos essencialmente argilosos que ocorrem na parte superior do grupo Itararé. A parte basal da Formação (Fm) apresenta folhelhos e argilitos cinza escuro, localmente com aspecto varvítico; e a parte superior da formação constitui-se de argilitos, folhelhos várnicos, ritmitos, arenitos finos e diamictitos. Esta formação assenta diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino e o contato superior com a Fm Rio Bonito é concordante. Os depósitos desta Fm são relacionados a ambiente essencialmente marinho com influência de ambiente glacial. Dados palinológicos situam a deposição dos sedimentos da Fm Rio do Sul no Permiano Médio (Kunguriano) (Daemon & Quadros, 1969).

Grupo Guatá

O Grupo Guatá constitui-se de siltitos cinzas, esverdeados e de arenitos com intercalações de camadas de carvão e folhelhos carbonosos que se distribuem verticalmente desde o topo do Grupo Itararé até a base da Fm Irati.

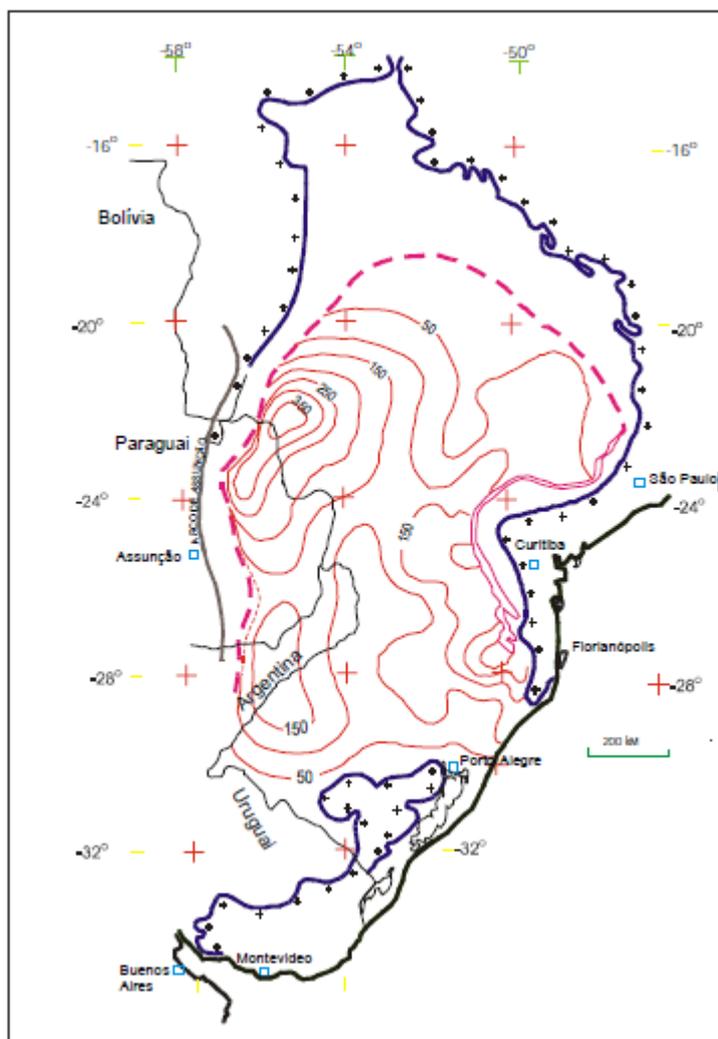
Formação Rio Bonito

Compreende o pacote sedimentar depositado sobre o Grupo Itararé constituído de uma seção arenosa basal, uma média essencialmente argilosa e uma superior, areno-argilosa, contendo os principais leitos de carvão explorados na BP (Schneider, op. cit.). As espessuras maiores ocorrem na porção noroeste da bacia.

São encontrados no RS três conjuntos litológicos distintos, que ocorrem tanto em associação vertical quanto interdigitados localmente ou mesmo isolados. O primeiro conjunto litológico é formado predominantemente por arenitos médios e grossos, cinza-claros, arcoseanos, localmente conglomeráticos com grânulos e seixos de rochas sedimentares, ígneas e metamórficas. Secundariamente ocorrem arenitos muito finos, finos e médios. Siltitos cinza esverdeados ou cinza escuros e carbonosos com leitos e camadas de carvão onde as camadas de carvão são de ocorrência subordinada. Ocorre normalmente na porção basal da Fm Rio Bonito, em contato discordante com o embasamento Pré-Gondwânico e é raramente gradacional com as rochas do Grupo Itararé.

O segundo conjunto é predominantemente pelítico, sendo constituído por siltitos cinza a cinza-claros; cinza-escuros a preto, carbonosos, por vezes argilosos, maciços, mais raramente com interlaminações de arenitos e intercalações de leitos e camadas de carvão. É neste conjunto que se desenvolvem as principais camadas de carvão do RS. Suas relações de contato com o conjunto anterior são de concordância, localmente interdigitados e discordantes sobre o embasamento Pré-Gondwânico quando ausente o conjunto arenoso basal e rochas do Grupo Itararé.

Figura 4: Mapa de isópacas da Formação Rio Bonito, modificado de Zalan et al.



Fonte: Mapa de isópacas da Formação Rio Bonito, modificado de Zalan et al. (1987).

O terceiro conjunto litológico é constituído essencialmente por arenitos quartzozos a ortoquartzíticos, finos a médios, cinza claros, cinza esverdeados, localmente grossos com grânulos e seixos dispersos. Subordinadamente, ocorrem leitos e camadas de siltitos cinza a cinza-escuros e carbonosos, leitos e camadas de carvão. O contato com os outros dois conjuntos é concordante, localmente de natureza interdigitada e discordante sobre o embasamento. Milani et al. (1994) comentando sobre o ambiente deposicional da Fm. Rio Bonito, afirmam que a tendência transgressiva foi quebrada momentaneamente pela entrada das cunhas arenosas da Fm. Rio Bonito no Artinskiano/Kunguriano. Tal episódio de reativação de áreas fonte é atribuído por Zalan et al. (1987 e 1990) à Orogenia Tardiherciniana na margem ativa do continente. Arenitos associados a leitos de carvão, siltitos e folhelhos, estes localmente

carbonosos, formam um contexto clássico de sedimentação deltaica, que adentrou a bacia por seu flanco leste.

Holtz (1997) em seu estudo das sequências estratigráficas do Permiano inferior da BP, no norte do estado do RS, identifica a variação de quatro paleoambientes para a Fm Rio Bonito: inicialmente flúvio-deltaico, seguido de lagunar com formação de turfas, ante-praia e ante-praia e planície de maré.

Fragmentos de vegetais e palinórfos constituintes de conteúdo fossilífero da Fm Rio Bonito situam a deposição dos sedimentos no Permiano médio a superior (kunguriano a kazaniano) (Daemon & Quadros, 1969).

Formação Palermo

Consiste de siltitos e siltitos arenosos de cores cinza e, por alteração, amarelas e esverdeadas. Localmente, desenvolvem-se arenitos finos e mesmo conglomerados. Estes sedimentos encontram-se normalmente bioturbados, resultando na quase completa destruição de suas estruturas sedimentares. Quando preservadas, caracterizam laminação cruzada de pequeno porte. No RS esta formação atinge a ordem de 150 m de espessura.

O contato inferior com a Fm Rio Bonito é concordante. As características litológicas da Fm Palermo indicam deposição em ambiente marinho transgressivo de águas rasas, abaixo do nível de ação das ondas (Schneider, op. cit.).

Grupo Passa Dois

O Grupo Passa Dois constitui-se, na porção sul da bacia, das formações Irati, Estrada Nova e Rio do Rastro.

Formação Irati

Representa uma sequência sedimentar pelítica, predominantemente de coloração cinza escura a preta, associada a níveis carbonáticos concentrados na metade superior. Caracteriza-se por uma faciologia bastante complexa, com folhelho, folhelho betuminoso, arenito, marga, carbonato e anidrita, indicativos de uma geometria de bacia igualmente complexa, em que configuravam-se golfos e baías de profundidades e salinidades bastante variáveis (Daemon et al., 1991). A rica fauna de répteis mesossaurídeos que ocorre na porção superior da Fm. Irati faz parte deste um horizonte ímpar no contexto do registro paleozóico sul-americano. Depositada em condições de um mar restrito, progressivamente mais salino da base para o topo (Milani et al., op. cit.).

Formação Estrada Nova

É constituída, na porção inferior, por siltitos cinza-escuros com intercalações de folhelhos, raros leitos de calcário e arenitos muito finos. Na porção superior ocorrem folhelhos e siltitos cinza-escuros com laminação plano-paralela esparsa. Aparecem também raros leitos de calcários impuros, siltitos carbonáticos e arenitos muito finos. Seu ambiente deposicional é marinho de águas calmas, abaixo da ação das ondas. Os contatos no seu topo e base são transacionais respectivamente com as formações Rio do Rastro e Irati.

Formação Rio do Rastro

Constituída por arenito, siltito e folhelho arroxeados, esverdeados e avermelhados, interpretadas como produto do avanço de sistemas deltaicos desde a borda oeste da bacia (Gama Jr., 1979 apud Milani et al., op. cit.). Os corpos arenosos, contínuos na base desta unidade, adquirem marcante lenticularidade em sua porção superior. Sua deposição inicia-se em um ambiente marinho raso que transiciona para depósitos de planície costeira e finalmente para depósitos flúvio-deltaicos. A idade triássica é sugerida por dados palinológicos (Daemon et al., 1991).

Grupo São Bento

Formação Rosário do Sul

Compreende os sedimentos de cores avermelhadas, essencialmente arenosos. Constitui-se de arenitos médios e finos e, subordinadamente arenitos muito finos e siltitos, com grãos angulares, subarredondados e mal selecionados. As cores podem ser também rosadas e amareladas ou raramente esverdeadas. Estratificação cruzada, planar e acanalada são as estruturas sedimentares mais frequentes. O ambiente deposicional está relacionado a sistemas continentais flúvio-eólicos associados a lagos rasos e localizados.

O membro Santa Maria situa-se na porção superior da Fm Rosário do Sul e constitui-se de argilitos sílticos e siltitos arenosos, vermelhos, fratura subconchoidal e contém nódulos calcíferos dispostos em níveis. Apresenta-se rico em flora e fauna de vertebrados e invertebrados com idade iadiniana/carniana (Triássico inferior e médio). Sua distribuição é restrita ao RS, e em superfície, a forma erosiva em ravinamento dos Milani et al. (op. cit.), em estudo que compreende a elaboração da carta estratigráfica da Bacia do Paraná retira a

Formação Rosário do Sul do Grupo São Bento e considera somente as Fms Botucatu e Serra Geral pertencentes a ele.

Formação Botucatu

Constitui-se de arenitos avermelhados, finos a médios normalmente bimodais, friáveis, grãos foscos, arredondados a bem arredondados. Localmente com maior frequência na parte basal, ocorrem arenitos argilosos, mal selecionados. Estratificação cruzada tangencial em grandes cunhas, na parte basal, estratificação plano-paralela e cruzada acanalada são as estruturas sedimentares mais comuns. As características litológicas e sedimentares da Fm. Botucatu indicam deposição eólica em ambiente desértico com contribuição, na parte basal, de sedimentação fluvial, (Schneider et al., op. cit). A idade é jurássica e o contato inferior com a Fm. Rosário do Sul é discordante.

Formação Serra Geral

Constitui-se, litologicamente, de uma sequência básica predominante, e de uma sequência ácida, mais abundante no topo do pacote, porém com possibilidades de intercalações locais junto à sequência básica inferior. A Fm. Serra geral é resultado do intenso vulcanismo de fissura, iniciado quando ainda perduravam as condições desérticas de sedimentação da Fm. Botucatu, fato este atestado pela presença de inúmeros corpos arenosos de origem eólica na parte basal da formação (Schneider et al., op. cit.).

É o mais volumoso episódio de extravasamento intracontinental de lavas do planeta como manifestação magmática dos estágios precoces da ruptura do Gondwana e abertura do Atlântico Sul, que resultou no empilhamento de até 2000 m de rocha vulcânica sobre os sedimentos da Bacia do Paraná, além de intrudir-se por entre os mesmos, na forma de uma intrincada rede de diques e soleiras. A intercalação das lavas, na parte basal da Fm. Serra Geral, com os arenitos da Fm. Botucatu posicionam estas duas unidades com idade jurássica-eocretácea (Milani et al., op. cit.).

2.2 Geomorfologia

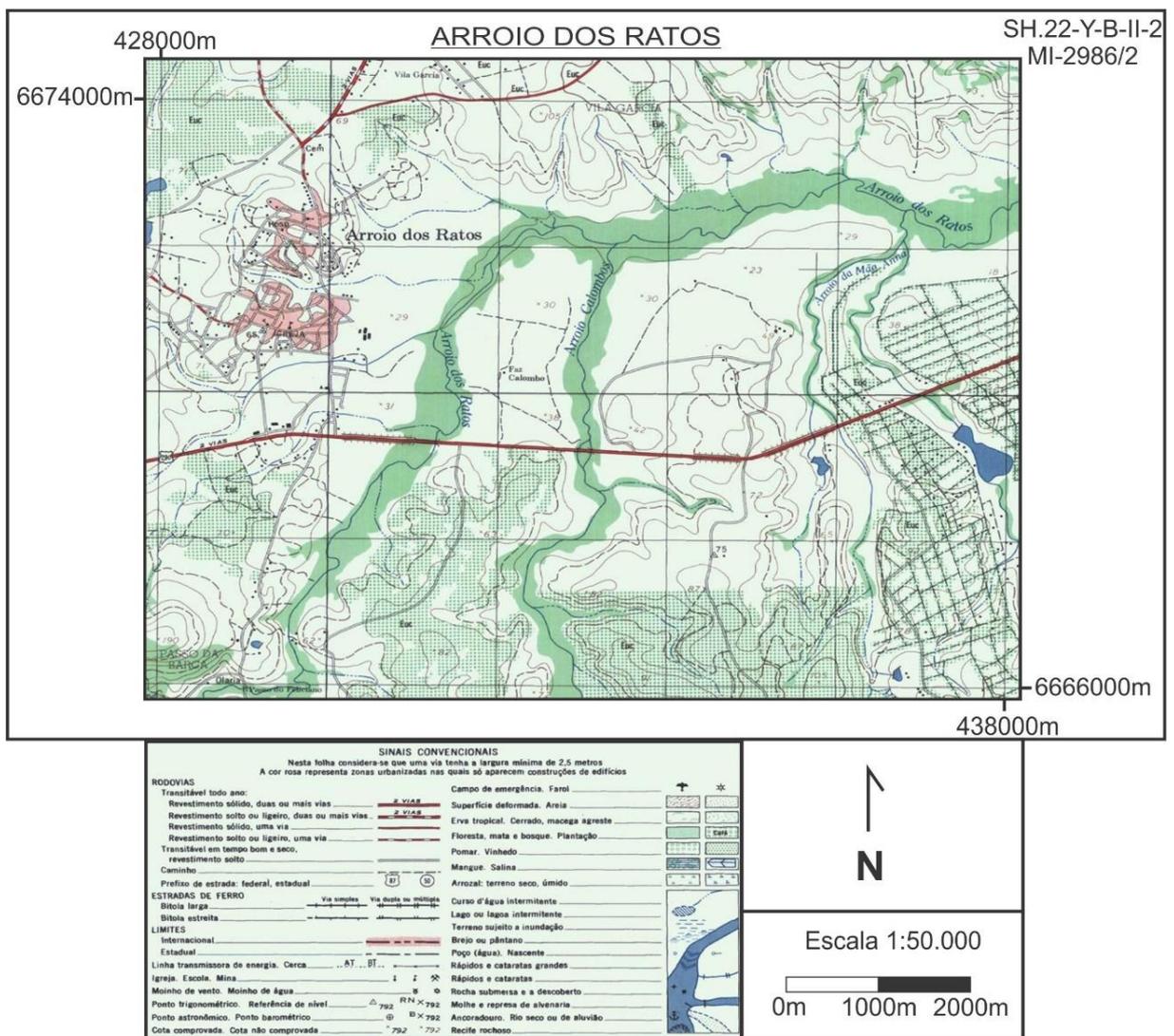
A área do empreendimento encontra-se situada na região geomorfológica da Depressão Periférica do estado do Rio Grande do Sul. Esta região é limitada pelos leques aluviais e os sedimentos da formação Serra Geral, ao norte, e pelos patamares inferiores do Escudo representados pelas serras do Sudeste, ao sul. São aspectos transicionais entre duas unidades e

porque a depressão periférica deve sua gênese a uma evolução intimamente ligada à rede hidrográfica de uma extensa bacia fluvial: a do Jacuí (Gusmão et al., 1990.)

Situando-se na faixa central do Estado, com uma forma alongada no sentido leste-oeste, a unidade tem como característica apresentar um relevo sem grandes variações de altimetria. Existe nesta a predominância de colinas (coxilhas) alongadas com topos convexos e vertentes côncavas suavizadas. A declividade do terreno raramente se apresenta maior que 20% e os vales presentes normalmente são largos com fundo plano, vales em U abertos. O padrão de drenagem predominante é do tipo subdentríptico.

É possível observar algumas feições do relevo da área próxima à mineração através da Figura 5.

Figura 5: Carta Arroio dos Ratos, observação das curvas de nível e hidrografia proximo a Mina do Calombo.



Fonte: Folha SH.22-Y-B-II-2, Arroio dos Ratos. Escala 1:250.000, CPRM.

O relevo da depressão periférica é suavemente ondulado, variando entre 15 a 150 metros de altitude. Na região próxima à da mina, o ponto mais alto se encontra com cerca de 190 metros denominado Passo da Barca, a região onde a mineração se encontra apresenta altitude de 30 a 38 metros.

Destaca-se que área onde o empreendimento está localizado encontra-se cercada por dois cursos de rios consideráveis. Tanto o curso de água Arroio dos Ratos quanto o curso Arroio Calombo, recebem um grande aporte de água de pequenos córregos próximos. Isto faz com que a recarga no nível freático destes cursos seja continua e mantenha um nível estável, gerando uma condição de difícil drenagem dentro do empreendimento mineiro, a água esco constantemente dos taludes. Devido ao alívio de tensões causado pela escavação, a água tende a escorrer para dentro da cava onde é devidamente conduzida e drenada.

Entre as colinas e os relevos tabuliformes, interpenetram-se seções de planície aluviais. Nos contatos com os leitos fluviais, dominam depósitos de planície de inundação, em baixos suscetíveis a frequentes inundações, onde se formam banhados com depósitos recentes de turfa.

2.3 Clima Regional

A localização e as características climáticas regionais da Depressão Central enquadrana entre os climas subtropicais úmidos, e segundo a classificação correntemente usada, de Köpen, na categoria dos Mesotérmicos Brando Superúmidos, segundo Nimer (1990).

A temperatura média anual situa-se no intervalo de 18 a 20° C. Os verões são muito quentes, tendo o mês de janeiro uma média entre 24 e 26° C. Os invernos são amenos com temperatura média entre e 13 e 15° C. As temperaturas extremas absolutas são -4° e 40°C.

As massas de ar que afetam a Depressão Central são a Massa Tropical Atlântica (MTA), a Massa Equatorial Continental (MEC), a Massa Polar Atlântica (MPA) e a Massa Tropical Continental (MTC). É no verão, entretanto, que se dá o encontro da MTC com a MTA, provocando fortes chuvas. Nesta ocasião, a MPA fica estacionária nas águas subantárticas do Atlântico e, somente no fim dessa estação, sobe ao longo do Paraguai e Uruguai e do bordo atlântico do Planalto; a MPA, a MTC ou a MEC provocam chuvas frontais com maior frequência no fim do outono (Gusmão etal., 1990).

2.4 Geologia local

Embasamento Pré-cambriano

Furos de sondagens que ultrapassaram as sequências carbonosas atingindo o embasamento, encontram litologias relacionadas que incluem granitos ou rochas de alto grau de metamorfismo como gnaisses e quartzitos.

Sub Grupo Itararé (Permo-Carbonífero)

Embora o Grupo Itararé não seja aflorante na área, ele é representado por sedimentos flúvio-lacustres de origem glacial e periglacial compostos por varvitos, tilitos e arenitos. De modo geral, este grupo encobre discordantemente o embasamento onde estão as rochas permocarboníferas do sub-grupo Itararé. Existem duas formações que constituem o Sub-Grupo: a formação inicial de origem marinha e referida como Formação Budó enquanto a mais tardia é a Formação Suspiro. A Formação Budó consiste de silito, silito arenoso, arenito e ocasionalmente inclui conglomerados. Existe a tendência de o tamanho do grão aumentar a partir da base da Formação. A Fm Suspiro é composta de rochas que são de origem glacial, flúvio-glacial e limno-glacial. As litologias típicas incluem tilitos, silitos, arenitos, folhelhos e diamictitos. Estes últimos representam caracteristicamente a litologia desta Formação dentro da bacia e a continuidade desta unidade tende a ser aleatória.

Sub Grupo Guatá (Permiano Inferior)

Consiste de duas formações: a Formação carbonosa Rio Bonito, situada na base, que é coberta concordantemente pela Formação Palermo. A Fm Rio Bonito é a formação de principal interesse econômico na concessão da mina do Calombo. Em algumas partes da bacia a formação tem sido descrita como sendo constituída de três unidades com camadas de carvão confinadas no centro delas. Entretanto, localmente, as camadas de carvão podem ser encontradas em diversos níveis, mas existe a tendência das ocorrências serem mais frequentes no centro e em direção ao topo da Formação.

No local da concessão, a Formação tem espessura variando de cerca de 30 a 60m e, além de carvão, as litologias típicas incluem folhelho carbonoso, folhelho, arenito e silito. Existe também ocorrência ocasional de conglomerado. Este conglomerado consiste de clásticos de silito e arenito, bem selecionados suspensos em uma matriz rica em argila. A Fm. Rio Bonito é concordante com a sequência subjacente do Sub-Grupo Itararé, quando ela está presente, e discordante com as rochas do embasamento Pré-Cambriano.

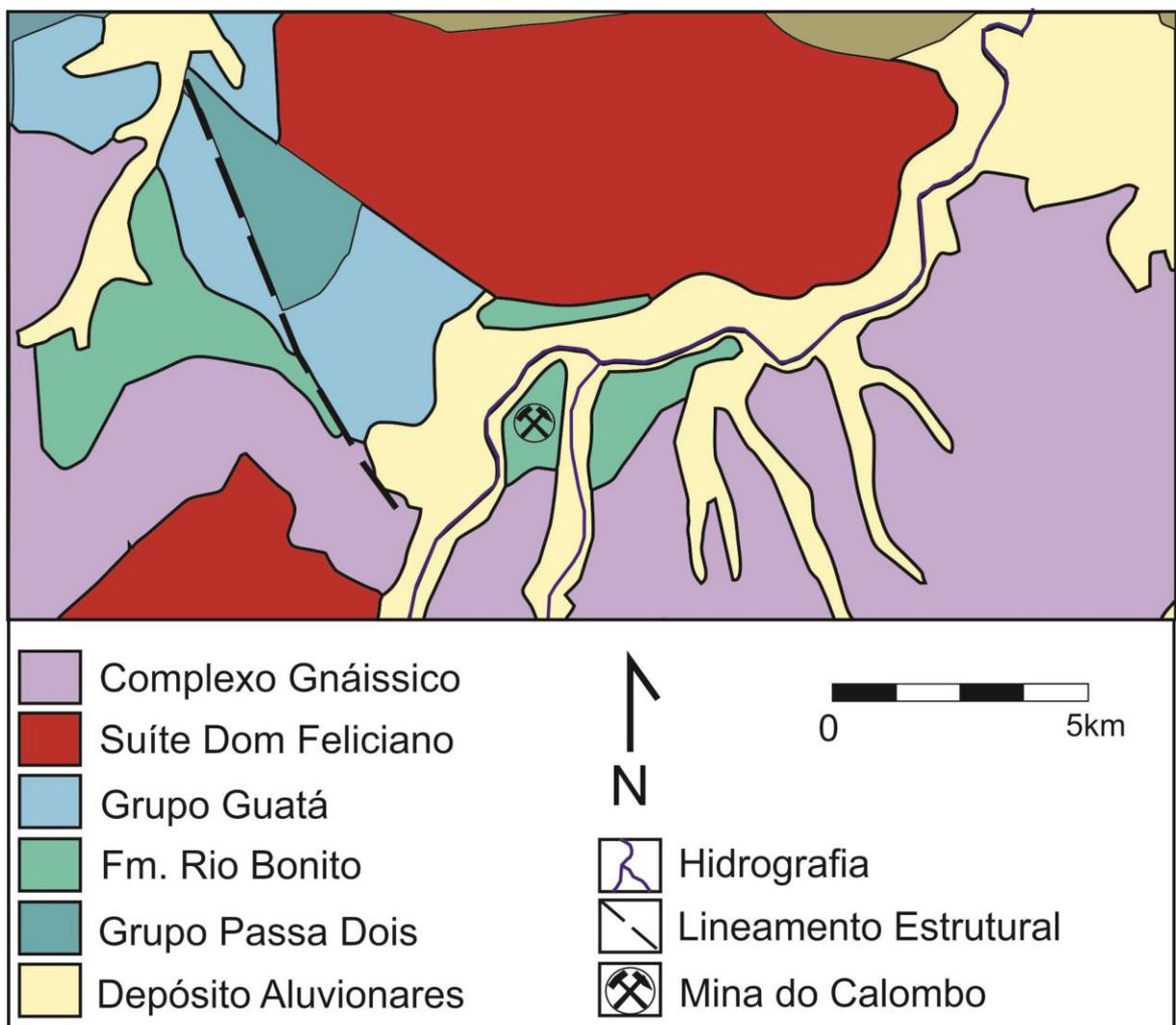
Esta formação representada por sedimentos pelíticos (siltitos, lamitos) e camadas de carvão foi minerada na área nas décadas de 1940 e 1950 em subsolo.

Quaternário

Os depósitos aluviais e coluviais que estão presentes nos leitos e margens dos rios e arroios são depósitos do Quaternário. A tipologia consiste de depósitos finos de areia e argila e ocasionalmente cascalhos inconsolidados, que recobrem toda a área de interesse, sendo representados por depósitos aluvionares do arroio dos Ratos. As argilas tendem a estar no topo, areias e grânulos, com raro cascalho na base em sequência granodecrescente com espessuras de até 20 m.

Após toda contextualização realizada é possível visualizar o mapa geológico local abaixo na Figura 6.

Figura 6: Mapa Geológico.



Fonte: Modificado de GeoBank, CPRM.

A geologia local da área de interesse é representada por sedimentos aluvionares quaternários compostos predominantemente por areias médias a grosseiras. Subordinadamente ocorrem níveis argilosos e de cascalho configurando um ciclotema fluvial. Esses sedimentos possuem, na maioria dos casos, matriz argilosa. No topo do depósito ocorre solo argiloso com espessura média da ordem de 01 metro. Esse depósito está sobre rochas pelíticas (siltitos) da formação Rio Bonito que contém as camadas de carvão. A espessura do depósito varia de 13 a 24 metros.

2.5 Geologia estrutural

Existe uma falha de porte considerável relativamente próxima à zona de estudo, mas ela não chega a ter influência na área, a falha denominada falha do Leão, uma estrutura de caráter regional, que cruza a BR 290 no município de Minas do Leão. Esta falha apresenta locais onde o rejeito varia em algumas dezenas de metros. O plano de falha se estende por 20km. Dentro da área da mineração ou próximo do talude em estudo não foram identificadas estruturas que influenciem a análise em questão.

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Aspectos gerais dos movimentos de massa

Movimentos gravitacionais de massa têm sido objeto de amplos estudos em todo o planeta, não apenas por sua importância como agentes atuantes na evolução das formas de relevo, mas também em função de suas implicações práticas e de sua importância do ponto de vista econômico (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Para melhor compreender as definições de movimentos de massa, primeiramente faz-se necessário entender os conceitos de encosta e taludes. Segundo Stochalak (1974) as encostas são definidas como “toda superfície natural inclinada unindo outras duas, caracterizadas por diferentes energias potenciais gravitacionais”.

Talude, de acordo com Wolle (1980), é mais empregado para definir encostas próximas a obras lineares, de mineração, tendo um caráter mais geotécnico e relacionado a áreas restritas.

Dependendo da localização espacial do talude, diferentes fatores atuam com diferentes intensidades sobre os mesmos, podendo causar sua instabilização. Alguns dos elementos que atuam em sua estabilidade são:

- Pluviosidade;
- Intemperismo;
- Erosão;
- Presença ou não de cobertura vegetal;
- Geometria do talude.

Guidicini e Nieble (1976) utilizam dos termos de agente e causa da instabilização para discutir este tipo de evento. Estes autores se referem aos agentes deflagradores os subdividindo em predisponentes e efetivos. Os agentes predisponentes são um conjunto de características naturais que se encontram intrínsecas nos terrenos nos quais os movimentos irão ocorrer. Os agentes efetivos são diretamente responsáveis pelo desencadeamento das desestabilizações de talude ou de encosta, neste quesito se inclui as ações antrópicas, que dentro da mineração acabam sendo um importante fator.

3.2 Classificações dos movimentos de massa

Entende-se como movimento de massa deslocamentos de um determinado volume de solo. Em geral, são processos vinculados a problemas de instabilidade de encostas e taludes. Devido à grande variedade de enfoques que são possíveis na análise de movimentos de massa, existem vários sistemas classificadores propostos por diversos autores. A elaboração e a adoção de um sistema de classificação são de suma importância para correlacionar os tipos de movimentos com o seu conjunto de características e os fatores que os deflagraram.

Estas características podem ser a geometria do movimento, a área de alcance, os fatores condicionantes do movimento, o material instabilizado, entre outros.

Selby (1990) fez uma compilação dos principais sistemas de classificação de movimentos de massa disponíveis na literatura. Este autor destaca que o primeiro trabalho visando uma classificação sistemática de movimentos de massa foi elaborado por Sharpe (1938).

Hutchinson elaborou duas classificações quanto aos tipos de movimentos de massa. A sua primeira classificação, em 1968, não utiliza o modo de deformação como parâmetro, entretanto faz uma tentativa de englobar todos os tipos de materiais mobilizados pelos escorregamentos. Em sua segunda proposta de classificação, Hutchinson leva em consideração a deformação como parâmetro. O autor afirma que a diversidade dos fatores que interferem no processo de movimentos de massa gravitacionais resulta em uma variedade de tipos e processos que impossibilitam uma total discretização de tipos na classificação (HUTCHINSON, 1988 apud LOPES, 2007). Desta forma, este autor considera os seguintes tipos de movimentos: recuos, rastejos, rompimento de taludes de montanhas, escorregamentos, fluxo de detritos, tombamentos, quedas e movimentos complexos de taludes.

Apesar de existirem estas diversas propostas de sistemas de classificação, a mais utilizada internacionalmente é a proposta de Cruden e Varnes (1996), baseada em Varnes (1978), se tornou uma das mais difundidas e utilizadas. Segundo esta proposta, qualquer movimento gravitacional de massa pode ser classificado e descrito por dois termos, onde o primeiro indica o material envolvido (solo, rocha ou detritos) e o segundo o tipo de movimento (queda, tombamento, deslizamento, escoamento, fluxo). No caso de múltiplos movimentos, estes termos são repetidos quantas vezes forem necessárias.

O tipo de movimento é um dos principais critérios para classificação dos movimentos gravitacionais de massa. As descrições destes tipos, feitas a seguir, baseadas em Cruden e Varnes (1996), são igualmente válidas para outras metodologias, já que se referem, de forma geral, às mesmas cinemáticas de movimento.

As **quedas** ocorrem quando uma porção de solo ou rocha se desprende do maciço, Figura 7 a). Durante a queda, o material viaja pelo ar e o movimento é muito rápido ou extremamente rápido.

O **tombamento** caracteriza-se pela rotação de um bloco de solo ou rocha sobre um eixo localizado abaixo de seu ponto de gravidade, atingindo desde velocidades extremamente lentas a extremamente rápidas, Figura 7 b). Este movimento é causado pela elevação dos níveis de poropressão em fraturas e descontinuidades ou pelo peso do material anteriormente localizado acima da massa movimentada.

Os **deslizamentos** são movimentos descendentes de solo ou rocha, relativamente rápidos, que ocorrem predominantemente em superfícies de ruptura ou em zonas pouco espessas, onde se concentram intensas deformações cisalhantes. Os deslizamentos podem ser translacionais ou rotacionais, basicamente.

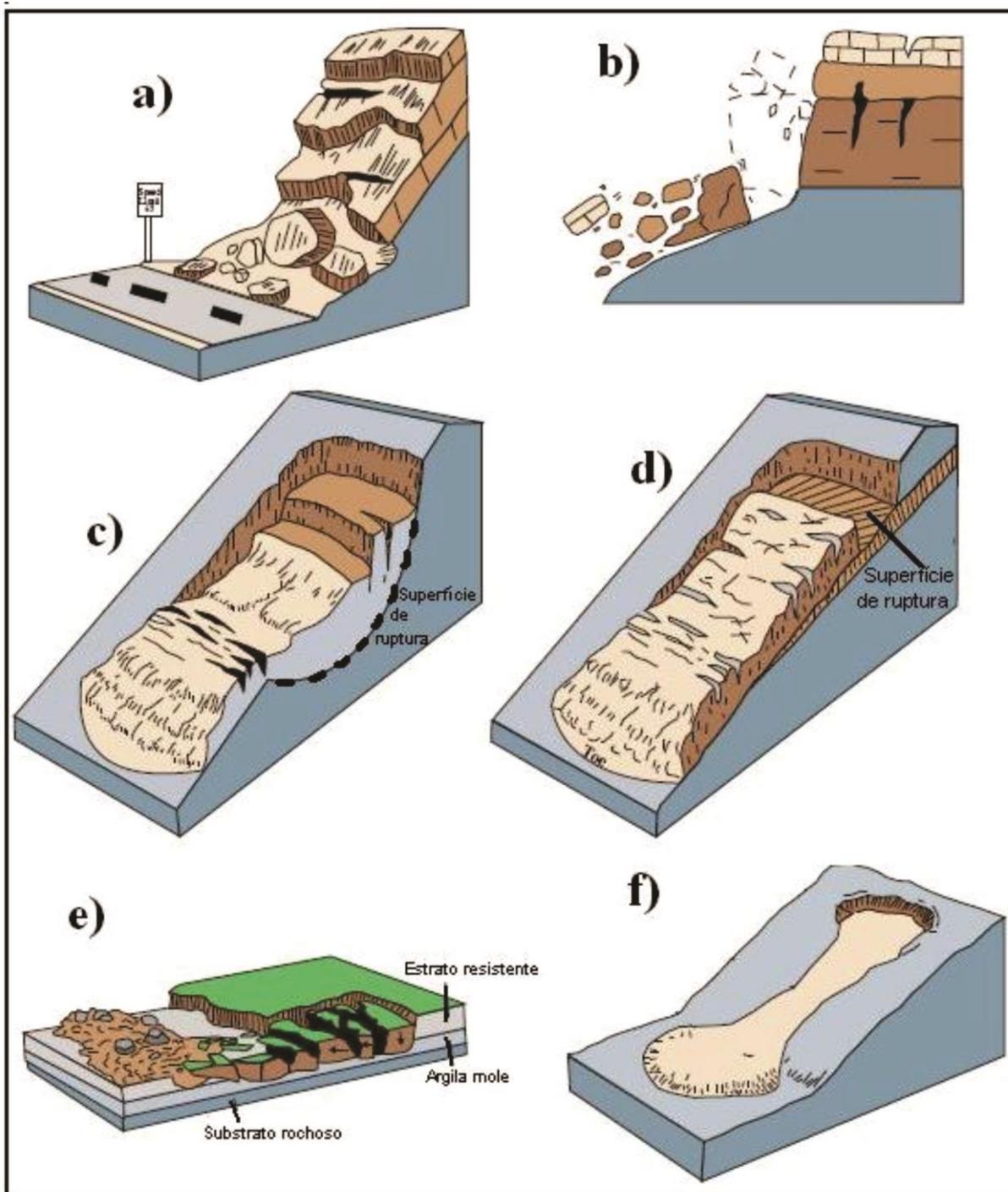
Os deslizamentos rotacionais ocorrem através de uma superfície de deslizamento curva e côncava, sendo predominantes em materiais homogêneos, Figura 7 c).

Por outro lado, nos deslizamentos translacionais Figura 7 d) o material se desloca sobre uma superfície de ruptura planar ou ondulada, sendo geralmente movimentos mais rasos que os rotacionais. Esta superfície de ruptura normalmente se localiza em descontinuidades do maciço ou na interface entre solo e rocha.

Escoamentos são movimentos complexos. Quando uma massa de solo coesivo ou rocha está localizada sobre um material mais frágil, ela se torna bastante fraturada. O solo ou rocha fraturada pode então sofrer movimentos de subsidência, rotação e translação sobre o material menos resistente, até que se desintegre, ao passo que o material subjacente flui de forma ascendente através das fraturas, Figura 7 e). Estes movimentos são extremamente lentos e podem se desenvolver por muitos quilômetros.

O **fluxo ou corrida** é caracterizado como um movimento espacialmente contínuo sem uma superfície de cisalhamento bem preservada, Figura 7 f). O material se desloca de forma semelhante a um líquido viscoso, estando a velocidade do movimento ligada diretamente à quantidade de água contida na massa. Estes movimentos normalmente incidem sobre detritos (debris), que quando em contato com muita água e situados em taludes mais íngremes, evoluem para corridas rápidas ou avalanches, podendo ser atingidas velocidades da ordem de 100 m/s em casos extremos.

Figura 7: Tipos de movimtno de massa; a) Quedas; b) Tombamento; c) Deslizamentos Rotacional; d) Deslizamento Translacional; e) Escomento; d) Fluxo ou Corrida



Fonte: Modificado de Highland e Bobrowsky, 2008.

A maior parte das classificações têm aplicabilidade regional e baseia-se nas condições geológicas e climáticas locais. Há algumas propostas para adequar a classificação dos movimentos de massa a ambientes tropicais, como é o caso do Brasil.

No âmbito nacional, as principais classificações são as de Freire (1965), Vargas (1966) e Costa Nunes (1969), todas elas apresentando conotações regionais, voltadas para a ocorrência de movimentos de massa em ambientes tropical e subtropical úmido.

Augusto Filho (1992) revisou a proposta de classificação de Varnes (1978) e ajustou as características, propôs uma classificação, na qual divide as instabilidades de encostas em quatro grupos fenomenológicos, em função das características do movimento, dos materiais envolvidos e da sua geometria, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de movimentos gravitacionais de massa.

Processos	Características do movimento/material/geometria
Rastejo (Creep)	<ul style="list-style-type: none"> - vários planos de deslocamento (internos); - velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade; - movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - envolvem solos, depósitos, rochas alterada ou fraturada; - geometria indefinida.
Deslizamentos (Slides)	<ul style="list-style-type: none"> - poucos planos de deslocamento (externos); - velocidade média (m/h) a alta (m/s); - pequenos e grandes volumes de material; - geometria e materiais variáveis. <p>Planares: Solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza.</p> <p>Circulares: Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas.</p> <p>Em cunha: Solos e rochas com dois planos de fraqueza.</p>
Quedas (Falls)	<ul style="list-style-type: none"> - sem planos de deslocamento; - movimento em queda livre ou em plano inclinado; - velocidades muito altas (vários m/s); - envolve materiais rochosos em pequenos a médios volumes; - geometria variável (lascas, placas, blocos).
Corridas (Flows)	<ul style="list-style-type: none"> - muitas superfícies de deslocamento (internas e externas); - movimento semelhante a um líquido viscoso; - desenvolvimento ao longo das drenagens; - velocidades médias a altas; - envolve solos, rochas, detritos e água em grandes volumes; - extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Augusto Filho, 1992.

3.3 Causas e condicionantes dos movimentos gravitacionais de massa

Os movimentos gravitacionais de massa são processos complexos que envolvem muitas variáveis. Assim, pode-se verificar a dificuldade associada à remediação ou mitigação destes processos, visto que é muito importante identificar a sua causa para a definição de uma solução para o problema.

Cruden e Varnes (1996) apresentam um checklist das possíveis causas de movimentos gravitacionais de massa. Estas causas podem ser de origem geológica, morfológica, física ou por ação antrópica, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Causas de movimento gravitacionais de massa

Geológicas	Morfológicas	Físicas	Antrópicas
Materiais frágeis	Soerguimento tectônico ou vulcânico	Chuvas intensas	Escavação de encostas ou modificações geométricas complexas
Materiais sensíveis	Alívio de tensões por degelo	Rápido descongelamento da neve	Carregamento de encostas ou de sua crista
Materiais intemperizados	Erosão fluvial do pé da encosta	Precipitações excepcionais prolongadas	Esvaziamento rápido de reservatórios
Materiais cisalhados	Erosão do pé da encosta por ação das ondas do mar	Rápido rebaixamento do nível das águas (marés, enchentes)	Desmatamento
Materiais com juntas ou fissuras	Erosão glacial do pé da encosta	Terremotos	Irrigação
Descontinuidade da massa adversamente orientada	Erosão das margens laterais	Erupção vulcânica	Mineração
Descontinuidade estrutural adversamente orientada	Erosão subterrânea (<i>piping</i>)	Degelo	Vibrações artificiais
Contraste em permeabilidade	Carregamento da crista da encosta por deposição	Intemperismo por ciclos de gelo e degelo	Vazamento em redes de abastecimento de água
Contraste em rigidez	Remoção da vegetação	Intemperismo por ciclos de expansão e contração	Infiltração de esgotos

Fonte: Modificado de Cruden e Varnes, 1996.

No entanto, os movimentos gravitacionais de massa podem ter muitas causas, mas somente um deflagrador (VARNES, 1978 apud CRUDEN e VARNES, 1996). Os mecanismos deflagradores, ou gatilhos, como são citados na literatura, são por definição um estímulo

externo, como chuvas intensas, terremotos, erupções vulcânicas, ondas violentas ou fluxos erosivos intensos, que têm como resultado um quase imediato aumento das tensões ou redução da resistência do material envolvido (CRUDEN e VARNES, 1996).

Assim, a associação de predisposições da encosta à ruptura com um mecanismo deflagrador gera a condição necessária para a ocorrência do processo. Logo, qualquer esforço no sentido de se compreender esses processos passa necessariamente pela identificação das características da encosta, que a tornam suscetível à ruptura, e dos fatores que podem levar à deflagração do movimento.

Da mesma forma, Guidicini e Nieble (1984), ao estruturarem as causas de movimentos gravitacionais de massa, fazem uma distinção entre agentes predisponentes, que seriam a associação dos fatores motivadores e preparatórios, e agentes efetivos, que seriam os responsáveis por desencadear o fenômeno.

De especial interesse à compreensão do movimento gravitacional de massa apresentado nesta dissertação são:

- A ação da água oriunda das chuvas intensas como mecanismo deflagrador;
- O comportamento do solo em termos de resistência mecânica e características físicas

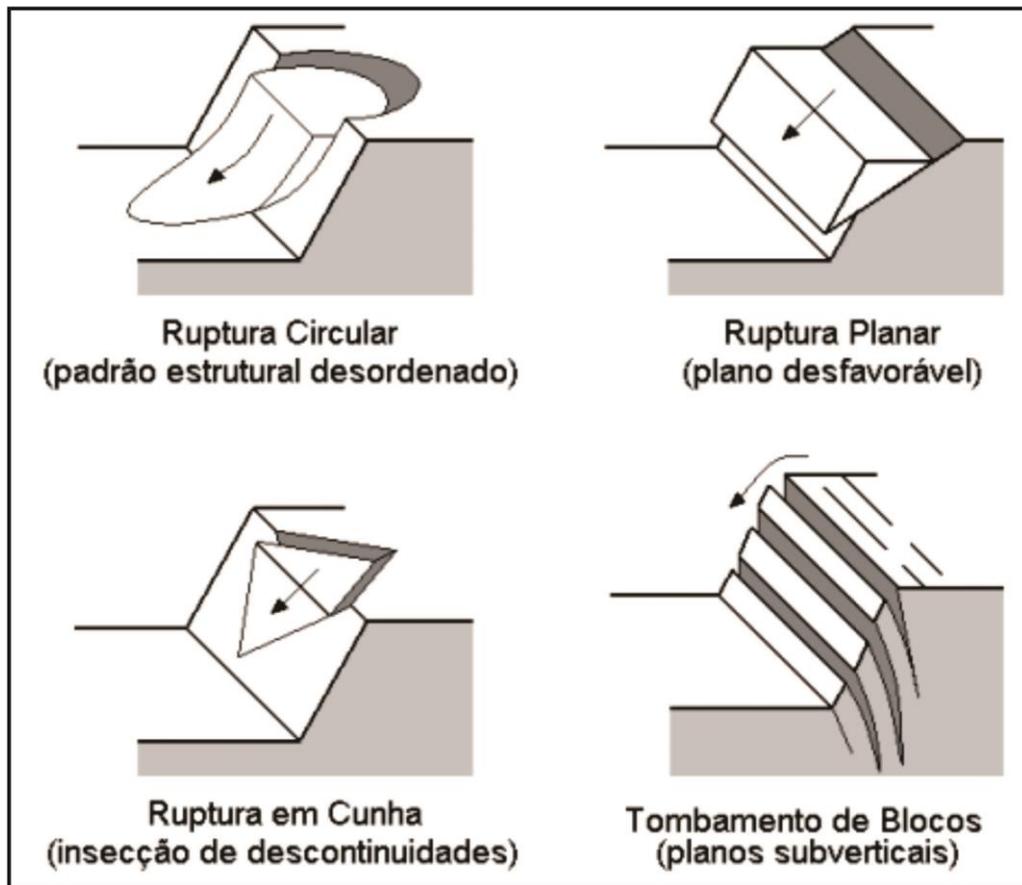
3.4 Processos de instabilização de taludes de mineração

Segundo Hoek e Bray (1981) os mecanismos de ruptura em maciços rochosos são fortemente condicionados pelas características das descontinuidades (principalmente altitude e persistência) e por suas relações geométricas com o plano do talude.

Hoek e Bray (op. cit.) relatam uma grande quantidade de trabalhos publicados referentes ao assunto, estabelecendo e, em alguns casos, reafirmando os critérios geométricos e cinemáticos que determinam a ocorrência de instabilidade em taludes. Os autores citam que os principais tipos de ruptura são: ruptura circular, ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento.

A ruptura circular é mais comum em maciços terrosos, enquanto que os outros tipos de ruptura são mais característicos de maciços rochosos. Os modelos dos tipos de ruptura estão apresentados na Figura 8.

Figura 8: Tipos de ruptura decorrentes da distribuição espacial das discontinuidades em maciços rochosos



Fonte: Modificado de Hoek e Londe 1974, Piteau e Martin 1981.

- (i) A **ruptura circular** acontece quando o material é muito fraco (como solos). Contudo, este tipo de movimento pode ocorrer em maciços rochosos, quando este se apresenta bastante fraturado ou quebrado, como em pilhas de rejeito. O rompimento que ocorre é apenas em um plano e tende a percorrer um caminho circular.
- (ii) A **ruptura planar** ocorre quando uma discontinuidade que mergulha na direção do talude intercepta a face do mesmo com um ângulo maior que o ângulo de atrito, como, por exemplo, em um plano de acamadamento.
- (iii) A **ruptura em cunha** acontece quando duas discontinuidades oblíquas interceptam a superfície do talude, quando a intersecção das duas mergulha no sentido do mesmo, com um mergulho maior que o ângulo de atrito.
- (iv) O **tombamento** é um movimento originado da rotação de colunas ou de blocos de rocha sobre uma base fixa. Goodman e Bray (1976) subdividem em flexural,

tombamento de blocos e tombamento bloco-flexural. O tombamento flexural ocorre principalmente em taludes escavados em rochas sedimentares estratificadas ou metamórficas foliadas, cujas direções da foliação ou estratificação são praticamente paralelas à direção do talude e mergulham em sentido inverso ao do mesmo. Devido à ação do próprio peso, as lâminas rochosas separadas pelas discontinuidades podem, dependendo do atrito entre elas, deslizar uma sobre a outra e fletir, até romperem por tração em sua base. O tombamento de blocos ocorre quando existem juntas ortogonais espaçadas, individualizando blocos e a direção do talude favorecendo sua queda.

Em maciços terrosos, as principais propriedades que caracterizam a estabilidade são a coesão e o ângulo de atrito. Contudo, outros fatores influenciam direta ou indiretamente, tais como o peso específico, granulometria, índice de vazios, mineralogia, entre outros (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

Vale ressaltar que, além dos solos originados através da alteração da rocha *in situ*, há solos que foram carregados por algum agente de transporte. Apesar de sua extensa ocorrência no Brasil, a maioria das classificações propostas restringem-se aos solos residuais (VAZ, 1996).

A principal distinção entre os solos transportados é feita a partir do agente de transporte, que são geralmente a água, o vento e a gravidade. Os principais tipos que ocorrem no Brasil são:

- A) Aluviões: constituídos por materiais erodidos, retrabalhados e transportados pelos cursos d'água e depositados nos seus leitos e margens, ou ainda em fundos e margens de lagoas e lagos, sempre associados a ambientes fluviais.
- B) Colúvios: constituídos por depósitos de materiais soltos, encontrados no sopé de encostas e que foram transportados pela ação da gravidade.
- C) Depósitos de tálus: formados pelos mesmos processos de transporte por gravidade, em encostas, que produz os coluviões, diferenciando-se pela presença de blocos de rocha.
- D) Solos eólicos: são transportados e depositados pela ação dos ventos, composto geralmente por areias quartzosas, apresentando um bom selecionamento, típico de ambiente de dunas.

3.5 Fatores Condicionantes de Instabilização

VIEIRA et al. (1997) afirma que os diversos fatores que contribuem para a geração de movimentos de massa são:

- Morfologia do terreno (declividade, forma em planta e perfil, orientação, entre outros);
- Regime pluviométrico (intensidade e volume da chuva, umidade antecedente);
- Propriedades do solo e da rocha (espessura, textura, mineralogia, coesão, atrito interno, descontinuidades hidráulicas, profundidade e característica do contato solo-rocha, feições estruturais da rocha, etc.);
- Cobertura vegetal (tipo, densidade, etc.);
- Uso e ocupação do solo;
- Ação antrópica (Remoção do pé do talude por corte ou erosão, mudanças no regime hídrico).

As causas que determinam o movimento de deslizamento em um talude dependem do fenômeno que contribui para um aumento da tensão de cisalhamento e/ou uma redução da resistência ao cisalhamento.

3.6 Descrição dos Métodos de Análise

3.6.1 Fator de segurança

A realização de análises de estabilidade de taludes pode ter vários objetivos, conforme a origem natural ou artificial do problema em estudo (Campos e Matos, 1980). Os taludes naturais existem na natureza com grau de estabilidade superior a 1, pretendendo-se, por isso, avaliar a necessidade ou não de medidas de estabilização para impedir que esse grau baixe e se dê o colapso.

No caso de barragens, mineração e aterros (origem artificial), o objetivo desse tipo de análise será o de encontrar a inclinação adequada para os taludes de modo que o fator de segurança seja superior a 1, entrando em linha de conta com dois aspectos fundamentais: a segurança e os custos. Desta forma se encontrará a solução ótima.

Os tipos de ruptura e os diversos cenários de obra tornam estas análises mais ou menos complexas, a maior parte dos casos ao se tratar de taludes naturais, é difícil encontrar um procedimento que permita a avaliação da segurança de uma forma geral (Matos Fernandes, 2006).

Um talude torna-se instável quando, sob determinadas condições, uma massa de solo/rocha se desconecta do restante, assim, ao perder a sua capacidade de equilíbrio, entra em movimento. Os tipos de movimento podem ser muito variados, dependendo das características do talude Varnes (1978).

Os deslizamentos de um talude podem ser divididos em dois tipos: os escorregamentos por translação e os escorregamentos por rotação.

A translação ocorre fundamentalmente quando um estrato mais resistente, subjacente à massa instável, se encontra a pouca profundidade e relativamente paralelo à superfície do talude.

A rotação tem tendência de ocorrer em solos homogêneos ou com características não muito distintas, em que a superfície de rotura se define com forma curva ou praticamente circular em muitos casos. Quando no interior de um estrato existe uma camada relativamente fina, constituída por um material mais fraco, a superfície de deslizamento pode assumir uma configuração mista, isto é, circular nas extremidades e poligonal no contato com essa camada.

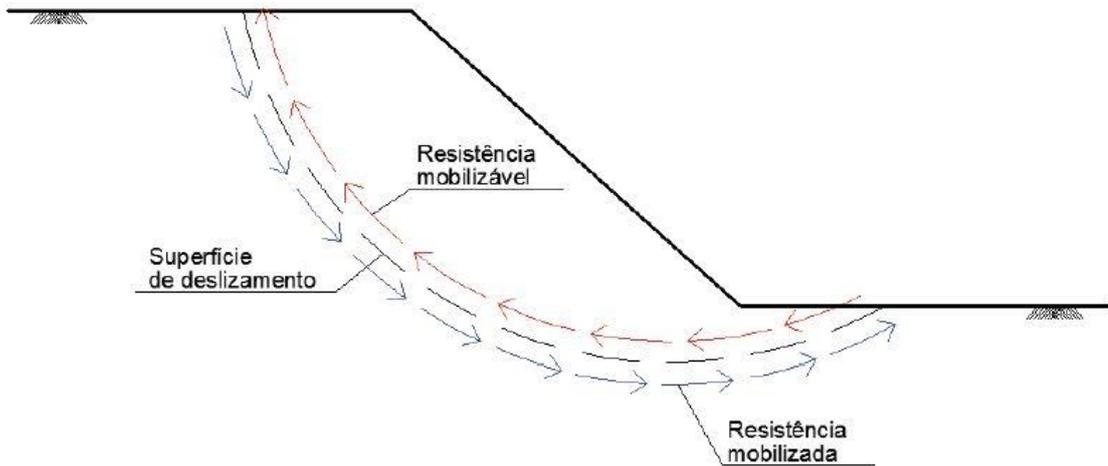
Os fatores que contribuem para a ocorrência deste tipo de acidente podem ser muito variados. Os mais frequentes, e apontados por vários autores na bibliografia existente, são os seguintes:

- Deterioração das características mecânicas do solo pela ação dos vários agentes atmosféricos;
- Variação do nível freático ao longo do ano;
- Ocupação urbana;
- Alterações na geometria do talude;
- Ocorrência de sismos.

A presença destes fatores resulta no aumento das solicitações atuantes e diminuição da resistência do solo, podendo conduzir à instabilidade e consequente ocorrência de deslizamentos.

Uma análise de estabilidade deve prever o aumento de solicitação que o solo será capaz de suportar até se desencadear algum mecanismo de instabilidade. Tal situação acontecerá quando as tensões de corte máximas mobilizáveis pelo solo ao longo de uma determinada superfície forem ultrapassadas

Figura 9: Resistência mobilizável e resistência mobilizada.



Fonte: Modificado de Silva, 2011

Desta forma se define o fator de segurança do talude Equação (1), parâmetro que permite perceber se o mesmo se encontra mais ou menos instável:

$$FS = \frac{\int \tau_f}{\int \tau_{mob}} \quad (1)$$

Onde τ_f representa a resistência mobilizável e τ_{mob} a resistência mobilizada. As forças que impelem ao escorregamento, são representadas pelas setas azuis, e as forças que se opõem ao movimento são representadas pelas setas em vermelho.

Adiante será visto que o fator de segurança também pode ser calculado via equilíbrio de forças ou de momentos. Em todos os casos, a sua definição mantém-se: valor pelo qual se deve dividir a resistência do maciço para obter a resistência mobilizada (Matos Fernandes, 2006).

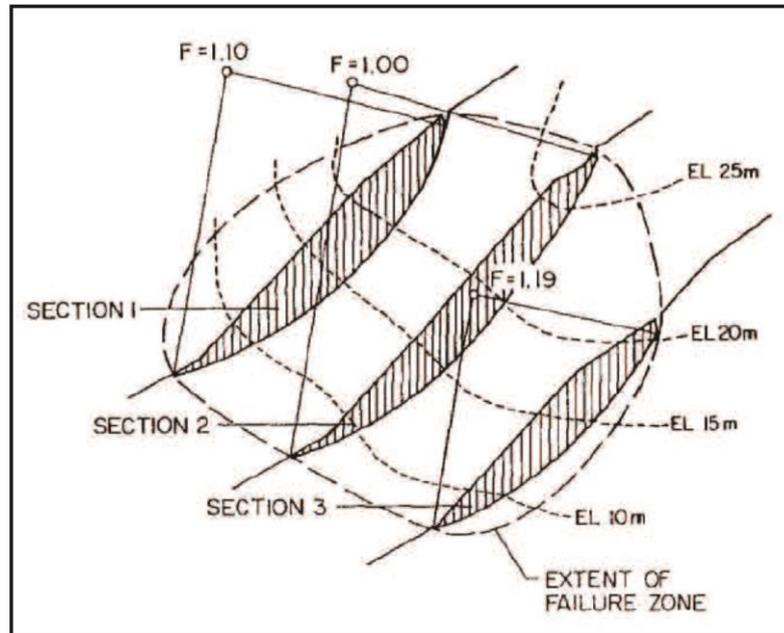
3.6.2 A Teoria de Equilíbrio Limite

A Teoria de Equilíbrio Limite é uma filosofia de cálculo utilizada como base dos métodos de equilíbrio limite conhecidos na bibliografia. É utilizada para determinar o equilíbrio de uma massa de solo, cuja ruptura ocorre ao longo de uma superfície plana, circular, poligonal ou mista, que pode passar acima ou abaixo do pé de talude.

Essa massa de solo acima da superfície de deslizamento é considerada como um corpo livre, admitindo-se que todas as partículas ao longo da linha de ruptura atingiram a condição de $FS=1$. Desta forma, embora não seja totalmente verdadeiro, assume-se que o fator de segurança é o mesmo em todos os pontos.

A configuração da linha de ruptura pode variar ao longo da extensão do talude, conduzindo a fatores de segurança relativamente distintos de secção para secção Figura 10.

Figura 10: Talude com diferentes superfícies de deslizamento



Fonte: Modificado de Gerscovich, 2009

Uma vez feitas as análises, considera-se para o estudo a seção mais crítica do talude. Desta forma, não são tidos em conta os efeitos de confinamento lateral (Gomes, 2011).

A determinação do fator de segurança pode ser feita de três formas:

- Equilíbrio de forças:

$$FS = \frac{\Sigma F_{estabilizadoras}}{\Sigma F_{instabilizantes}} \quad (2)$$

- Equilíbrio de momentos:

$$FS = \frac{\Sigma M_{estabilizadoras}}{\Sigma M_{instabilizantes}} \quad (3)$$

- Equilíbrio de limite ao corte:

$$FS = \frac{\int \tau_{mobilizavel}}{\int \tau_{mobilizada}} \quad (4)$$

As duas primeiras equações podem conduzir a alguma confusão (indevida) na definição das componentes das forças e momentos que contribuem para a resistência ao deslizamento ou

que se opõem ao movimento (Aryal, 2006). As componentes das forças, bem como dos momentos resistentes, são consideradas positivas se constituem um impedimento ao movimento da massa de solo. No entanto, essas mesmas componentes são por vezes incluídas com sinal negativo no denominador, por se considerar que impõem uma redução do valor da ação instabilizadora sobre o talude. Estas duas possibilidades de análise podem conduzir a fatores de segurança diferentes, problema que não acontece se for utilizada a equação (4), em que o numerador é definido pelo critério de ruptura a utilizar. Apesar disso, grande parte dos métodos de equilíbrio limite definem FS a partir da equação de equilíbrio de momentos, como se verá mais adiante.

A avaliação da resistência mobilizável ($\tau_{mobilizavel}$ ou τ_f) é feita pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (5)$$

Onde c' é a coesão, σ' é a tensão efetiva e ϕ' é o ângulo de atrito. A resistência mobilizada ($\tau_{mobilizavel}$ ou τ_{mob}) é dada por:

$$\tau_{mob} = \frac{(c' + \sigma' \tan \phi')}{FS} \quad (6)$$

As equações (5) e (6) são válidas para uma análise em tensões efetivas. O mesmo tipo de análise pode ser realizado em tensões totais se entrarmos na equação da resistência mobilizável com a resistência não drenada. A escolha por uma análise em tensões efetivas ou em tensões totais dependerá sempre daquela que for considerada a mais importante em termos de instabilidade.

A Teoria de Equilíbrio Limite é aplicada a vários tipos de análise de estabilidade que são comumente realizados pela aplicação de um dos três seguintes métodos (Gomes, 2011):

- Método geral – as condições de equilíbrio são aplicadas a toda a massa de solo potencialmente instável, cujo comportamento se admite ser o de um corpo rígido;
- Método das fatias – a massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias, geralmente verticais, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada uma das fatias isoladamente;

- Método das cunhas – a massa de solo potencialmente instável, dada a sua configuração e características resistentes, é dividida em cunhas, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada zona isoladamente.

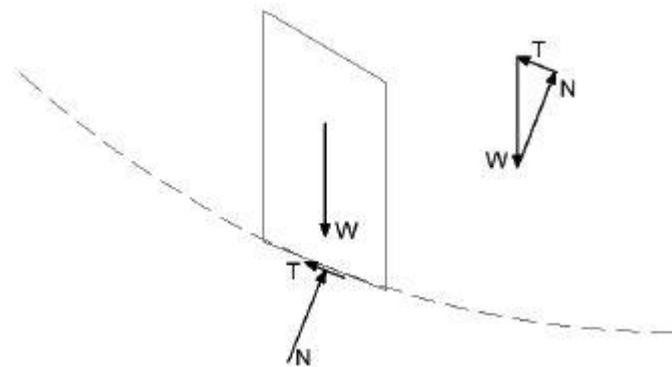
3.6.3 Métodos equilíbrio limites

Método de Fellenius

O método de Fellenius é o mais simples de todos, pois é o único que estabelece uma equação linear para determinação do fator de segurança. Assume que as forças de interação entre fatias são paralelas à base das mesmas, o que, dessa forma, permite dispensá-las do cálculo. De fato, esta simplificação não é verdadeira, pois as forças resultantes, sendo, segundo o método, paralelas à base, não podem ter a mesma inclinação em todas as fatias. Quando se passa para a análise da fatia seguinte, a inclinação muda (Fredlund, 1977). Desta forma, o princípio da ação-reação de Newton não é satisfeito. A reação normal na base das fatias

Figura 11, pode ser obtida através do equilíbrio de forças segundo a direção perpendicular à base ou através das equações de equilíbrio segundo a vertical e a horizontal. A equação do fator de segurança deriva de uma equação de momentos.

Figura 11: Método de Fellenius



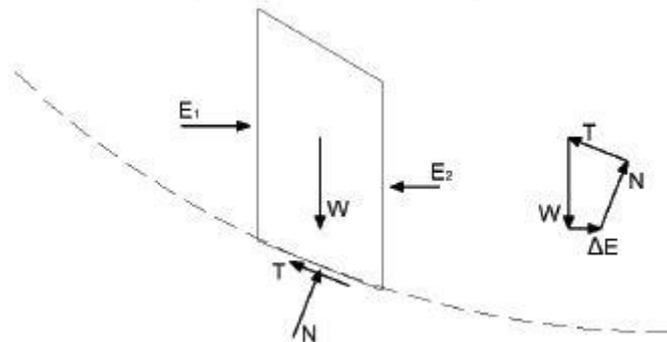
Fonte: Silva, 2011

Método de Bishop

O método de Bishop foi desenvolvido inicialmente para análise de superfícies circulares, mas a sua aplicação também é válida para superfícies não circulares. O método ignora as forças de corte entre as fatias,

Figura 12, e satisfaz apenas o equilíbrio de momentos (de onde deriva o fator de segurança). Os bons resultados de FS que este método fornece para determinado tipo de análises motivaram o seu estudo mais aprofundado. Zhu (2008) mostra que o fato de as forças de corte entre fatias não aparecerem na equação do fator de segurança não quer dizer que sejam zero, mas sim que um dos termos dessa equação seja zero. Tal fato acontece se assumirmos uma distribuição adequada das forças de corte verticais entre fatias que satisfaça, ao mesmo tempo, o equilíbrio de forças horizontais, explicando, assim, a sua precisão quando comparado com outros métodos. A reação normal na base é obtida através do equilíbrio de forças segundo a direção vertical.

Figura 12: Método de Bishop

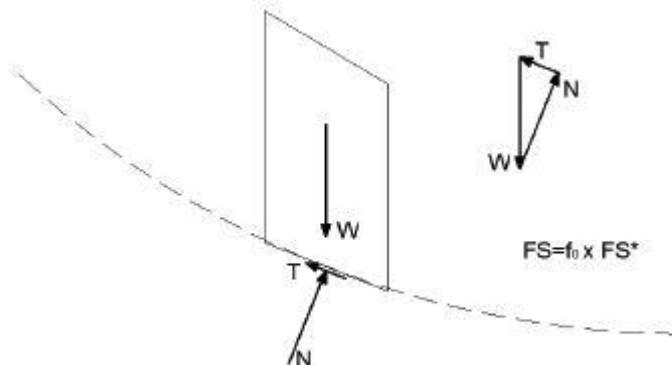


Fonte: Silva, 2011

Método de Janbu (simplificado)

O método de Janbu (simplificado) ignora as forças normais e de corte entre fatias Figura 13, e satisfaz apenas o equilíbrio de forças. O método introduz um fator corretivo f_0 que multiplica pelo fator de segurança resultante do equilíbrio de forças segundo a direção horizontal. Este fator corretivo existe para ter em conta as forças de interação negligenciadas pelo método. O fator de segurança final é o que resulta do produto com f_0 . A reação normal na base é calculada pela equação de equilíbrio de forças verticais (Fredlund, 1977).

Figura 13: Método de Janbu (simplificado)



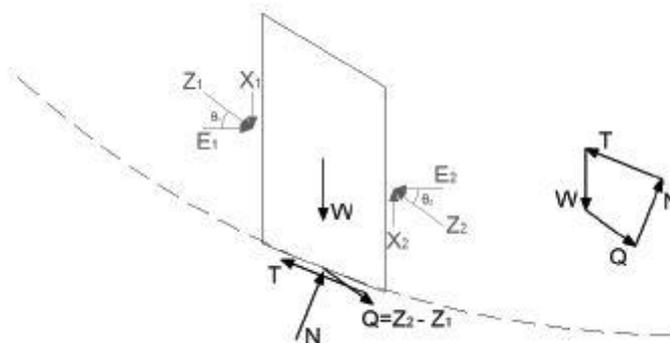
Fonte: Silva, 2011

Método de Spencer

O método de Spencer, considerado rigoroso, satisfaz todas as equações de equilíbrio (momentos e forças). As forças de interação entre fatias são representadas por uma resultante Q que assume uma inclinação constante θ com a horizontal, em cada fatia

Figura 14. Spencer entendeu válida a hipótese de a razão entre forças de corte (X) e forças normais (E) ser constante. Essa resultante é aplicada na base da fatia e no ponto intermediário dela. A reação normal N é obtida pelo equilíbrio de forças na direção paralela e perpendicular à base das fatias. O fator de segurança pode ser obtido por duas formas: somatório de momentos em relação a um ponto ou somatório de forças na direção horizontal ou paralela à base das fatias. O método prevê o cálculo de FS para os dois ângulos, correspondentes aos dois lados das fatias (Fredlund, 1977).

Figura 14: Método de Spencer

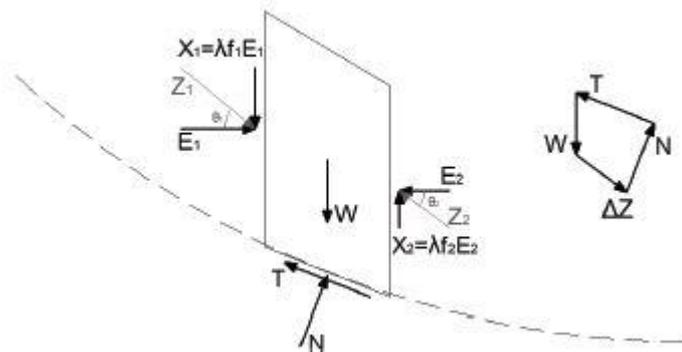


Fonte: Silva, 2011

Método de Morgenstern-Price

O método de Morgenstern-Price será exposto com detalhe no capítulo 4. Pertence ao grupo dos métodos rigorosos, cumprindo, por isso, todas as condições de equilíbrio. As forças de interação são, neste caso, controladas por uma função $f(x)$ multiplicada por um fator λ , que deve ser especificada previamente. Essa função determina a inclinação das forças entre fatias Figura 15. Se for constante este método dá os mesmos resultados que o de Spencer.

Figura 15: Método de Morgenstern-Price



Fonte: Silva, 2011

3.7 Introdução aos métodos numéricos

3.7.1 Métodos de Elementos finitos

A aplicação dos métodos de equilíbrio limite às análises de estabilidade de taludes pode, conforme já explanado, suscitar algumas dúvidas quanto à razoabilidade dos seus resultados, dadas as simplificações teóricas que os caracterizam. Assim se procurou implementar outros tipos de análises, que possibilitassem incorporar as relações tensão-deformação dos solos, como é o caso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MEF foi introduzido na engenharia geotécnica por Clough e Woodward (1967) no estudo de uma barragem de terra, onde foi usada uma lei constitutiva não linear, e as suas potencialidades tornaram-se desde logo evidentes. No entanto, vários fatores impediram o uso mais amplo deste método, como, por exemplo, o difícil acesso ao computador, o custo de processamento (sobretudo associado ao tempo de preparação e de cálculo), o pouco conhecimento sobre o método (vantagens e limitações) e a falta de estudos paramétricos entre MEF e métodos de equilíbrio limite. Hoje a sua utilização generalizou-se, nomeadamente, pelo aparecimento de programas comerciais voltados, precisamente, para os problemas geotécnicos (caso do RS2).

3.7.2 Aspectos gerais da formulação

O método nasce a partir da análise do material, designado por domínio, e ações atuantes sobre o mesmo, para um determinado caso em estudo. O problema pode colocar-se da seguinte forma: “num dado domínio, com características e propriedades conhecidas, pretende-se determinar o campo de deslocamentos e tensões, para um determinado conjunto de solicitações e condições fronteira” (Delgado, 1987).

As tensões/deformações unitárias são calculadas nos vários pontos constituintes do material através das teorias da Elasticidade e Plasticidade. O cálculo pode realizar-se considerando a não-linearidade da curva tensão-deformação do material, anisotropia, heterogeneidade, influência do estado de tensão inicial, fases de construção, etc.

A prossecução do método envolve várias etapas, às quais aqui se faz uma breve referência, considerando por simplicidade a aplicação a um problema elástico. Para uma abordagem aprofundada do MEF aconselha-se a leitura de Delgado (1987) e Onâte (2009).

Devido ao comportamento complexo dos solos, a execução de experimentos que retratem com fidelidade as condições nas quais o solo será submetido no campo é às vezes dispendiosa, quando não impossível. Como alternativa, estudos numéricos têm sido cada vez mais utilizados em projetos geotécnicos.

A vantagem do uso de ferramentas numéricas na busca da compreensão da resposta dos solos aos diversos sistemas construtivos reside na possibilidade de incorporação da não linearidade da curva $\sigma \times \epsilon$, da anisotropia, da não homogeneidade, da influência do estado inicial de tensões e das etapas construtivas. Como resultado, identificam-se áreas rompidas ou plastificadas, níveis de tensão e magnitude das deformações.

Os métodos numéricos são divididos em três tipos diferentes de abordagem:

- 1 Método das Diferenças Finitas (MDF) - Método que substitui a equação diferencial que governa o fenómeno em estudo por uma equação algébrica que relaciona o valor da variável do problema em um ponto aos valores em quatro pontos vizinhos. A solução é fornecida em pontos no domínio do problema.
- 2 Método dos Elementos de Contorno (MEC) - Método similar aos Elementos Finitos, utilizado basicamente em problemas lineares e homogêneos, tem como característica a divisão somente do contorno, o que reduz o trabalho de divisão e o número de equações. Como somente o contorno é estudado, a complexidade inerente ao solo torna este método pouco indicado para a geotecnia.

3 Método dos Elementos Finitos (MEF) - Método que consiste na divisão do meio contínuo em elementos cujo comportamento pode ser formulado em função da sua geometria e de suas propriedades. O conjunto de elementos discretizados no modelo forma a malha de Elementos Finitos. Os elementos são conectados por nós, cuja a quantidade irá afetar diretamente a precisão do resultado. Estes elementos podem ter propriedades diferentes entre si, uma vez que, as leis básicas do problema são atribuídas a pontos de tensão no interior dos elementos, e funções de interpolação são utilizadas para estender os resultados aos nós, onde são computados os deslocamentos.

O MEF, por sua versatilidade, é o mais utilizado em geotecnia. O aumento da quantidade de nós faz a solução por Elementos Finitos convergir para a solução exata. Deve-se considerar que, ao refinar uma malha, estamos aumentando automaticamente a quantidade nós, e isso leva a um maior esforço computacional e maior consumo de tempo para realização do cálculo.

Em alguns casos o maior refinamento não promove melhorias significativas nos resultados. Griffiths e Marquez (2007) realizaram análises de estabilidade 3D por Elementos Finitos com diferentes discretizações e concluíram que a diferença entre FS não ultrapassava 2%.

Griffiths e Lane (1999) apresentam algumas vantagens do uso de programas de Elementos Finitos para realização de análises de estabilidade, em detrimento de soluções baseadas no método de Equilíbrio Limite, entre elas destaca-se as resumidas a seguir:

- Não é necessário arbitrar a superfície crítica, a ruptura vai acontecer na região onde a massa de solo não tiver resistência ao cisalhamento suficiente para equilibrar as tensões cisalhantes geradas;
- Por não ser necessário subdividir a massa em fatias, não há necessidade de introdução de hipóteses quanto aos esforços entre fatias e, conseqüentemente, interferências nos cálculos de equilíbrio de forças e momentos. No Método de Elementos Finitos (MEF) o equilíbrio é mantido até a ruptura;
- É possível conhecer as informações sobre as deformações.

Em programas baseados em Elementos Finitos as tensões iniciais são geradas pela ação do peso próprio, e os valores são comparados com as tensões na ruptura. Caso sejam iguais, ocorre a plastificação da região e a parcela não linear do algoritmo é ativada; os excessos de tensão são então transmitidos para os pontos vizinhos, que por sua vez são testados com relação ao critério de ruptura, e assim por diante. O processo interativo continua até a formação de região de plastificação contínua.

Nas análises de estabilidade de talude pelo Método dos Elementos Finitos são dados de entrada a coesão (c'), o ângulo de atrito (ϕ'), o peso específico (γ), o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de elasticidade (E).

Brinkgreve e Bakker (1991) citam que é possível carregar solos coesivos até o colapso por incremento da gravidade ou em centrifugas, porém, em solos caracterizados pelo atrito, esse carregamento não é tão simples e com isso a determinação do fator de segurança (FS) se faz pela redução dos parâmetros de resistência, conforme mostra a equação (x). Uma técnica desenvolvida por Taylor (1948), é a mais adequada para algumas aplicações da engenharia de solos, como obras cuja a estabilidade não dependa somente da carga externa, mas principalmente do peso próprio.

3.7.3 Aplicação na simulação de colapso

O Método dos Elementos Finitos permite a realização de simulações de colapso, por exemplo, no caso de solos. A sua aplicação visa determinar a superfície de deslizamento associada a uma grande massa de solo, e cálculo do respectivo fator de segurança. A simulação de colapso pode ser feita por duas vias:

- Redução progressiva dos parâmetros de resistência dos solos;
- Aumento progressivo do carregamento que solicita o solo.

A redução dos parâmetros resistentes é a via utilizada pelos programas comerciais utilizados neste estudo (sendo referida como "*Shear Strength Reduction*" no RS2) e define-se por:

$$c'^* = \frac{c'}{M} \quad (7)$$

$$\tan * \phi' = \frac{\tan \phi'}{M} \quad (8)$$

onde M é o parâmetro adotado para reduzir os valores de c' e $\tan \phi'$, aplicado em cada análise, até que a ruptura ocorra. Esta acontece quando $M = FS$. A técnica envolve, desta forma, várias análises do mesmo problema, mas com diferentes valores dos parâmetros resistentes.

Para ambos os casos, a não convergência do cálculo do sistema de equações não lineares que traduz o equilíbrio do solo dá a indicação da ruptura do talude.

CAPÍTULO 4

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para a execução deste trabalho. Por se tratar de uma retroanálise de estabilidade de talude, será adotada uma certa rotina de trabalho para assegurar que a coleta dos dados e a veracidade deles estejam de acordo com a realidade e normativas.

O trabalho de uma análise de estabilidade deve seguir a seguinte metodologia:

- Definição da topografia do talude;
- Definição das sobrecargas a serem aplicadas sobre o talude, caso existam;
- Execução das investigações de campo para definir a estratigrafia e identificar os elementos estruturais eventualmente enterrados na massa e os níveis freáticos;
- Definição dos locais de extração de amostra indeformada;
- Realização de ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento;
- Análise dos resultados dos ensaios para definir os parâmetros de projeto;
- Adoção de métodos de dimensionamento para obtenção do fator de segurança ou das tensões e deformações.

A fim de cumprir com todas estas metodologias propostas foi realizada uma subdivisão da metodologia em três diferentes etapas, são elas: Etapa de campo, Etapa laboratorial e Etapa computacional. Assim cada particularidade pode ser melhor explorada.

4.1 Etapa Campo

Durante a etapa de campo, que iniciou no mês de dezembro de 2015, foi possível fazer um contato com o local de estudo. Nesta primeira visita se observou a ruptura do talude e os problemas gerados pelo fato.

Nota-se que a etapa de coleta está sendo realizada durante os meses de verão e a quantidade de água que percola pelo talude é substancial. Como já comentado acima sobre o clima, durante os meses de inverno a região enfrenta fortes regimes de chuva. No ano de 2015 em particular, durante estes meses ocorreram chuvas atípicas com níveis pluviométricos bem além do esperado. Esta ressalva é feita pois a água é um fator que deve ser sempre levado em consideração neste tipo de análise.

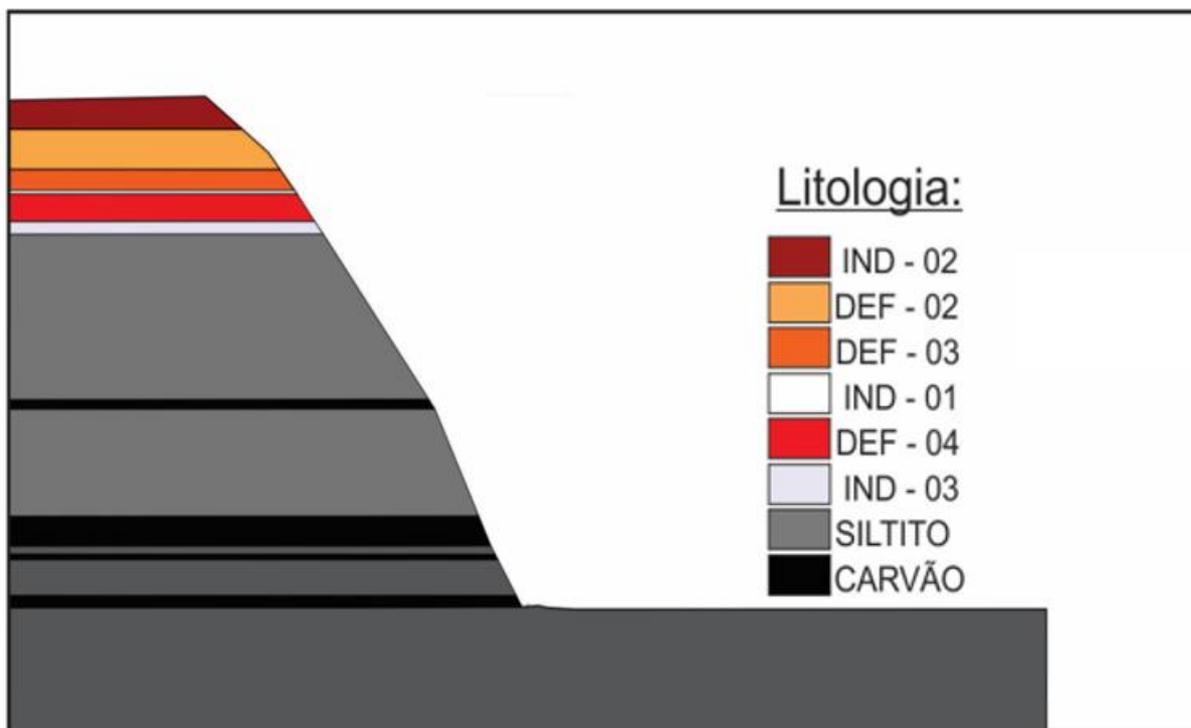
4.1.1 Análise Topográfica

Juntamente com a equipe de topografia da empresa, que nos foi disponibilizada, foi feito um perfil topográfico do talude. A seguir os objetivos deste perfil:

- Quantificar os ângulos específicos e global da face do talude;
- Fazer a diferenciação de camadas e litologias;
- Coleta das amostras indeformadas e deformadas;
- Marcar pontos onde existiam *pipes*, água escoando pelo talude.

Durante a aquisição dos dados topográficos foram coletadas as informações de crista e pé de cada umas das camadas para assim diferenciá-las. Através da Figura 16, é possível observar.

Figura 16: Imagem perfil pontos de coletas nas litologias identificadas



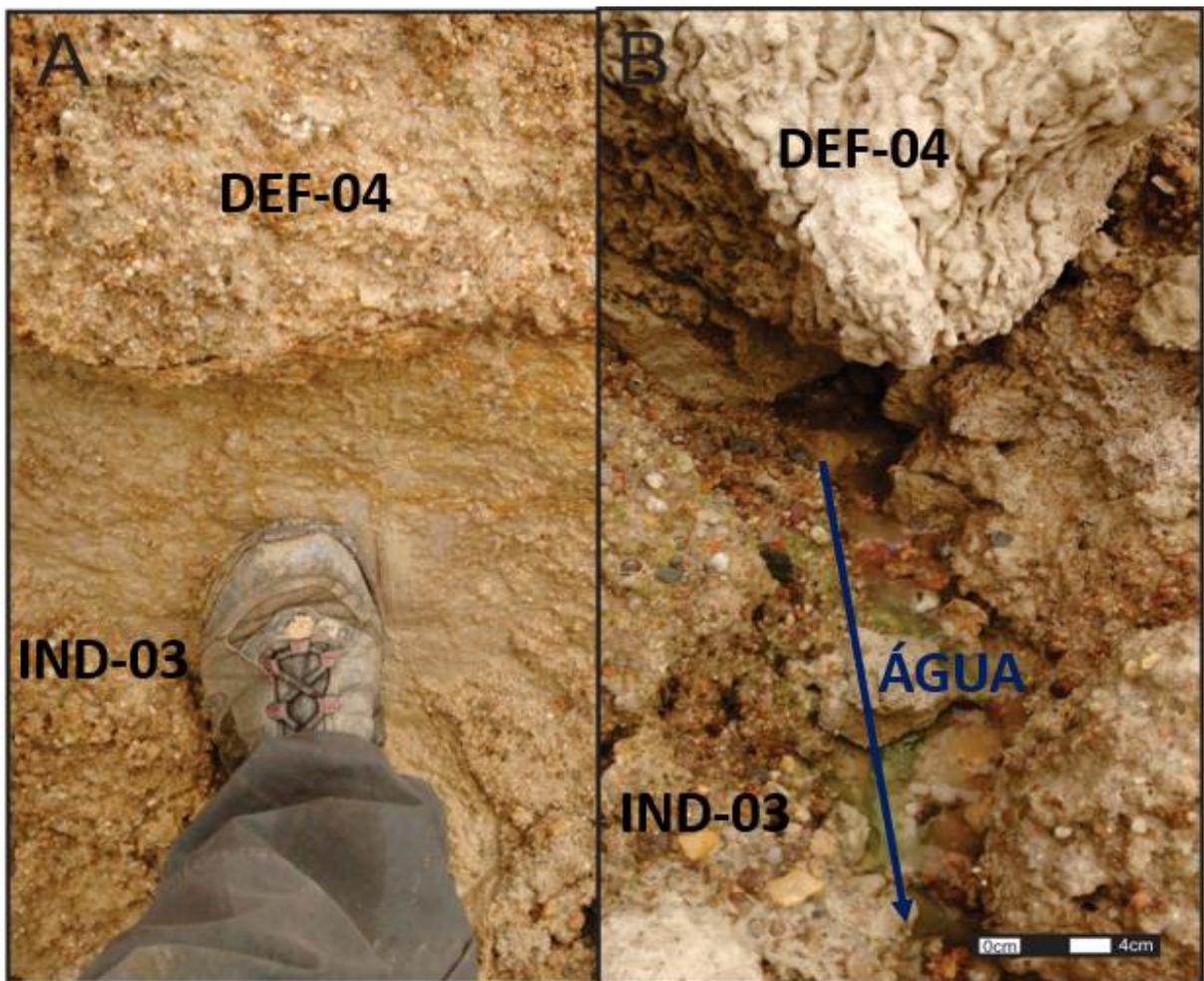
Fonte: Autoria própria

Uma análise das diferentes camadas intercaladas de areias e argilas mostrou favorável seis pontos de coletas na face do talude, de amostras deformadas e indeformadas. Inicialmente se utilizou a nomenclatura de DEF-02, DEF-03 E DEF-04 para as amostras coletadas de forma deformada. Para as amostras indeformadas se utilizou da nomenclatura de IND-01, IND-02 e IND-03.

Durante esta etapa, junto com a equipe de topografia, foi realizada a marcação de pontos onde se encontrou *pipes* no talude, isto é, pontos onde o nível freático do talude aflorava. Na

Figura 17, é possível verificar no contato da camada DEF-04 com a IND-03 um ponto onde a água estava aflorando na face do talude. Na camada DEF-04 uma área de granulação grosseira apresenta-se bem permeável e se encontrava com grande umidade durante a coleta, esta camada faz contato na sua parte inferior com uma camada de argila plástica cinza clara. O contato entre estas duas camadas gera uma superfície de interface propícia para que a água possa percolar, seu fluxo contínuo gera um grande enfraquecimento no contato entre estes dois materiais. Com a erosão que acaba ocorrendo, a força de atrito tende a sofrer uma grande diminuição.

Figura 17: A) Contato da camada DEF-04 e IND-03, B) Entre o contato existe a percolação constante de água.



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Coleta de Amostras Indeformadas

As amostras de solo utilizadas na execução dos ensaios de laboratório foram coletadas de forma deformada e indeformada, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 9604/1986, em dezembro de 2015.

Dos seis pontos de interesse, três deles eram representados por materiais argilosos, optando-se, assim, por fazer a coleta de forma indeformada. Os outros três pontos restantes eram representados por materiais mais arenosos, assim a coleta foi feita de maneira deformada.

As amostras indeformadas tinham objetivo de serem destinadas aos ensaios de cisalhamento direto, desta forma foram obtidas por meio da moldagem de blocos. Estes blocos tinham cerca de 24 cm de aresta, escavados e moldados com a utilização de espátulas, pás e facas. Depois de alcançadas as dimensões determinadas, o bloco era separado do terreno. O preparo para retirada e transporte envolvia em recobrir o bloco por uma camada de tecido denominado Tule, seguido pela aplicação de parafina em todas as seis faces. O bloco era colocado dentro da caixa de madeira que estava revestida com estopa para evitar vibrações durante o transporte das amostras para o laboratório. Neste trabalho se optou pela utilização de parafina no acondicionamento das amostras, por julgar ser esta uma boa maneira de manter as amostras protegidas contra perda de umidade e eventuais choques mecânicos. A caixa de madeira de cada bloco continha em sua face superior as informações para sua posterior identificação, como: nome, local de coleta, norte e data. A Figura 34, retrata todo o processo de coleta dos blocos indeformados.

Figura 18: A) Escavação e moldagem do bloco; B) Colocação do tecido tule em volta do bloco; C) Aplicação de parafina líquida; D) Finalização de retirada do bloco e fechamento da caixa



Fonte: Autoria própria

A amostra IND-01, representada na Figura 19, se encontra na parte mediana do talude composto pelo aluvião em estudo. Este ponto foi escolhido por apresentar uma camada de material silte argiloso de coloração cinza clara com presença de material marrom avermelhado em sua composição. Esta camada apresenta uma espessura na ordem de 15cm. Para a composição do bloco de 24cm de aresta os últimos 9cm do bloco eram compostos por um material arenoso de coloração cinza clara. Este material, por ter em sua composição uma porção

arenosa, poderia não ter competência para manter a forma do bloco, mas isto não ocorreu. A extração foi feita corretamente. No local não havia presença de água, a transição entre os dois materiais encontrados era de cerca de 3cm. O material silte argiloso era bem plástico, de fácil moldagem.

Figura 19: Bloco Indeformado amostra, IND-01.

IND-01



Fonte: Autoria própria

A amostra IND-02, representada na Figura 20, se encontra na parte superior do talude composto pelo aluvião em estudo. Este ponto foi escolhido por apresentar uma camada de material argiloso de coloração marrom escuro com a presença de material mais escuro, podendo conter matéria orgânica, também argilosa. Esta camada de argila apresenta cerca de 2,5 a 3m de espessura, sendo representada aqui por este bloco com 24cm de aresta. Este material, por se encontrar no topo do talude, estava mais seco, não existiam pontos com presença de água no local. Isto deixava com que o material argiloso estivesse bastante duro, sendo difícil realizar a moldagem do bloco e extração do mesmo com as ferramentas disponíveis. Numa certa profundidade (pequena) o material apresentava determinada umidade, ainda que baixa, o que tornou possível trabalhar com o mesmo. A ajuda do trator foi necessária para realizar um decapeamento do local de amostragem, e a coleta se procedeu alguns centímetros abaixo, assim sendo retirada corretamente.

Figura 20: Bloco Indeformado amostra, IND-02.

IND-02



Fonte: Autoria própria

A amostra IND-03, representada na

Figura 21, se encontra na parte mais inferior do talude composto pelo aluvião em estudo, abaixo desta camada se encontra o Siltito. Este ponto foi escolhido por apresentar uma camada relativamente homogênea de argila de coloração cinza/ cinza claro, se mostrando um material com características bem plásticas. Esta camada argilosa apresenta uma espessura na ordem de 1m, mas sendo neste trabalho representada pelo bloco de 24cm de aresta. Esta argila está em contato na parte superior com uma camada de areia grossa, na interface dessas duas camadas foram encontrados diversos pontos de *pipes* onde a água vertia do talude em um substancial fluxo. Esta interface entre as camadas torna-se um importante ponto do estudo, pois através dela se delimita o nível freático do talude. A argila cinza tem comportamento plástico e um alto grau de umidade, sendo fácil realizar a moldagem do bloco e sua posterior extração. O cuidado

realmente devia-se à água, que dificultava a extração e demandava maiores cuidados para não estragar a retirada da amostra.

Figura 21: Bloco Indeformado amostra, IND-03.

IND-03



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Coleta amostras Deformadas

Conforme a coleta de dados para o perfil era executada, foi possível, utilizando-se de uma escala granulométrica de campo e lupa de bolso, observar diferentes tamanhos granulométricos entre as camadas mais arenosas, diferenciando três distintas camadas de areia ao longo do talude. Nestes pontos foram coletadas amostras de maneira deformada, extraídas com o auxílio de uma pá, desagregando o material e o acondicionando em duas camadas de sacos plásticos grossos, a fim de manter a umidade de campo. Os sacos onde estavam as amostras foram devidamente identificados. Figura 22.

Figura 22: Amostras Deformadas nos sacos plásticos e Indeformadas nas caixas de madeira.



Fonte: Autoria própria

As amostras DEF-2 e DEF-3 são subsequentes uma abaixo da outra, porém, apresentam uma leve variação granulométrica e puderam ser coletadas e diferenciadas em duas camadas distintas, posteriormente a análise de laboratório iria mostrar se existia uma real diferença entre as mesmas.

A amostra DEF-02, representada na Figura 23, se encontra na porção superior do talude, logo abaixo à camada de argila marrom IND-02. Este ponto foi escolhido por apresentar uma camada de areia com granulometria estimada de forma visual em campo de cerca de 0,5 até 2mm, sendo considerada uma areia média grossa, com tamanho máximo de pequenos grãos de seixos na ordem de 10mm. Em relação ao arredondamento dos grãos, estes se apresentam como

angulosos a subangulosos. É possível perceber uma certa quantidade de finos neste solo na ordem de 10%.

Figura 23: Amostra deformada DEF-02.



DEF-02

Fonte: Autoria própria

A amostra DEF-03, representada na Figura 24, se encontra na porção superior do talude, logo abaixo à camada de areia DEF-02. Este ponto foi escolhido por apresentar uma camada de areia com granulometria estimada de forma visual em campo de cerca de 1 até 4mm, sendo considerada uma areia grossa, com tamanho máximo dos pequenos grãos de seixos na ordem de 12mm. Em relação ao arredondamento dos grãos, estes se apresentam como angulosos a subangulosos. É possível perceber uma certa quantidade de finos neste solo em uma ordem menor que 10%. Ocorre uma maior presença de grânulos na ordem de 4mm.

Figura 24: Amostra deformada DEF-03.



DEF-03

Fonte: Autoria própria

A amostra DEF-04, representada na Figura 25, se encontra na porção inferior do talude e está entre duas camadas de argila, acima uma camada de pequena espessura IND-01 e abaixo uma camada de maior espessura e considerada uma camada impermeável. Assim, a camada DEF-04, com granulometria estimada de forma visual em campo de cerca de 2 até 7mm, sendo considerada uma areia muito grossa com granulos, apresenta um tamanho máximo dos grãos seixos na ordem de 16mm. Em relação ao arredondamento dos grãos, eles se apresentam como angulosos a subangulosos. É possível perceber uma certa quantidade de finos neste solo na ordem menor que 10%. Maior presença de grânulos na ordem de 4 a 6 mm. Devido a granulometria mais grosseira, por esta camada permeia muita água, o que lava muitas partículas finas do solo que ajudariam a manter o atrito.

Figura 25: Amostra deformada DEF-04.

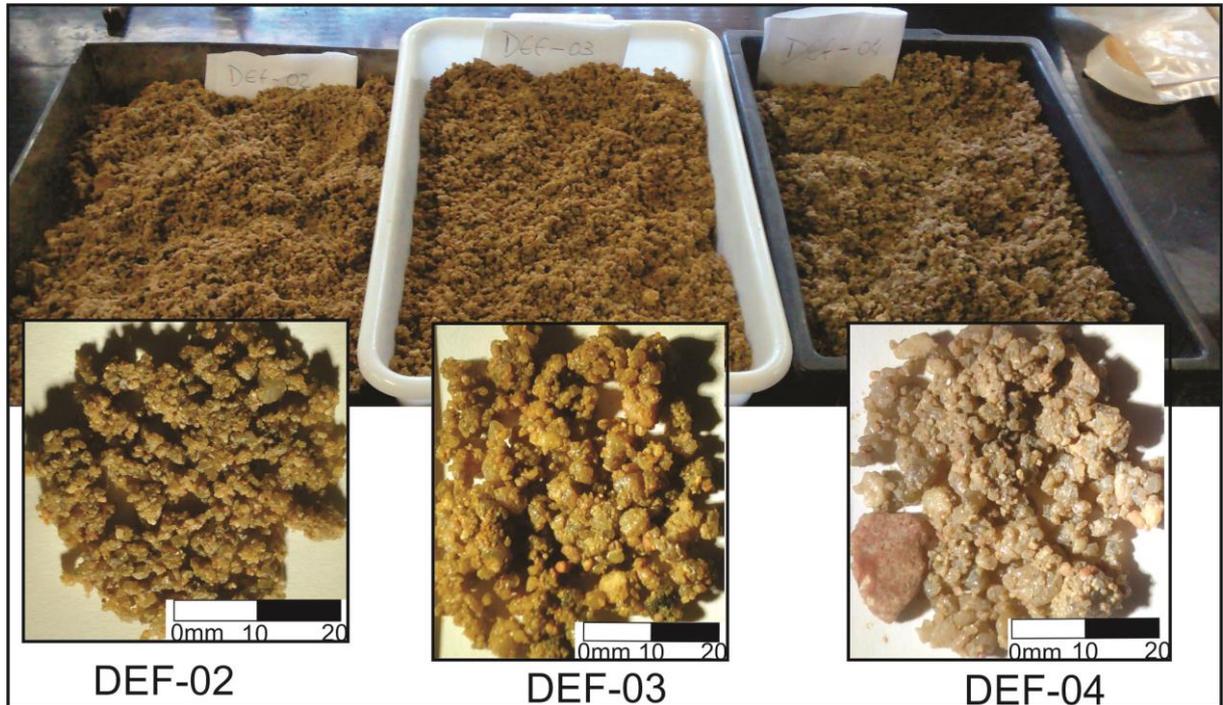


DEF-04

Fonte: Autoria própria

A Figura 26, mostra as areias no laboratório durante a preparação da secagem antes da realização dos ensaios.

Figura 26: Areias no laboratório durante a secagem, não lavadas.



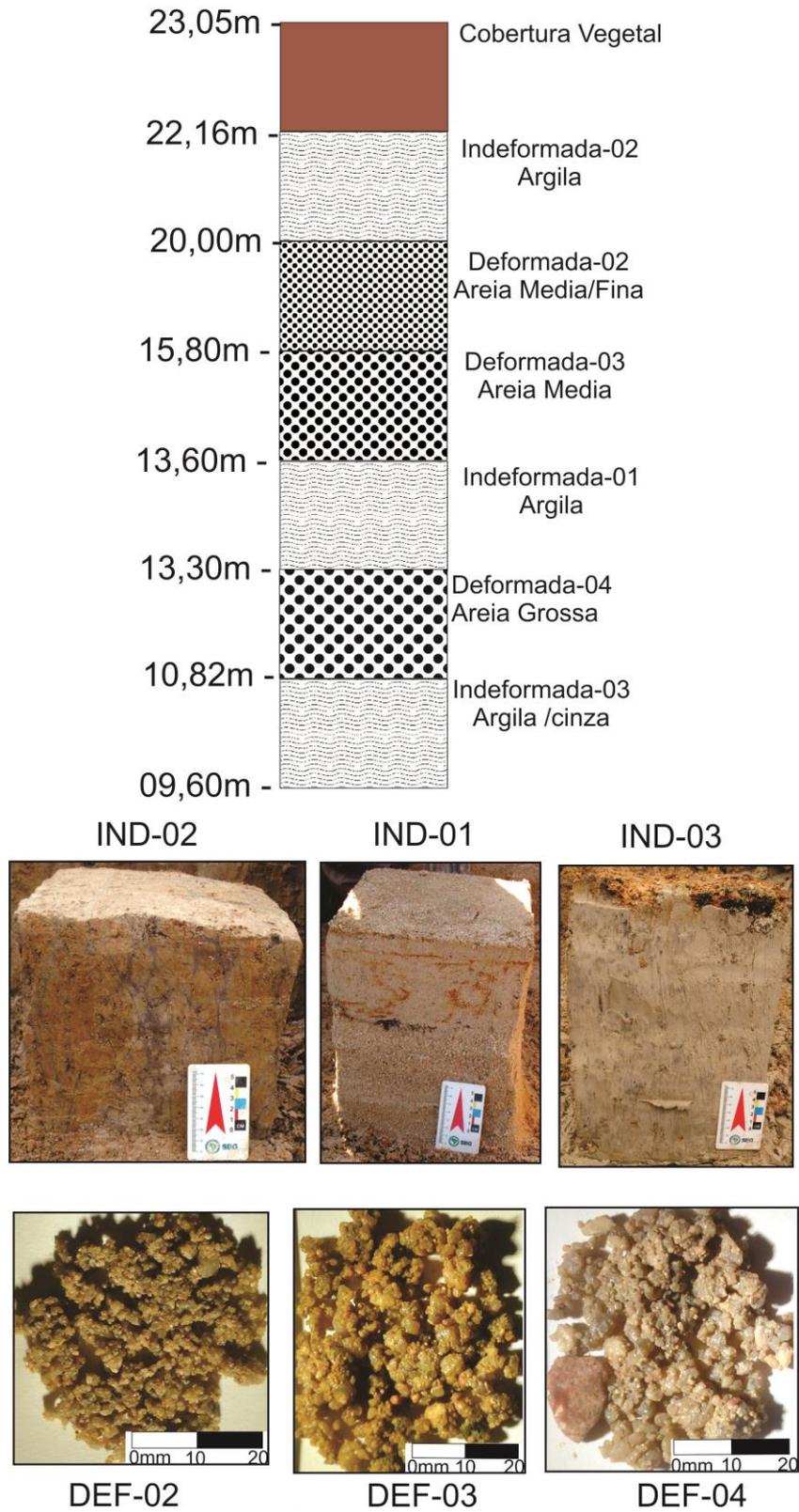
Fonte: Autoria própria

Este estudo, ao observar o talude, nota que a parte que compõe o aluvião deve ter uma maior atenção, visto isso foi criado um perfil em maior detalhe somente da região onde se encontra o aluvião, conforme é possível, nota na

Figura 27.

Figura 27: Talude somente do aluvião

Perfil Calombo S/ Escala: Representando as camadas



Fonte: Autoria própria

4.2 Etapa Laboratório

Durante a etapa de laboratório foi feita a preparação das amostras e ensaios das mesmas para obtenção das suas características físicas, resistência ao cisalhamento direto, limites de Atterberg e granulometria. Os dados obtidos em laboratório irão servir para que seja possível gerar o *input* correto dos dados, assim cada software pode gerar uma simulação mais precisa.

O cuidado para os cumprimentos das normas deve ser rígido, para que não haja erros nesta etapa, pois isto se acumularia ao longo do processo, resultando em uma simulação não fidedigna.

4.2.1 Caracterização Física

A caracterização geotécnica dos solos estudados consistiu na determinação dos índices físicos, da composição granulométrica e dos limites de Atterberg. Estas propriedades são fundamentais na análise de qualquer solo, por si só podem acabar indicando inúmeros aspectos do comportamento destes materiais.

Estes dados também são muito utilizados para a classificação dos solos, através dos diversos sistemas de classificação disponíveis. Assim, os solos são agrupados em função de características e aspectos de comportamento apresentados. Segundo Lambe e Whitman (1979), a correlação do comportamento de um solo com o de um grupo existente em um sistema de classificação é uma prática usual, de cunho empírico, mas desenvolvida através de considerável experiência.

Entretanto, devido ao fato de que muitos destes dados são obtidos por meio de ensaios executados em amostras deformadas, eles podem não fornecer um bom indicativo do comportamento *in situ*, indeformado, destes materiais (LAMBE e WHITMAN, 1979).

Ao longo do tempo foram desenvolvidas correlações entre índices físicos e outros parâmetros de comportamento dos solos, que se apresentam úteis à prática de engenharia, ao permitirem uma análise qualitativa dos materiais, mas que devem ser adotadas com muita prudência. Lambe e Whitman (1979) alertam para o fato de que correlações empíricas entre índices e o comportamento real dos solos apresentam grandes variações.

4.2.2 Índices físicos

Os índices físicos de um solo são relações entre peso e volume de suas fases (sólida, líquida e gasosa). Os diversos índices podem ser determinados a partir do peso de uma amostra de solo de volume conhecido, teor de umidade do material e peso específico real das partículas (γ_s).

A determinação do teor de umidade natural do solo foi realizada através da secagem do material em estufa, conforme estabelecido na norma ABNT NBR 6457/1986.

O peso específico real das partículas (γ_s) foi determinado através do procedimento descrito na norma ABNT NBR 6508/1984, em amostras preparadas de acordo com a norma ABNT NBR 6457/1986.

Foram realizados ensaios para obtenção dos índices físicos de todos os 6 materiais coletados, areias e argilas.

A Figura 28 mostra o agitador utilizado para a mistura total e lavagem dos grãos, os materiais arenosos ficavam no agitador em torno de 20 a 30 min.

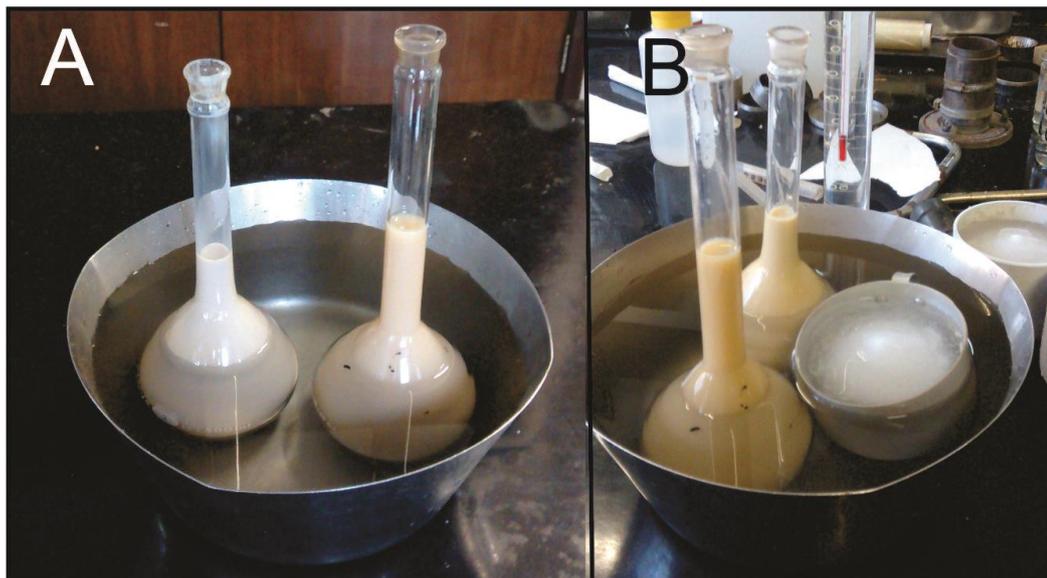
Figura 28: Agitador das partículas



Fonte: Autoria própria

A Figura 29 mostra a realização do ensaio de peso específico. Na parte A os picnômetros recém tirados do banho maria imersos em água para perda de temperatura. Na parte B o ensaio já em andamento para continuar a baixar a temperatura das amostras, durante o ensaio se utilizou gelo, assim a temperatura das amostras que se encontravam por volta de 40°C, poderão chegar até cerca de 13°C. Dessa forma, o ensaio pode ser finalizado conforme manda a norma.

Figura 29: Ensaio de peso específico; A) Amostras em torno de 40°C de temperatura; B) Amostras com temperatura em torno de 15°C, rebaixamento da temperatura através de gelo.



Fonte: Autoria própria

4.2.2.1 Granulometria

O conhecimento da composição granulométrica de um solo permite inferir uma série de aspectos acerca de seu comportamento, frente à condutividade hidráulica ou solicitações mecânicas. Assim, estas informações são fundamentais no estudo do comportamento geotécnico dos solos.

O processo de determinação da composição granulométrica apresenta algumas limitações práticas e teóricas, sendo que a acurácia das curvas granulométricas é mais questionável para solos finos do que para solos granulares (LAMBE e WHITMAN, 1979).

Segundo Murthy (2003), solos finos são muito afetados pela estrutura, forma das partículas, origem geológica e outros fatores, de forma que o conhecimento de sua composição granulométrica, isoladamente, diz muito pouco sobre suas propriedades físicas.

A determinação da composição granulométrica do solo estudado foi feita conforme a norma ABNT NBR 7181/1984. A porção do solo com diâmetro mínimo superior a 0,075 mm foi analisada por meio de peneiramento, enquanto que a parcela com diâmetro mínimo equivalente inferior a 0,075 mm foi ensaiada pelo processo de sedimentação. As amostras foram preparadas conforme a norma ABNT NBR 6457/1986.

A Figura 30 demonstra o ensaio sendo realizado e os materiais utilizados para medição. Os ensaios foram sempre realizados em pares, tendo uma diferença de 8 minutos entre cada início de procedimento, para assim não haver problemas para retirada das medidas. Tomou-se

especial cuidado ao retirar as medidas iniciais de 30 segundos e 1 minuto, pois pode ocorrer a presença de espuma, devido a agitação das partículas. Quando isto ocorre, pode influenciar na medida obtida no densímetro. Posteriormente, com a obtenção das curvas granulométricas, se observou que as medidas foram tomadas de forma correta e apresentaram boa correlação.

Empregou-se solução defloculante, do tipo hexametáfosfato de sódio, conforme recomenda a norma brasileira.

Figura 30: Ensaio das DEF-02 e DEF-03, o material para o ensaio era composto de provetas, cronômetros, densímetro, termômetro e material para anotações.



Fonte: Autoria própria

Após esta etapa procedeu-se a lavagem do solo com leve pressão de água, sem manuseio do solo pelo operador. Rigo (2005) apresenta resultados de análises granulométricas realizadas com e sem a ação da mão do operador no processo de lavagem do solo, constatando a influência deste procedimento nos resultados.

Assim como a formação de espuma influencia as medias do densímetro, o manuseio do solo pelo operador promove quebra de estruturas e partículas, podendo também gerar descontinuidades nas curvas granulométricas.

4.2.3 Limites de Atterberg

O estudo do comportamento de solos finos torna necessária a determinação de seus limites de consistência. Um solo pode existir em quatro estados físicos: sólido, semi-sólido, plástico e líquido, dependendo do seu teor de umidade.

O aumento na quantidade de água no solo provoca a redução da interação entre as partículas, aproximando-o do estado líquido. Os limites de consistência são definidos como o teor de umidade no qual há mudança de estado físico do solo.

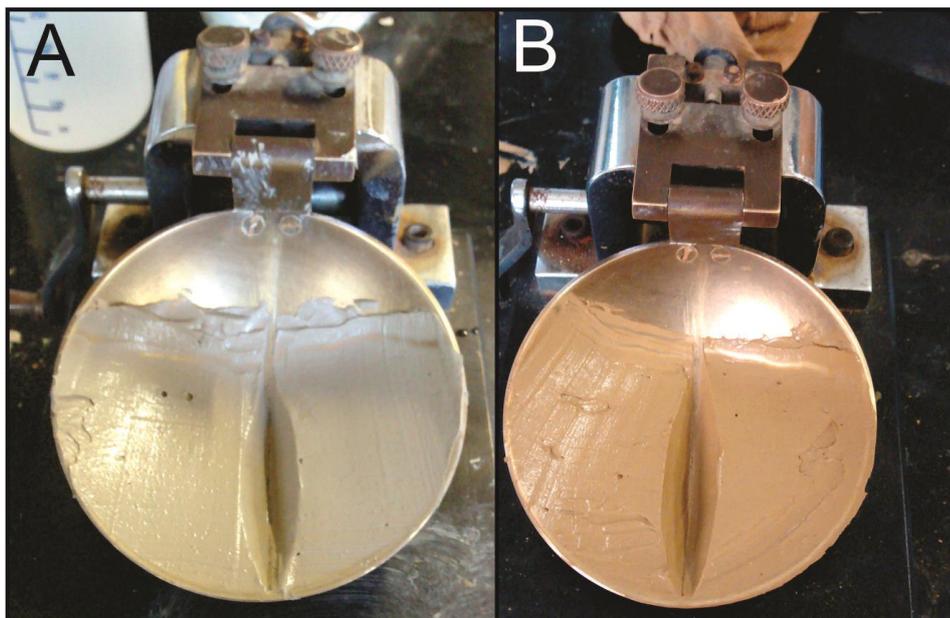
Os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) são conhecidos como limites de Atterberg, e a diferença entre eles é denominada índice de plasticidade ($IP = LL - LP$).

É procedimento comum a tentativa de correlacionar o limite de liquidez e o índice de plasticidade com outros parâmetros de comportamento dos solos, como compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

Neste trabalho, os limites de Atterberg foram determinados conforme procedimentos descritos nas normas ABNT NBR 6459/1984 e ABNT NBR 7180/1984. O solo passou pelo processo de secagem ao ar, conforme procedimento de preparo descrito na norma ABNT NBR 6457/1986.

Foram realizados um total de 6 ensaios com os materiais arenosos e argilosos. Foi possível obter dados de LL de todos materiais ensaiados, até mesmo nas areias os ensaios puderam ser executados. As areias se mostraram mais sensíveis à adição de água na mistura, assim, o procedimento era feito com cuidado para que fosse possível atingir o número de golpes necessários e posterior obtenção dos índices. Os materiais argilosos também foram ensaiados, e a argila cinza IND-03 se mostrou com grande capacidade de absorção de água, esta característica será explorada com os resultados dos ensaios no Capítulo - 05. A Figura 31 mostra os materiais durante o ensaio.

Figura 31: A) Amostra IND-03; B) Amostra IND-02.



Fonte: Autoria própria

O limite de plasticidade foi obtido de todos os materiais, menos da amostra DEF-03. Nesta amostra não foi possível executar o ensaio de LP.

4.2.4 Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é a técnica mais utilizada na determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos por ser um ensaio rápido, relativamente simples e de baixo custo. O equipamento e os procedimentos utilizados nos ensaios são descritos com minúcia por Head (1982).

A utilização do ensaio de cisalhamento direto permite a obtenção de resultados, em geral, bastante confiáveis em termos de resistência drenada nas condições de pico e última.

No entanto, o ensaio apresenta algumas limitações, como a impossibilidade de controle das condições de drenagem. As poropressões não podem ser medidas, é necessário que o ensaio seja executado de forma a mantê-las nulas. O plano de cisalhamento não é uniforme e a ruptura ocorre progressivamente das extremidades para o centro do corpo de prova. Além disso, a área sob a qual atuam as tensões normal e cisalhante não permanece constante durante o ensaio.

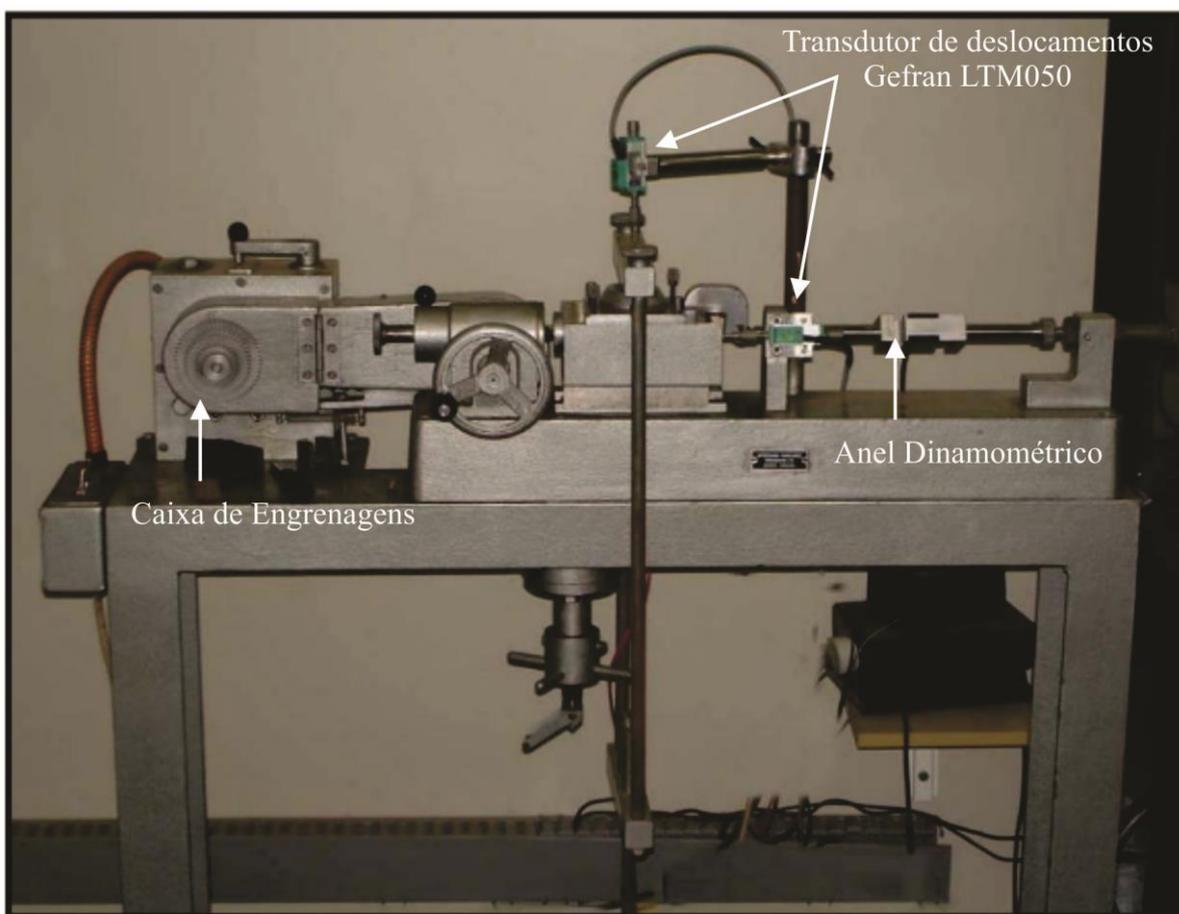
Os ensaios de cisalhamento direto deste trabalho foram executados com os seguintes objetivos:

- A determinação da envoltória de ruptura do solo em condição indeformada;
- Determinar a resistência obtida para diferentes pressões: 50, 100 e 150kpa.

4.2.4.1 Equipamento utilizado

Os ensaios de cisalhamento direto desta dissertação foram executados em uma prensa convencional, do tipo deformação controlada, produzida pela empresa Wykeham Farrance Int. Este mesmo equipamento pertencente ao Laboratório de Geotecnia da UFRGS, e foi utilizado nos trabalhos de Silveira (2008) e Rigo (2005). A Figura 32 apresenta o equipamento descrito.

Figura 32: Máquina de cisalhamento direto



Fonte: Autoria própria

Este equipamento ensaia amostras de 20 mm de altura e 60 mm de diâmetro, às quais é aplicada a tensão normal requerida por meio de um pendural e um braço de alavanca. As medidas de deformação axial, deslocamento e carga aplicada são obtidas por meio de um sistema automatizado, composto por uma célula de carga Kratos MM (capacidade 2kN), devidamente calibrada, e um transdutor de deslocamentos Gefran LTM050, para medidas de deformação vertical e de deslocamento horizontal. A aquisição de dados foi feita por um microcomputador. A automatização das leituras é bastante útil já que possibilita a execução de ensaios de longa duração e elimina os erros de leituras manuais.

4.2.4.2 Preparação das amostras e execução dos ensaios

A partir dos blocos indeformados coletados foi feita a retirada das amostras para o ensaio de cisalhamento direto, usando anéis metálicos com cerca de 6,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura. Cravou-se os mesmos nos blocos paralelamente à direção da ruptura. O procedimento para a coleta destas amostras consistiu no corte do solo no entorno do anel, com auxílio de espátulas e facas, até que a massa de solo assumisse diâmetro semelhante ao do anel, que era então levemente pressionado, confinando lateralmente a amostra de solo, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Anéis de amostras



Fonte: Autoria própria

Nas faces superior e inferior da amostra manteve-se uma sobra de solos de aproximadamente 3,0 cm de espessura. Uma vez retirada do bloco, a amostra era envolvida em um filme de PVC, seguido por um saco plástico utilizado para preservar a umidade e demais características.

4.2.4.3 Fases dos ensaios

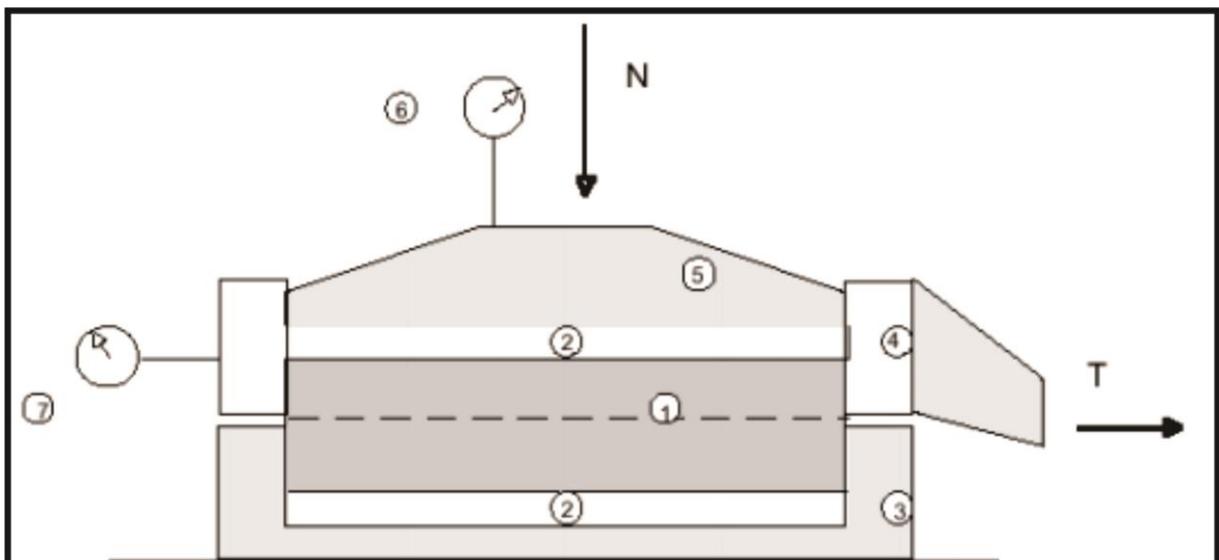
Foram realizados 9 ensaios de cisalhamento direto nesta dissertação. Estes ensaios foram feitos em 3 diferentes materiais.

A primeira fase do ensaio consiste em aplicar uma tensão normal. Os corpos de prova indeformados foram ensaiados com tensões normais da ordem de 50, 100 e 150 kPa.

A segunda fase do ensaio consiste em impor, na parte inferior da caixa, uma velocidade constante de deslocamento, provocando o aparecimento de uma força tangencial na parte superior, mantida imóvel durante o ensaio. Rolamentos lineares atuando abaixo da caixa eliminam o atrito. A força lateral é medida através de célula de carga (elétrica ou mecânica). Os deslocamentos verticais e horizontais são medidos durante o ensaio através de extensômetros/transdutores.

A velocidade de ensaio deve garantir uma condição drenada de carregamento. A velocidade depende do coeficiente de adensamento (CV), que reflete as características do solo: permeabilidade e compressibilidade. No caso deste trabalho, as amostras de argila siltosa e argila marrom, IND-01 e IND-02, foram executadas com velocidades na ordem de 0,00096m/s. Porém, quando a argila cinza IND-03 foi ensaiada, visto que é um material mais plástico, com maior retenção de água, se optou por baixar a velocidade do ensaio para 0,00064m/s para melhor equalização nas poropressões. A Figura 34 mostra um esquema detalhado da caixa onde a amostra fica durante o ensaio.

Figura 34 - 1) Corpo de prova; 2) Pedra porosa; 3) Parte fixa da caixa cisalhante; 4) Parte móvel da caixa de cisalhamento; 5) Cabeçote metálico; 6) Extensômetro para medida da variação de altura do corpo de prova; 7) Extensômetro para medida do deslocamento horizontal da parte móvel da caixa de cisalhamento.



Os ensaios foram conduzidos conforme procedimentos constantes na norma ASTM D3080 e recomendações de Head (1982).

4.3 Etapa Computacional

4.3.1 Apresentação do Programa RS2

O RS2 é um programa 2D dedicado ao cálculo de tensões e deformações no subsolo, através de elementos finitos. O cálculo pode ser realizado considerando o estado plano de deformação ou o estado assimétrico, permitindo também a construção em fases e a introdução de vários elementos de suporte nas simulações de cálculo.

No processo de definição da geometria, o utilizador desenha as linhas ou introduz coordenadas dos pontos que definem o problema. O programa gera automaticamente a malha e esta pode ser refinada em função do tipo de análise desejada. Os elementos podem assumir configuração quadrangular e triangular, embora com um número máximo de 8 nós. Nos exemplos em estudo neste trabalho serão utilizados elementos triangulares de 3 nós.

O programa está dividido em três módulos ou rotinas diferentes: *Model*, *Compute* e *Interpret*.

A rotina *Model* é o módulo que permite a introdução dos dados, nomeação, geometria, condições de fronteiras, condições iniciais, definição dos materiais e geração da malha, entre outros.

A rotina *Compute* faz o cálculo pedido em função dos dados introduzidos no *Model* e só se inicia se uma malha de elementos finitos tiver sido gerada. Após o processamento, são gerados arquivos, que contêm a informação resultante do cálculo.

A rotina *Interpret* é o módulo que permite a visualização e interpretação dos resultados obtidos com rotina *Compute*, desde gráficos de colorações relativas a tensões e deformações.

4.3.2 Análise de Estabilidade: *Shear Strength Reduction*

As análises implementadas neste trabalho utilizam o critério de cedência de Mohr-Coulomb e consideram o campo de tensões gravítico (são geradas as tensões iniciais antes do cálculo propriamente dito). Nos problemas em que existe nível freático, o programa entra em consideração com as pressões neutras geradas.

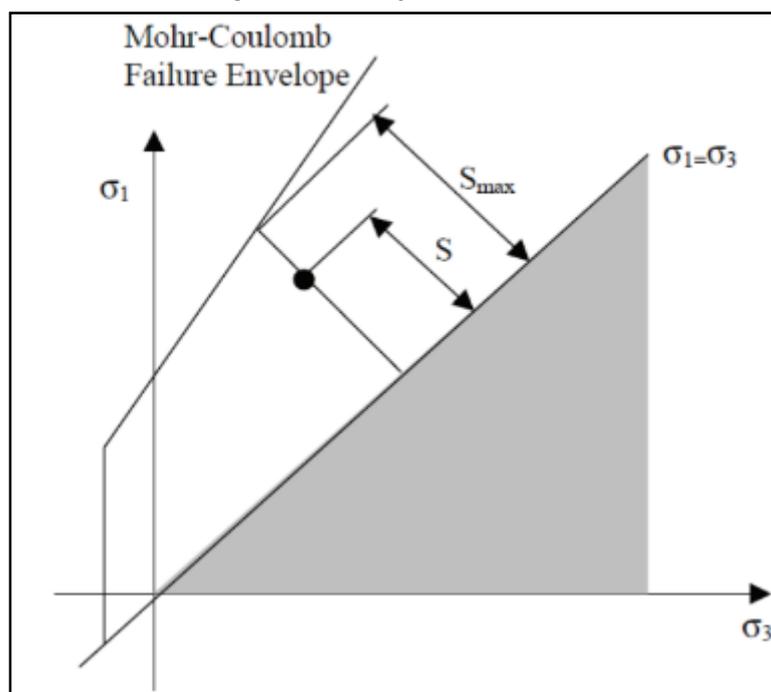
O programa reduz gradualmente os parâmetros resistentes $\tan\phi'$ e c' do solo em sucessivas análises até que se verifique a falta de convergência do processo de cálculo, que assinalará a ocorrência da ruptura. O cálculo do fator de segurança faz-se através da expressão:

$$FS = \frac{S_{max}}{S}$$

Onde, S_{max} e S são a resistência máxima ao corte e a resistência mobilizada, respectivamente.

Figura 35 ajuda a perceber o conceito que está na base do cálculo de FS, que é, na verdade, o subjacente aos métodos de equilíbrio limite anteriormente apresentados. À medida que a resistência do maciço diminui, o deslocamento ou a deformação aumentam. A certa altura, as deformações em alguns pontos serão tão elevadas que o algoritmo de elementos finitos deixa de convergir, indicando que o talude rompeu e o fator de segurança encontrado será então o fator de segurança do talude.

Figura 35: Definição de S_{max} e S



Fonte: Silva, 2011

4.3.3 Apresentação do Programa Slide

O Slide é um programa computacional comercial, utilizado no cálculo de estabilidade de taludes por Equilíbrio Limite em 2D.

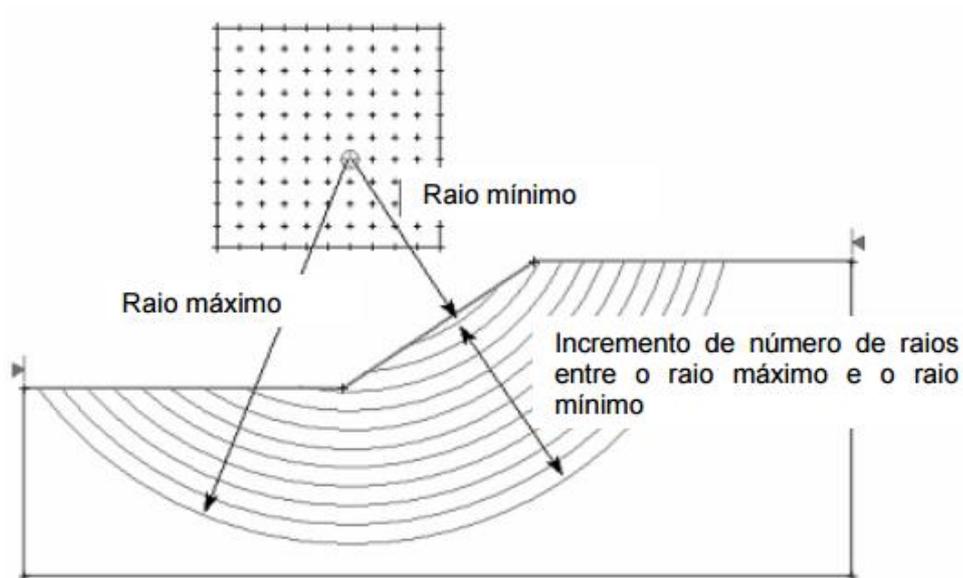
Além das análises determinísticas, onde utiliza diversos métodos de cálculo, o programa realiza também análises probabilísticas e de sensibilidade.

O programa opera em ambiente Windows, com interface simples e facilidades para construção de modelos geomecânicos, com possibilidade de importação de desenhos de programas como o AutoCad. A análise determinística, seja drenada ou não drenada, é feita por pesquisas em superfície circular ou não circular. A pesquisa do círculo crítico é feita plotando-se diversos círculos, em quantidade definidas por uma malha formada por diversos pontos que representam os centros dos círculos, Figura 36.

De cada ponto podem ser construídos círculos, os quais não podem encostar o contorno externo direito, esquerdo ou de fundo do modelo. Esses contornos limitam o raio máximo dos círculos. A variação do raio em cada ponto é limitada pelo raio máximo e pelo raio mínimo.

O usuário pode estabelecer a quantidade de incrementos no raio dentro da faixa de máximo e mínimo, o que vai definir a quantidade de círculos pesquisados.

Figura 36: Raio Mínimo e máximo na pesquisa da superfície crítica.



Fonte: Ribeiro, 2011

Há ainda a opção de busca automática do círculo de ruptura, útil quando não se conhece a região possível de escorregamento. O programa trabalha com diversos critérios de resistência, alguns com aplicação em rocha e outros em solos.

Há a possibilidade de variar a coesão com a profundidade. É possível a inclusão de cargas externas no cálculo, assim como a inclusão de elementos como geotêxtis, grampos e tirantes.

A análise probabilística, realizada pelo programa, é baseada na técnica Monte Carlo ou em técnicas de Hipercubo Latino. Qualquer parâmetro de entrada pode ser definido como aleatório (propriedades do solo, nível de lençol d'água, cargas, etc.). O programa incorpora as distribuições normal, uniforme, beta, exponencial, log normal e gama.

O cálculo de propressão é feito estabelecendo-se o nível d'água ou o nível piezométrico, ou fornecendo fator R_u , ou ainda introduzindo dados de propressão em pontos específicos.

CAPÍTULO 5

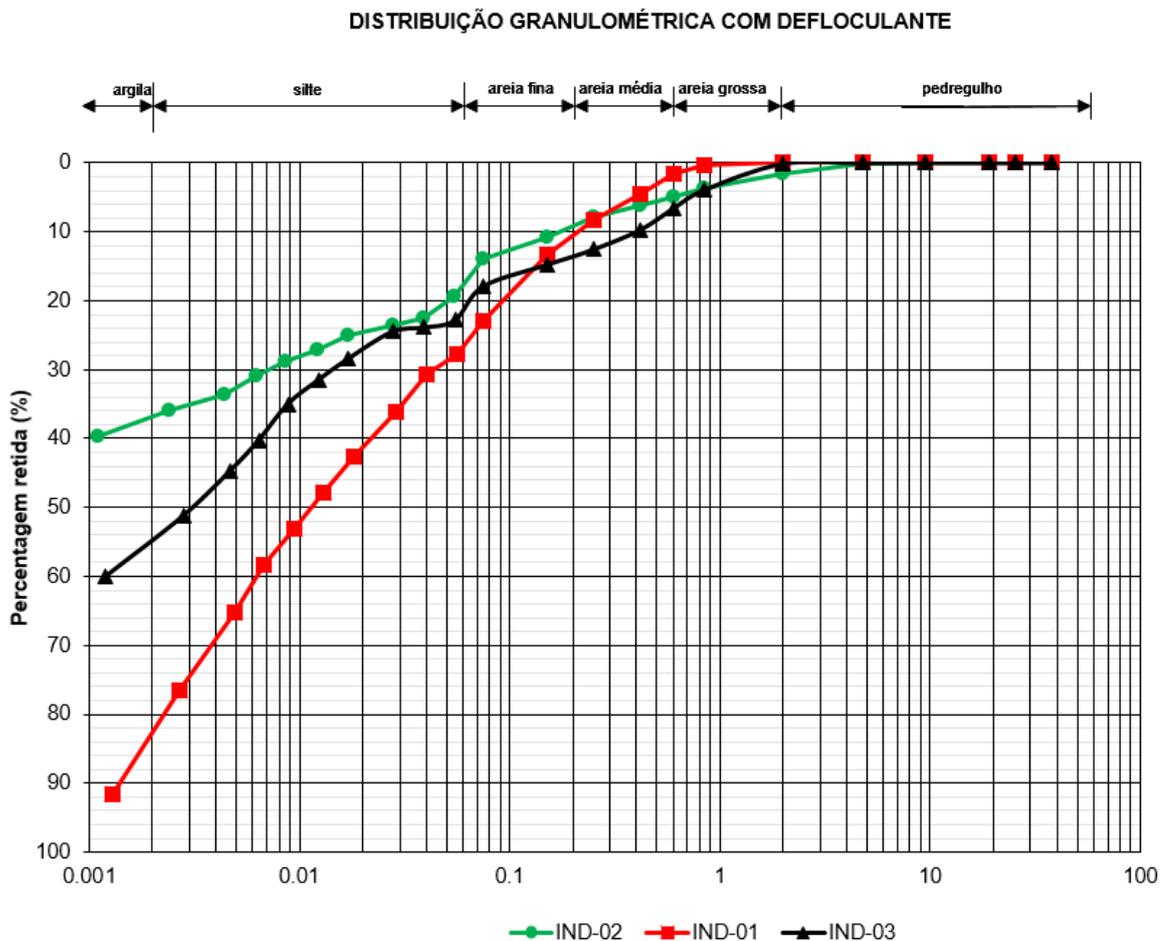
5 RESULTADOS

5.1 Ensaios de laboratório

5.1.1 Caracterização física

A distribuição granulométrica do solo foi determinada com o uso de solução defloculante. A Figura 37 apresenta as curvas granulométricas obtidas, a Tabela 3 apresenta um resumo das porcentagens passantes de cada fração, segundo a proposta na norma ABNT NBR 6502 (1995).

Figura 37: Distribuição granulométrica das Argilas.



Fonte: Autoria própria

Tabela 3: Porcentagem passante dos ensaios das argilas

	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
IND-01	15	60	16	11	2	0
IND-02	64	20	7	4	3	2
IND-03	45	34	7	7	7	0

Na Figura 38 e na Tabela 4 é possível observar as curvas granulométricas das areias e as porcentagens passantes de cada fração.

Figura 38: Distribuição granulométrica das Areias

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COM DEFLOCULANTE

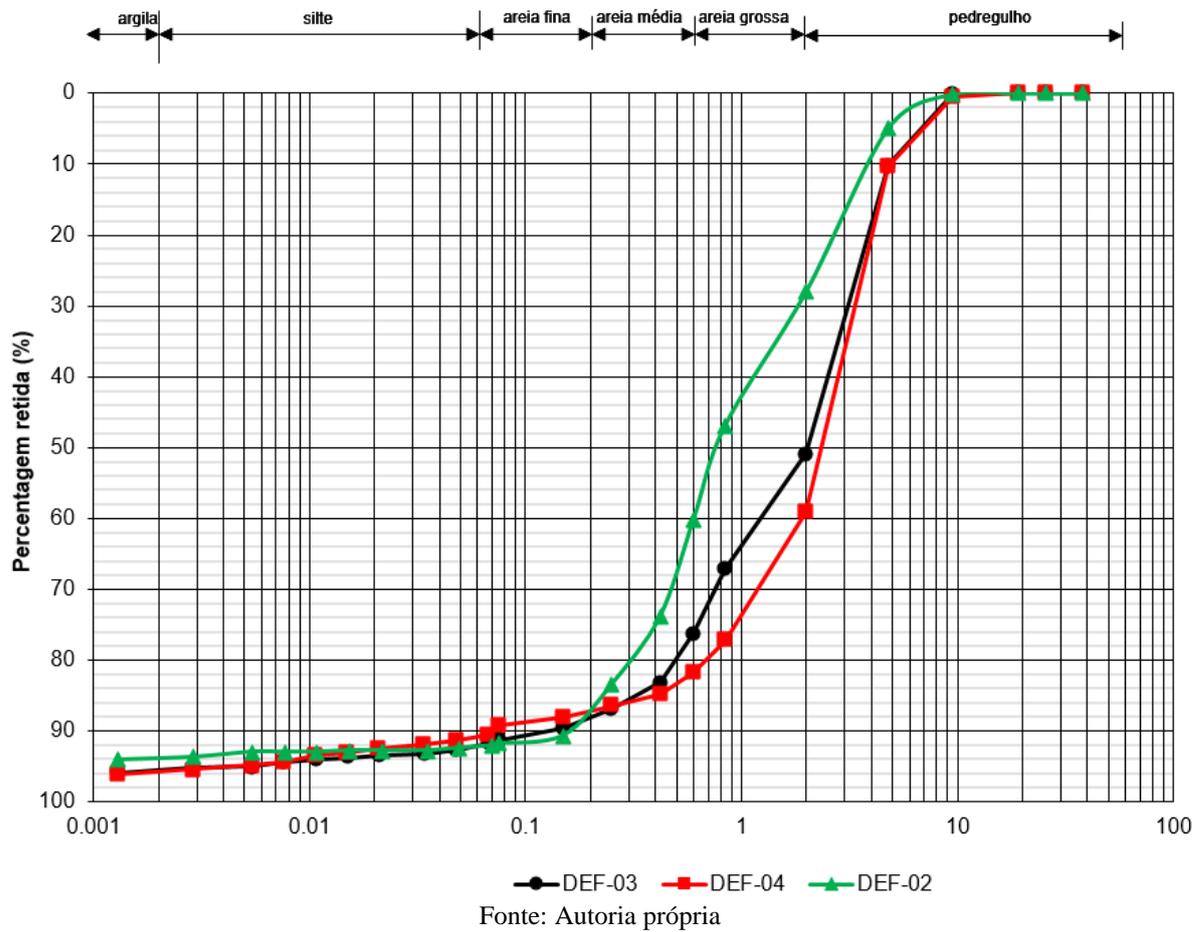


Tabela 4 - Porcentagem passante dos ensaios das Areias

	Argila	Site	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
DEF-02	6	2	4	28	32	28
DEF-03	4	4	4	12	26	50
DEF-04	4	5	4	5	23	59

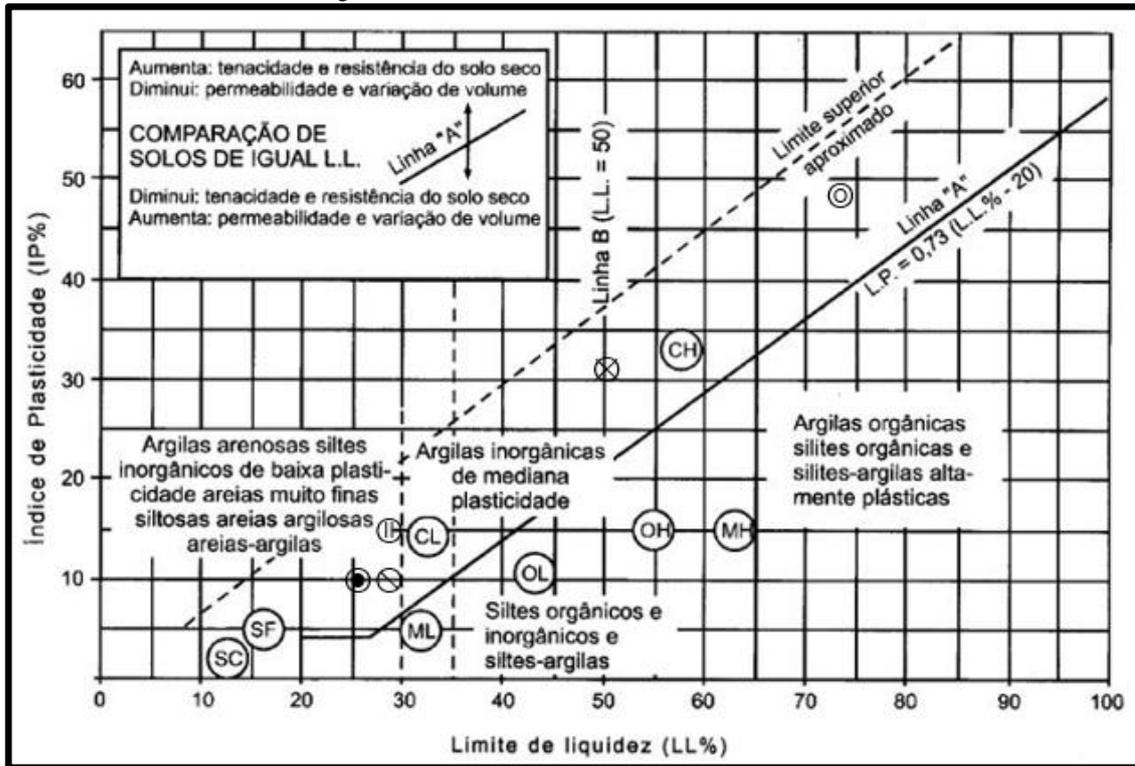
Ainda buscando apresentar mais características físicas dos solos em estudo, foram realizados os ensaios para verificar os limites de Atterberg. Os parâmetros obtidos para LP, LL e consequentemente IP podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Índice LP, LL e IP das amostras

		LP(%)	LL(%)	IP(%)
●	IND-01	15	25,8	10,7
◎	IND-02	25,7	72,9	47,1
⊗	IND-03	22,5	52,4	29,9
	DEF-02	NP	26,8	-
⊖	DEF-03	19,1	28,3	9,1
Ⓜ	DEF-04	14	30,3	16,3

De posse destes valores foi possível plotar na carta de plasticidade para se obter mais características de comportamento destes solos, como é possível identificar na Figura 39.

Figura 39: Carta de Plasticidade de Casa Grande



Fonte: VARGAS, 1978

Através das curvas granulométricas e tabelas que mostram de uma forma quantificada a representação das curvas, foi possível classificar cada uma de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM D2487-2000) Figura 40, como observamos na Tabela 6.

Figura 40: Sistema Unificado de Classificação de Solos

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests ^A			Group Symbol
	More than 12 % fines ^E	Fines classify as CL or CH	CL or CH
Sands	Clean Sands	$Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^C$	SW
50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Less than 5 % fines ^F	$Cu < 6$ and/or $1 > Cc > 3^C$	SP
	Sands with Fines	Fines classify as ML or MH	SM
	More than 12 % fines ^F	Fines classify as CL or CH	SC
FINE-GRAINED SOILS	Silts and Clays	inorganic	CL
50 % or more passes the No. 200 sieve	Liquid limit less than 50	$PI > 7$ and plots on or above "A" line ^F	CL
		$PI < 4$ or plots below "A" line ^F	ML
		organic	OL
		Liquid limit - oven dried ^G < 0.75	OL
		Liquid limit - not dried	OL
	Silts and Clays	inorganic	CH
		PI plots on or above "A" line	CH
	Liquid limit 50 or more	organic	MH
		PI plots below "A" line	MH
		Liquid limit - oven dried ^G < 0.75	OH
		Liquid limit - not dried	OH
HIGHLY ORGANIC SOILS	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor		PT

Fonte: ASTM

Tabela 6: Classificação final de cada solo

	Símbolo do grupo
IND-01	CL
IND-02	CH
IND-03	CH
DEF-02	SP
DEF-03	SW
DEF-04	SW

O peso específico também foi obtido e pode ser observado na Tabela 7. Os valores de peso específico são de suma importância para o correto *input* de informações dos softwares posteriormente utilizados.

Tabela 7: Peso específico das amostras

	Média gs(KN/m³)
IND-01	17.7
IND-02	15
IND-03	14.5
DEF-02	20
DEF-03	20
DEF-04	20

5.1.2 Resistência ao cisalhamento

5.1.2.1 Cisalhamento Direto

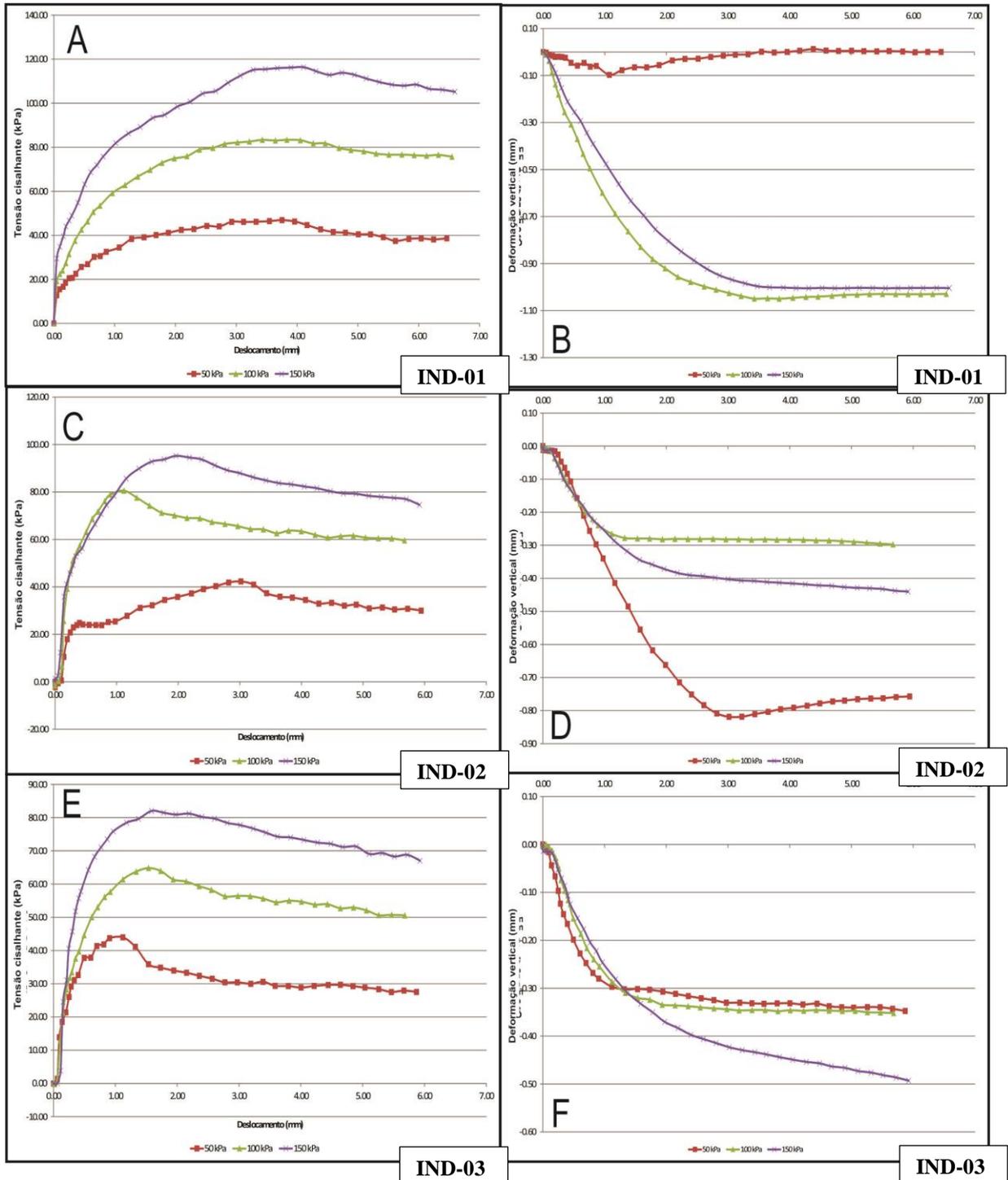
Os ensaios de cisalhamento direto realizados nessa dissertação tiveram como objetivo:

- (i) determinar a resistência ao cisalhamento do solo em condição indeformada;
- (ii) utilizar estes parâmetros de resistência para definir os intervalos de tensão e deformação;

Foram executados ensaios em amostras indeformadas, ~~Foram~~ sendo ensaiados um total de 9 corpos de prova de 3 materiais diferentes, com tensões normais de 50, 100 e 150 kPa, seguindo os procedimentos descritos no capítulo anterior.

Para as amostras indeformadas foram realizados os ensaios de cisalhamento, a fim de se obter os parâmetros de resistência destes materiais. As curvas tensão cisalhante (τ) versus deformação horizontal e deformação horizontal versus deformação vertical obtidas para o solo em estado indeformado são apresentadas na Figura 41.

Figura 41: Curvas tensão cisalhante (τ) versus deformação horizontal (A) IND-01; C) IND-02; E) IND-03), e deformação horizontal versus deformação vertical (B) IND-01; D) IND-02; F) IND-03)



Fonte: Autoria própria

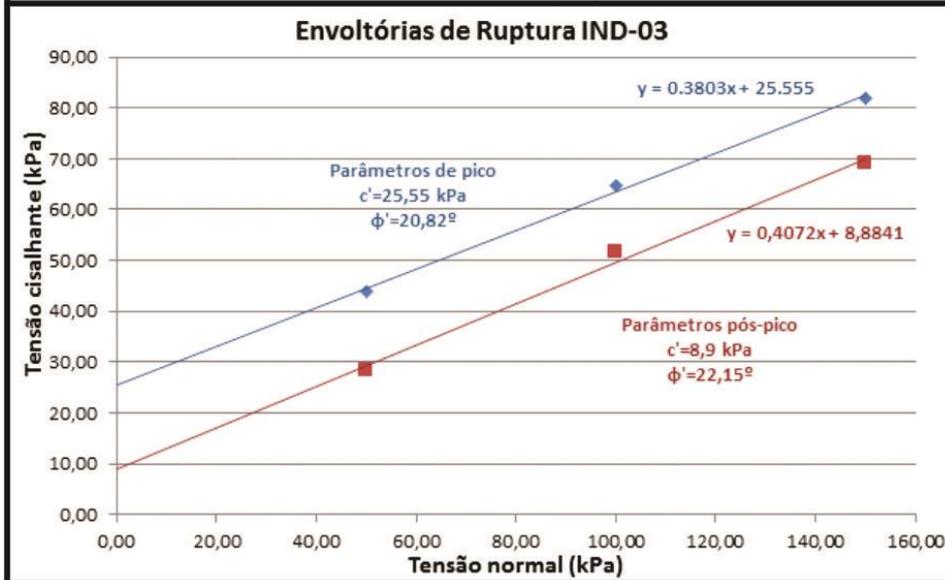
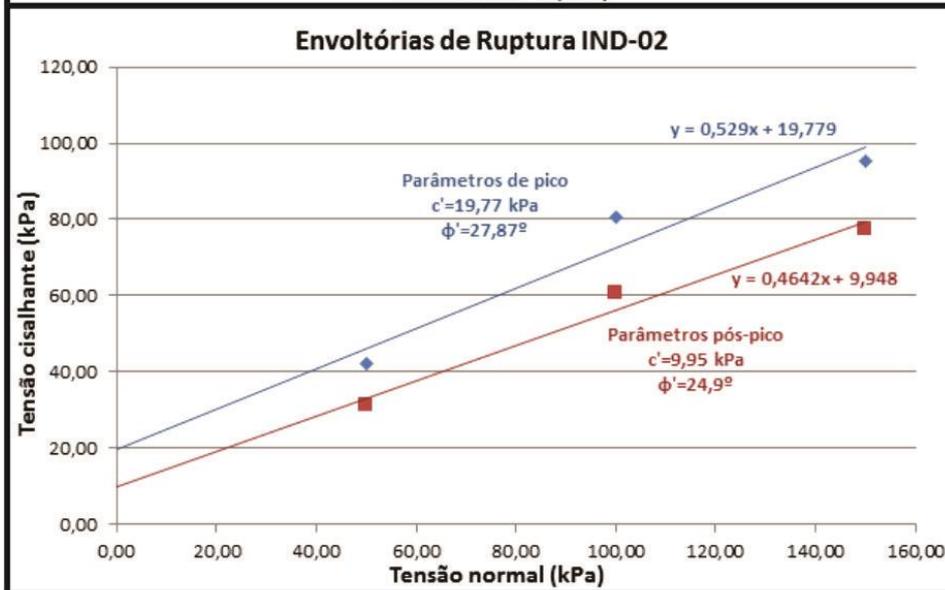
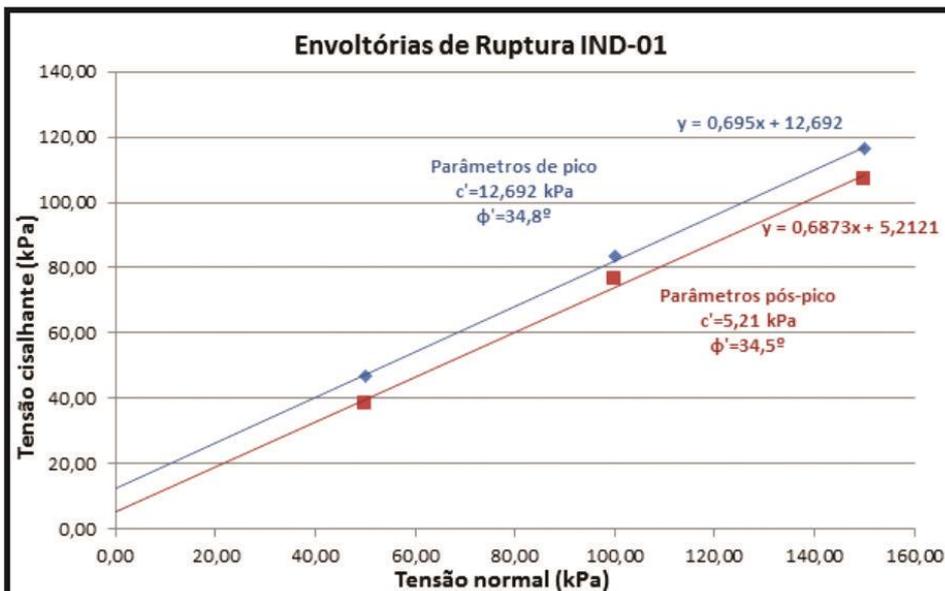
Com base na Figura 41, verifica-se que os corpos de prova ensaiados apresentaram a ocorrência de picos de resistência mais visíveis em maiores tensões normal. Pode-se observar ainda que os corpos de prova apresentam um comportamento muito pouco diferente um do outro, todos apresentam uma curva que condiz com um tipo de ruptura frágil, apesar de a curva ter um pouco de interferência devido a uma certa capacidade plástica que os materiais apresentavam. Mas essas características não são suficientes para que a ruptura se comporte e seja considerada plástica.

As deformações verticais ocorreram de forma compressiva, e de magnitude de ordem variável para cada material, chegando de 0,35mm até 1mm.

A Figura 42 mostra as envoltórias de ruptura e a

Tabela 8 apresenta os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

Figura 42: Envoltórias de Ruptura IND-01, IND-02, IND-03



Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Reúne a informação dos ensaios realizados, mostrando o ângulo de atrito e coesão.

	Pico c' Kpa	Pico Φ	Residual c' Kpa	Residual Φ
IND-01	12.69	34.80	5.21	34.50
IND-02	19.77	27.87	9.95	24.90
IND-03	25.55	20.82	8.90	22.15

Em relação aos parâmetros obtidos para os solos indeformados, podem se destacar alguns aspectos. Inicialmente nota-se que os valores de ângulo de atrito e coesão de pico encontram seus valores nas amostras IND-01 com um $\Phi=34.8^\circ$ e amostra IND-03 com $c'=25.55\text{Kpa}$. Outro ponto importante diz respeito à queda dos parâmetros de resistência em caráter residual da coesão que reduz à metade do de pico, provocando uma brusca redução da resistência, o que no problema da estabilidade de talude traz grandes consequências. Isto é, caso a estabilidade da encosta seja mantida por parâmetros de resistência de pico, e venham a ocorrer deslocamentos, mesmo que de magnitude relativamente pequena, a resistência ao cisalhamento pode ser muito reduzida, podendo levar à instabilização do maciço. Em relação ao ângulo de atrito, este não sofre uma mudança tão brusca entre pico e residual.

A Figura 43 apresenta o aspecto polido assumido pelo solo na superfície de ruptura gerada nos corpos de prova do ensaio de cisalhamento direto da amostra IND-02, testado sem reversão. Observa-se que um único estágio de cisalhamento é capaz de provocar uma forte orientação das partículas, de forma a tornar a superfície de ruptura bastante regular.

Figura 43: Amostras IND-02 pós ensaios 50, 100 e 150kpa.



Fonte: Autoria própria

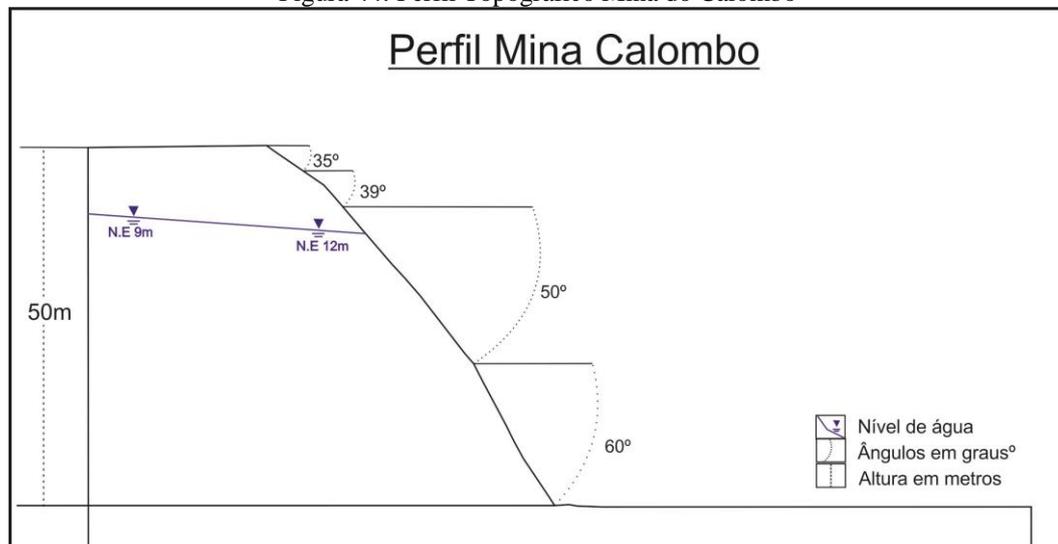
5.2 Análises de estabilidade

5.2.1 Geometria e características dos materiais

O presente trabalho busca fazer uma retroanálise da estabilidade da seção da mina do Calombo, empregando dois métodos de análise por meio de simulação em software, Elementos Finitos e o Equilíbrio Limite, utilizando os programas RS2 e SlideV5.

O perfil a ser analisado é mostrado na Figura 44. Assim é possível observar os principais dados geométricos do perfil, como sua altura, ângulos e nível freático encontrado.

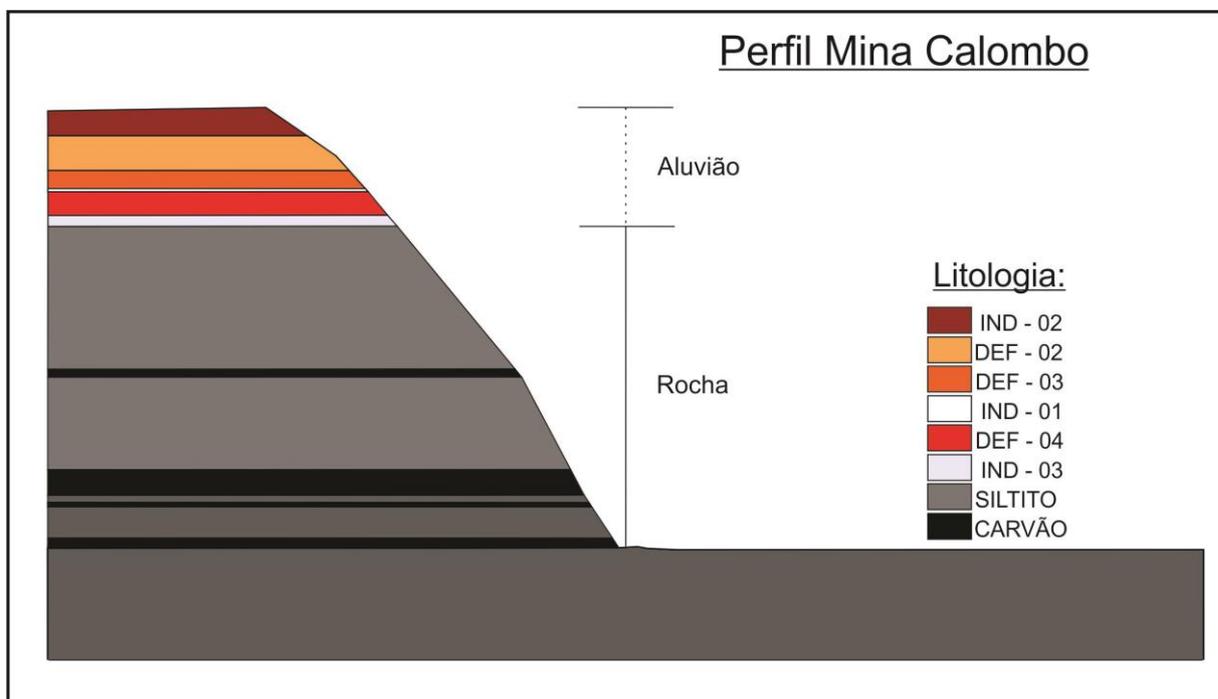
Figura 44: Perfil Topográfico Mina do Calombo



Fonte: Autoria própria

No talude em estudo foram encontradas um total de 14 camadas, o pacote formado pelo aluvião com as areias e argilas e o pacote formado pela rocha com o siltito e o carvão mineral. O posicionamento de cada camada no talude é exposto na Figura 45.

Figura 45: Perfil geológico Mina do Calombo.



Fonte: Autoria própria

O aluvião se apresenta com cerca de 13 metros de espessura, enquanto a camada de rocha apresenta cerca de 36 metros até a última camada de carvão, totalizando os 50 metros.

Através da metodologia de campo e laboratorial utilizada nesta dissertação, foi possível obter as características e propriedades de cada uma das litologias presentes no talude, como se observa na Tabela 9. Desta forma o software será alimentado com dados coletados diretamente do talude em estudo, gerando assim uma simulação mais próxima da realidade. O RS2 e o Slide apresentam padrões de introduções de dados semelhantes, porém no RS2 é possível introduzir dados de pico e residual do material ensaiado.

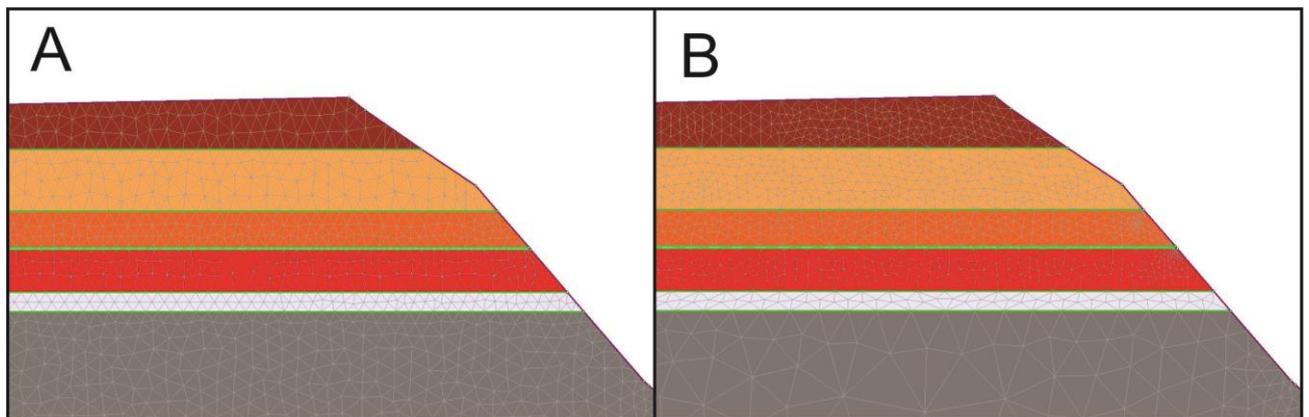
Nesta etapa é importante que cada programa computacional tenha os dados de entrada introduzidos de forma correta e de acordo com a necessidade solicitada para a metodologia de cálculo.

Tabela 9: Propriedades de cada uma das litologias e dados usados nos softwares

Litologias	Pico c'	Pico Φ	Residual c'	Residual Φ	Densidade	Módulo de Young	Poisson
	(KN/m ²)	°	kPa	°	(KN/m ³)	(kPa)	
IND-01	12,69	34,8	5,21	34,5	17,7	22000	0,3
IND-02	19,77	27,87	9,95	24,9	15	22000	0,3
IND-03	25,55	20,82	8,9	22,15	14,5	22000	0,3
DEF-01	10,52	35	-	-	20	60000	0,3
DEF-02	5,26	35	-	-	20	60000	0,3
DEF-03	4,2	35	-	-	20	60000	0,3
Siltito e Siltito M	173	27	-	-	27	5000000	0,4
Carvão(A,S2,S3,CM)	107	20	-	-	27	-	0,4

Na simulação numérica a discretização do modelo foi refinada somente nas regiões de maior interesse, neste caso onde se encontra o aluvião em estudo. Com isso, a malha no maciço rochoso ficou mais aberta, a fim de evitar grandes esforços computacionais desnecessários. A malha foi refinada, localmente, a fim de melhorar a resposta da simulação. A malha inicial era de 13820 elementos criados por conexões triangulares. Após o refino da malha, somente na região de interesse, ela foi gerada com 3551 pontos, os elementos na rocha mais distantes e exigindo menos esforço de cálculo, Figura 46.

Figura 46: A) Malha normal; B) Malha com adensamento de elementos no aluvião.



Fonte: Autoria própria

5.2.2 Cenários de estudos

A retroanálise aqui realizada é composta por quatro cenários que buscam avaliar a estabilidade do talude sob diferentes níveis de saturação de água no talude:

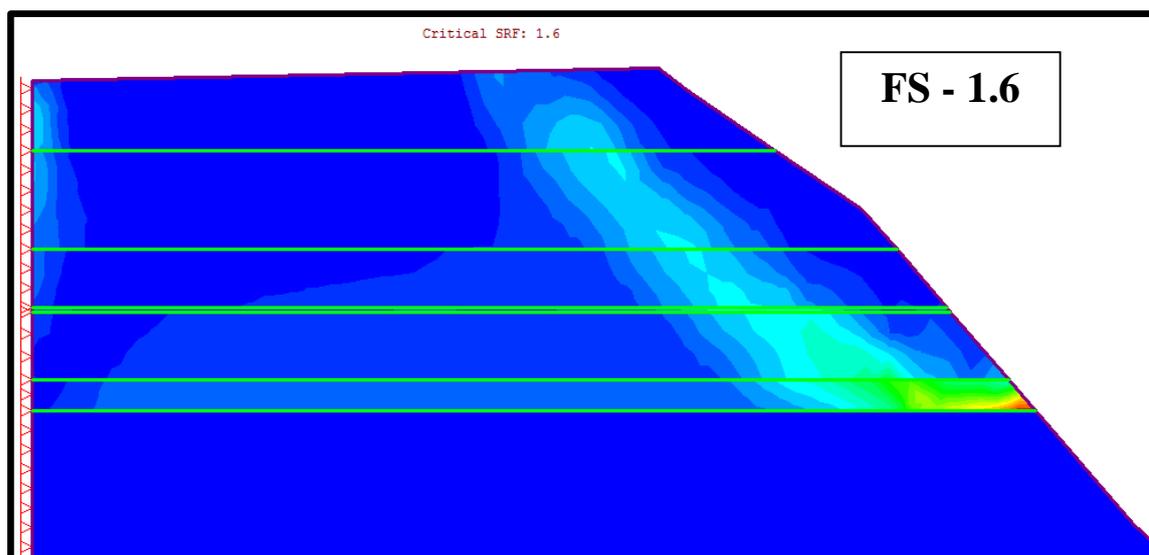
- Cenário 01: Talude seco
- Cenário 02: Talude com máxima saturação de água 80%
- Cenário 03: Talude com média saturação de água 50%
- Cenário 04: Talude com situação de campo saturação de água 30%

Durante estes cenários, os resultados encontrados pelas duas metodologias serão comentados.

5.2.2.1 Cenário 01

Neste primeiro cenário foi feita uma retroanálise do talude, considerando-o seco, sem a presença de água no local, apesar de não ser a situação real encontrada. Este primeiro problema tem como objetivo observar qual o tipo de interação existente entre os diferentes materiais no talude. Assim os programas geraram algumas simulações, representando a situação aqui proposta. A Figura 47 mostra o resultado obtido no programa RS2.

Figura 47: Simulação talude seco RS2

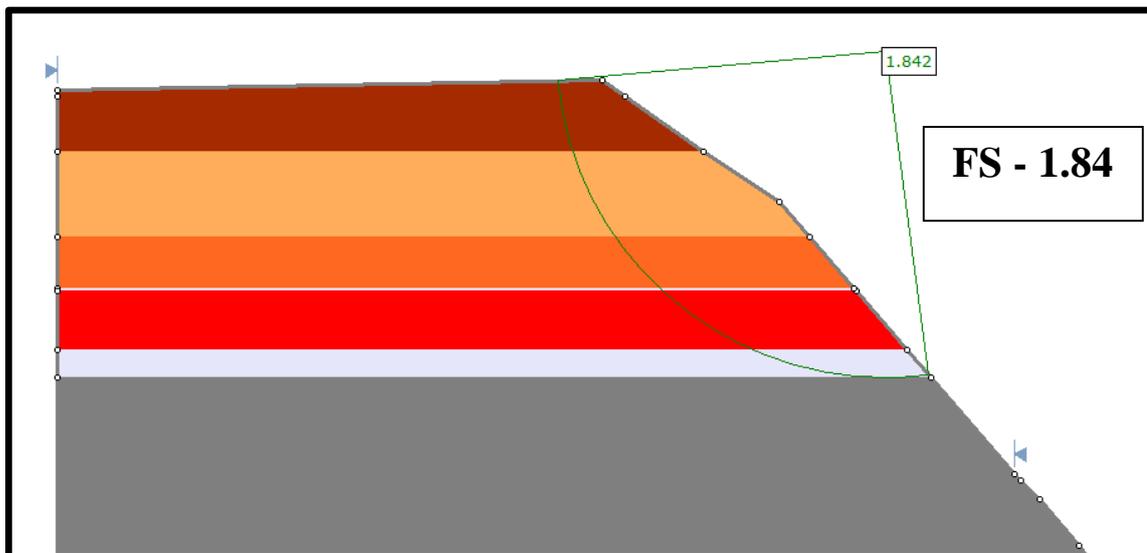


Fonte: Autoria própria

O fator de segurança encontrado pelo Método de Elemento Finitos foi de 1.6. A forma como o programa modela a ruptura aparenta se adequar com o que é encontrado em campo. A camada de siltito logo abaixo não se mostra afetada na análise.

O mesmo cenário foi analisado através do programa Slide, como a Figura 48 mostra:

Figura 48: Simulação Slide talude seco ruptura circular

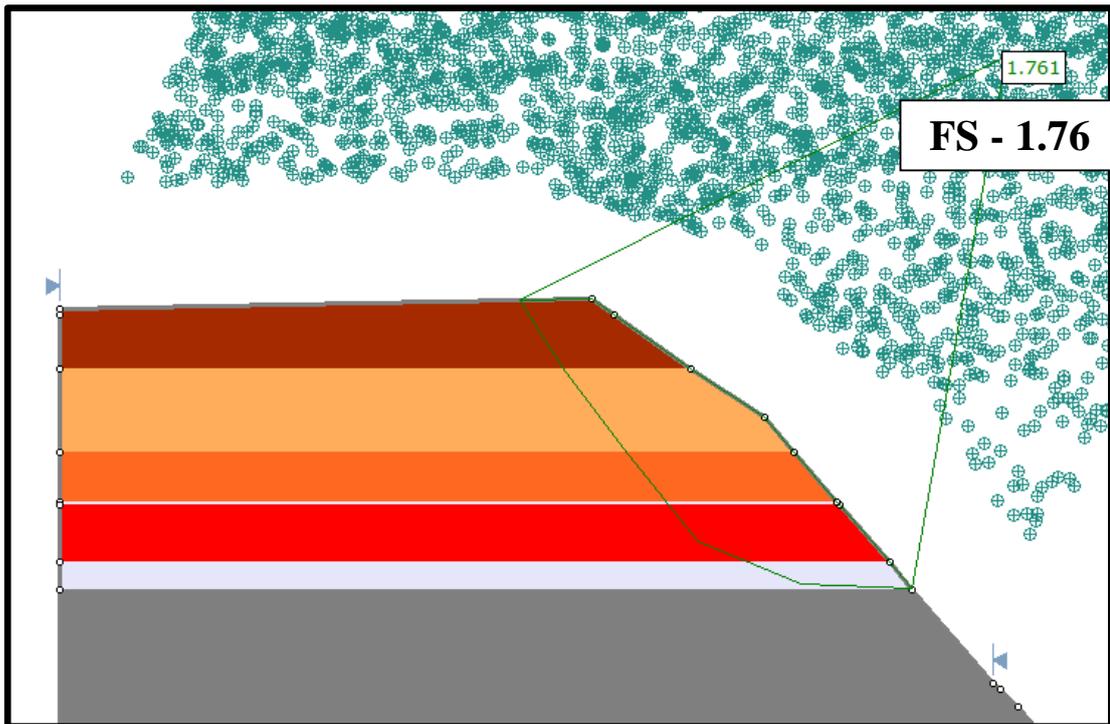


Fonte: Autoria própria

Pelo Método de Equilíbrio Limite, o fator de segurança encontrado tanto por Bishop Simplificado quanto por Morgenstern e Price é de 1,84 considerando uma ruptura com envoltória de busca circular. A simulação se restringe à área do aluvião e o primeiro metro da camada de siltito.

Para fins de avaliar a superfície de ruptura foi feita uma análise da superfície não circular como mostra a Figura 49.

Figura 49: Simulação Slide talude seco ruptura não circular



Fonte: Autoria própria

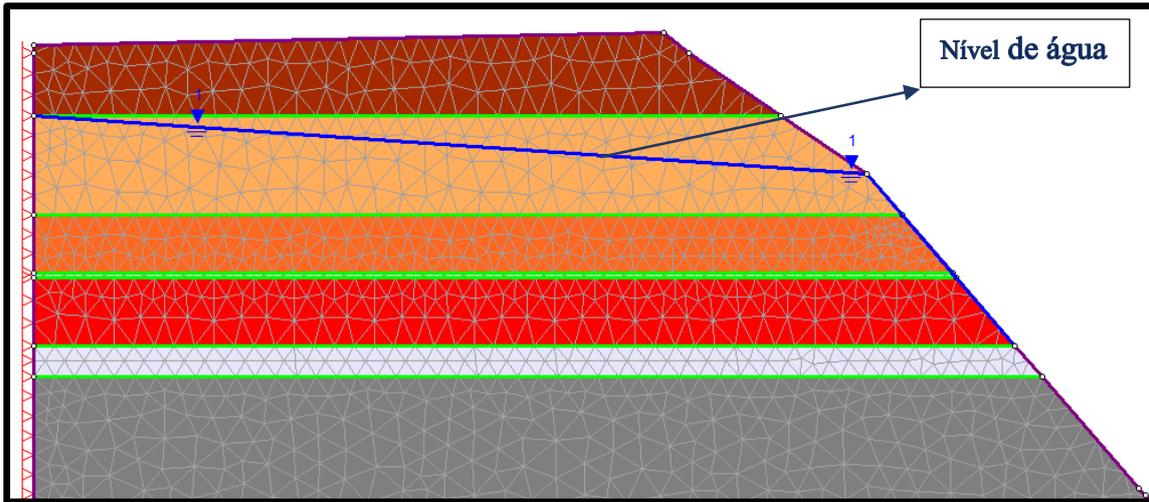
O FS encontrado é de 1.76 levemente mais baixo que a análise feita para superfície circular.

Os dois métodos de análise pelos programas RS2 e Slide apresentam valores de FS semelhantes para as simulações realizadas. As superfícies de ruptura proposta pelos programas são consideradas satisfatórias.

5.2.2.2 Cenário 02

Neste segundo cenário foi feita uma retroanálise do talude, considerando a presença de máxima de água, cerca de 80% do talude foi saturado. Este segundo cenário tem como objetivo observar qual o tipo de modificação a introdução da água pode trazer na interação dos diferentes materiais no talude. Na Figura 50 é possível observar a posição da cota da linha de água utilizada durante este cenário.

Figura 50: Nível de água máxima saturação 80%

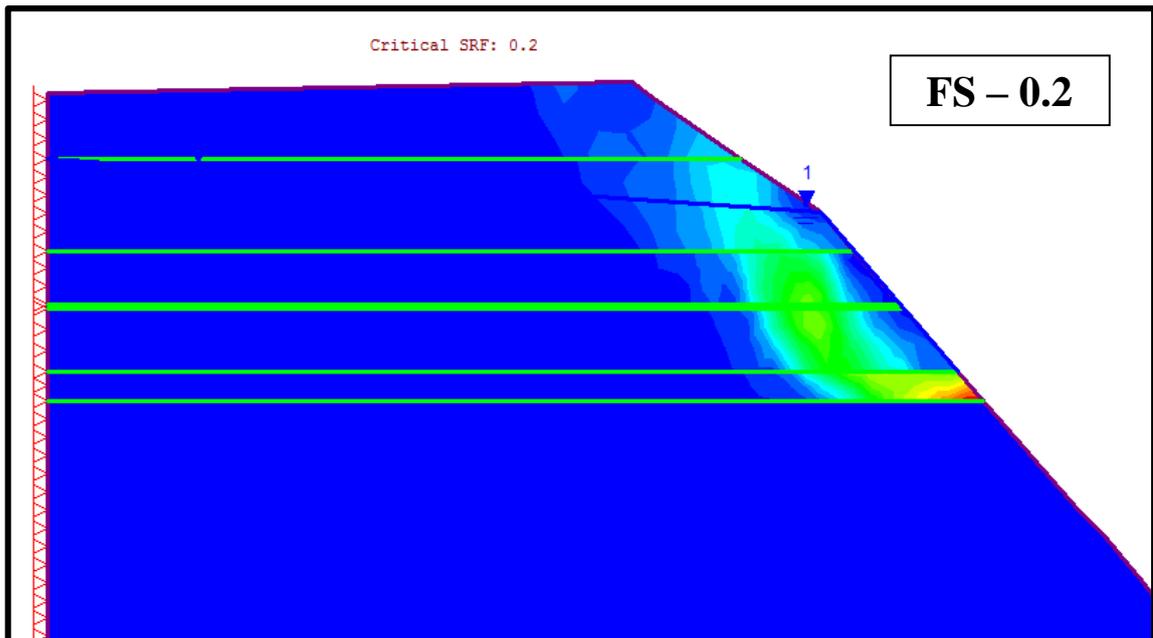


Fonte: Autoria própria

Com a cota de água estabelecida as camadas afetadas foram devidamente selecionadas nos programas para que seus parâmetros iniciais fossem agora influenciados pela introdução de água na simulação.

Figura 51 demonstra a análise realizada no programa RS2.

Figura 51: Simulação com máxima saturação de água RS2



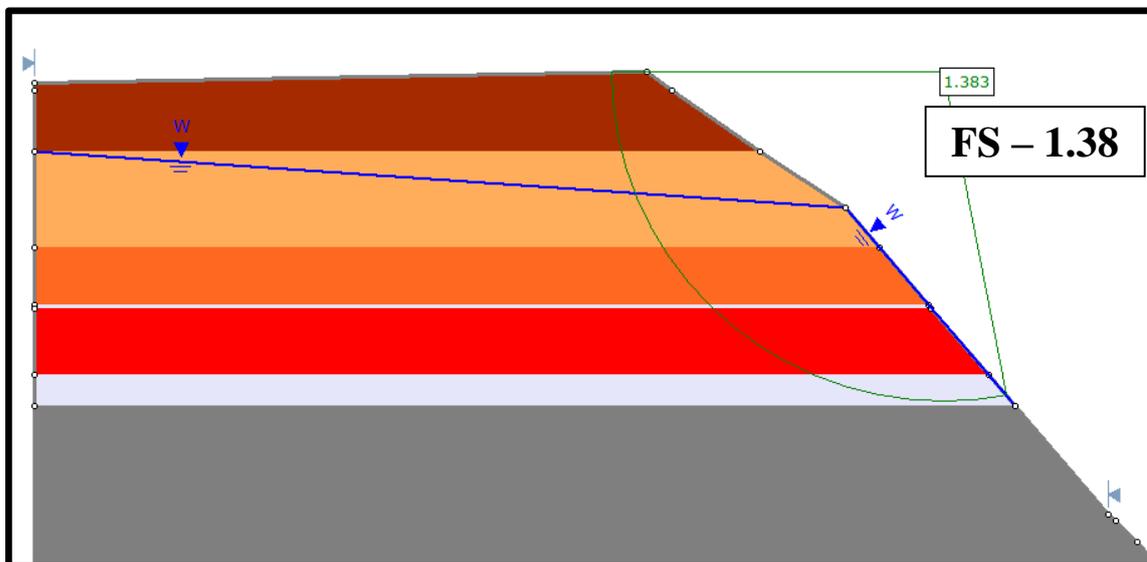
Fonte: Autoria própria

O fator de segurança encontrado pelo Método de Elementos Finitos foi de 0.2. A introdução de água em grande escala no sistema afetou fortemente o valor do FS gerado pela

simulação. A forma como o programa modela a ruptura é satisfatória, mas o valor do FS é muito baixo.

O mesmo cenário foi analisado através do programa Slide, conforme é possível observar na Figura 52.

Figura 52: Simulação Slide talude com máxima saturação de água, ruptura circular

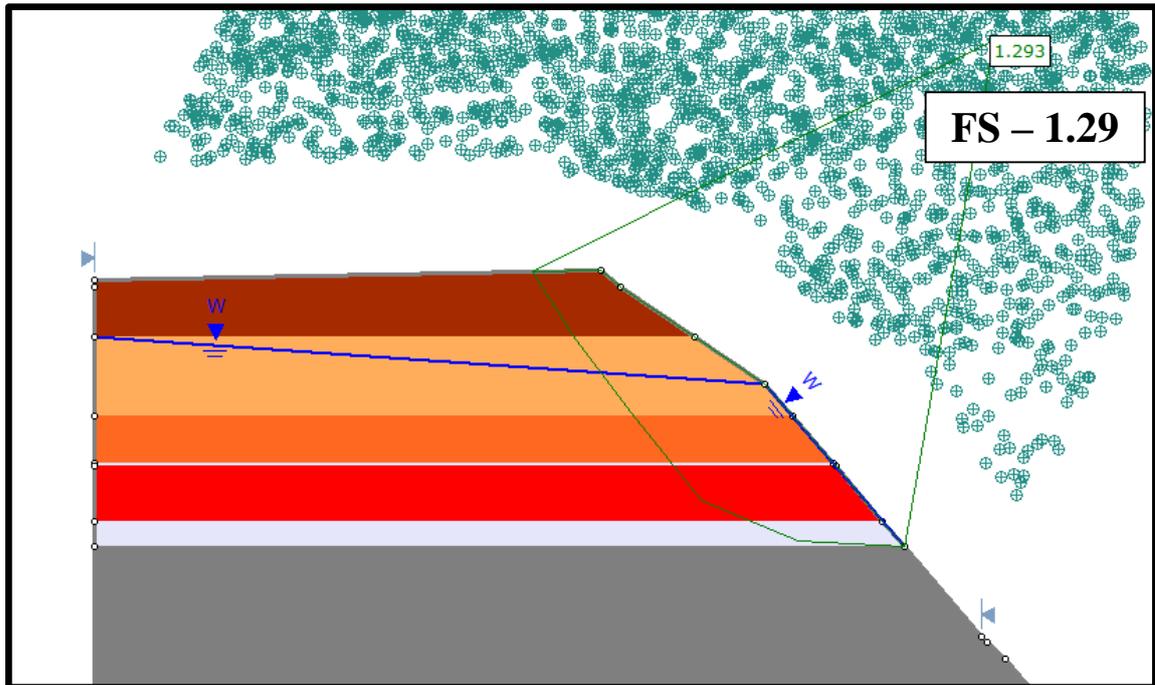


Fonte: Autoria própria

Pelo Método de Equilíbrio Limite, o fator de segurança encontrado tanto por Bishop Simplificado quanto por Morgenstern e Price é de 1,38 considerando uma ruptura com envoltória de busca circular. A simulação se restringe à área do aluvião e ao primeiro metro da camada de siltito.

Para fins de avaliar a superfície de ruptura foi feita uma análise de superfície não circular como mostra a Figura 53.

Erro! Fonte de referência não encontrada.



Fonte: Autoria própria

O FS encontrado é de 1.29 levemente mais baixo que a análise feita para superfície circular.

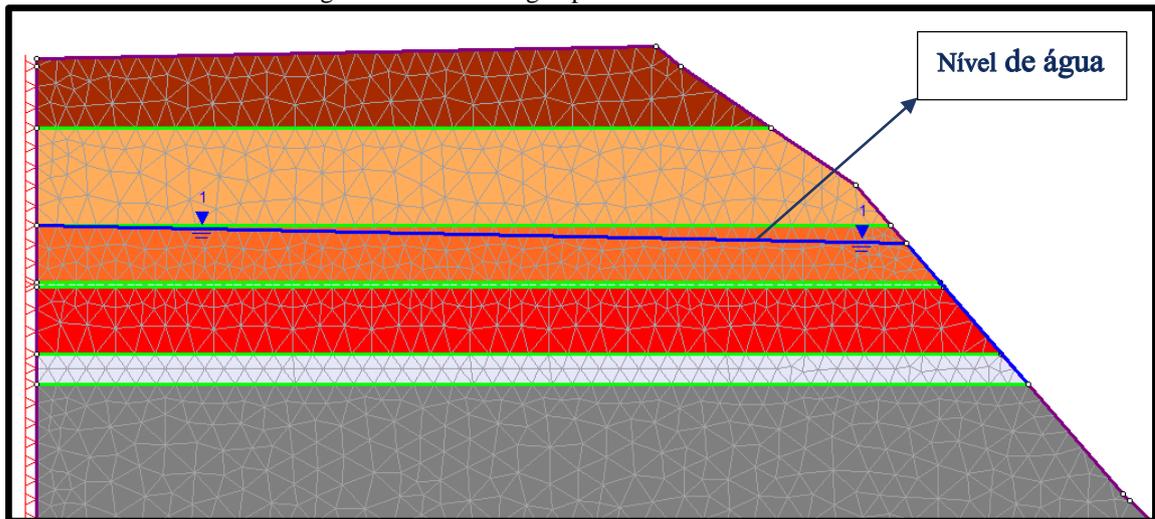
Os dois métodos de análise apresentam valores de FS um tanto distintos devido à influência da água. O RS2 com FS 0.2 e o Slide com FS 1.38-1.29. As superfícies de ruptura proposta pelos programas são consideradas satisfatórias.

5.2.2.3 Cenário 03

Neste terceiro cenário foi feita uma retroanálise do talude, considerando o talude parcialmente saturado, cerca de 50%. Este terceiro cenário tem como objetivo observar qual o tipo de modificação da água pode trazer na interação dos diferentes materiais no talude. Na

Figura 544 é possível observar a posição da cota da linha de água utilizada durante este cenário.

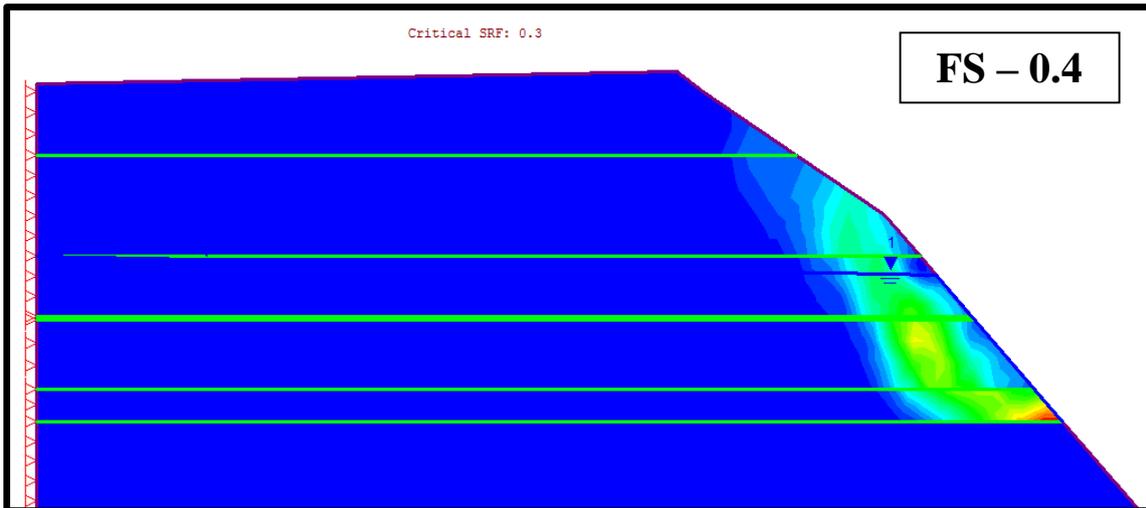
Figura 54: Nível de água parcialmente saturado 50%



Fonte: Autoria própria

Com a cota de água estabelecida as camadas afetadas foram devidamente selecionadas nos programas para terem seus parâmetros iniciais influenciados pela introdução de água na simulação. A Figura 55 mostra o resultado obtido no programa RS2.

Figura 55: Simulação com saturação parcial de água RS2

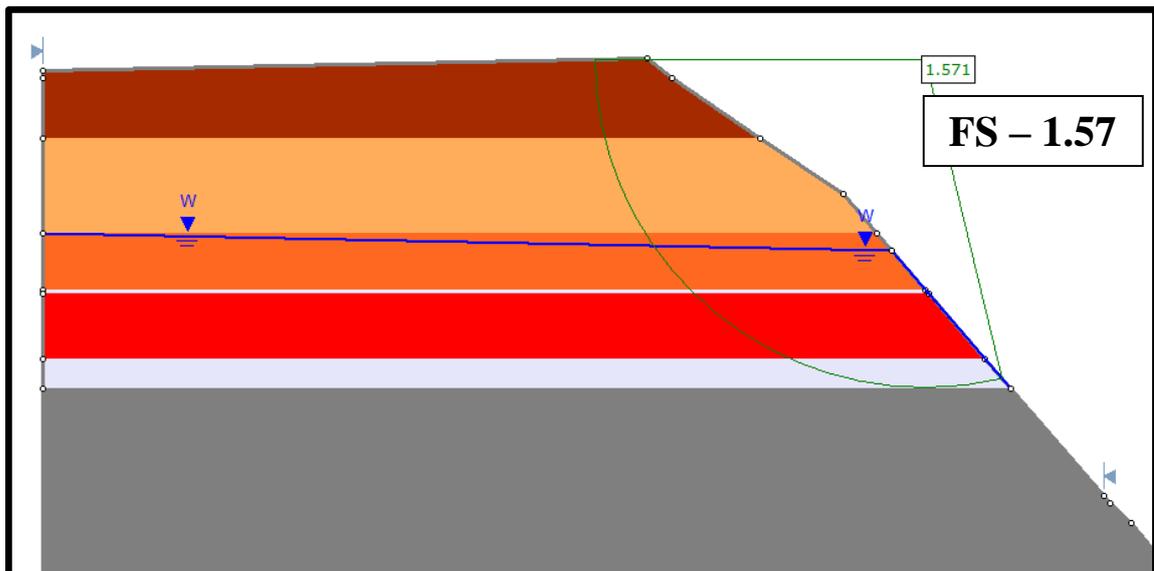


Fonte: Autoria própria

O fator de segurança encontrado pelo Método de Elemento Finitos foi de 0.3. A introdução de água no sistema afetou fortemente o valor do FS gerado. Apesar de uma diminuição de 30% no nível de água não se observou grande alteração no FS. A forma como o programa modela a ruptura é satisfatória.

O mesmo cenário foi analisado através do programa Slide, conforme é possível observar na Figura 56.

Figura 56: Simulação Slide talude parcialmente saturado, ruptura circular.



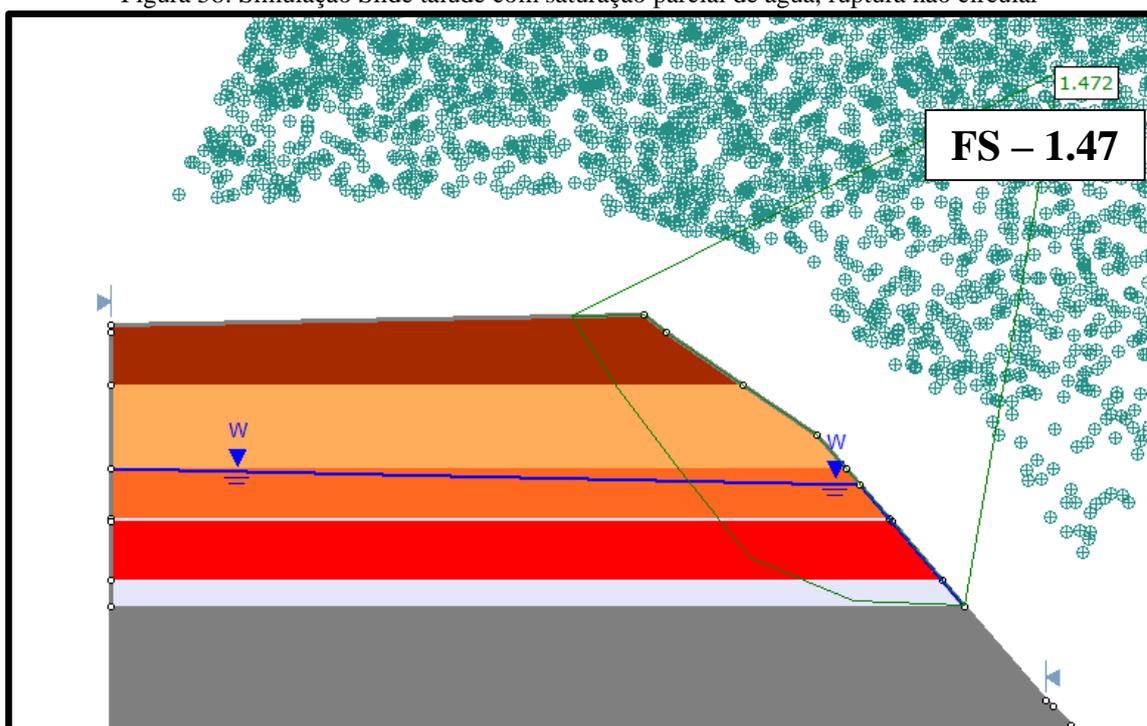
Fonte: Autoria própria

Pelo Método de Equilíbrio Limite, o fator de segurança encontrado tanto por Bishop Simplificado quanto por Morgenstern e Price é de 1,57 considerando uma ruptura com

envoltória de busca circular. A simulação se restringe à área do aluvião e ao primeiro metro da camada de siltito.

Para fins de avaliar a superfície de ruptura foi feita uma análise da superfície não circular como mostra a Figura 57.

Figura 58: Simulação Slide talude com saturação parcial de água, ruptura não circular



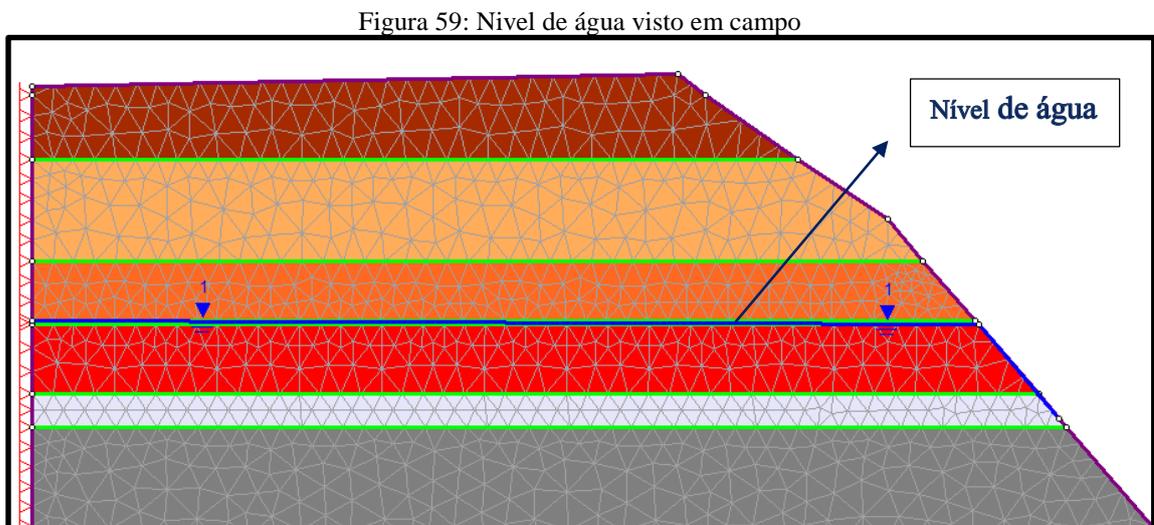
Fonte: Autoria própria

O FS encontrado é de 1.42, levemente mais baixo que a análise feita para superfície circular.

Os dois métodos de análise apresentam valores de FS um tanto distintos devido à influência da água. O RS2 com FS 0.3 e o Slide com FS 1.57-1.42. As superfícies de ruptura proposta pelos programas são consideradas satisfatórias.

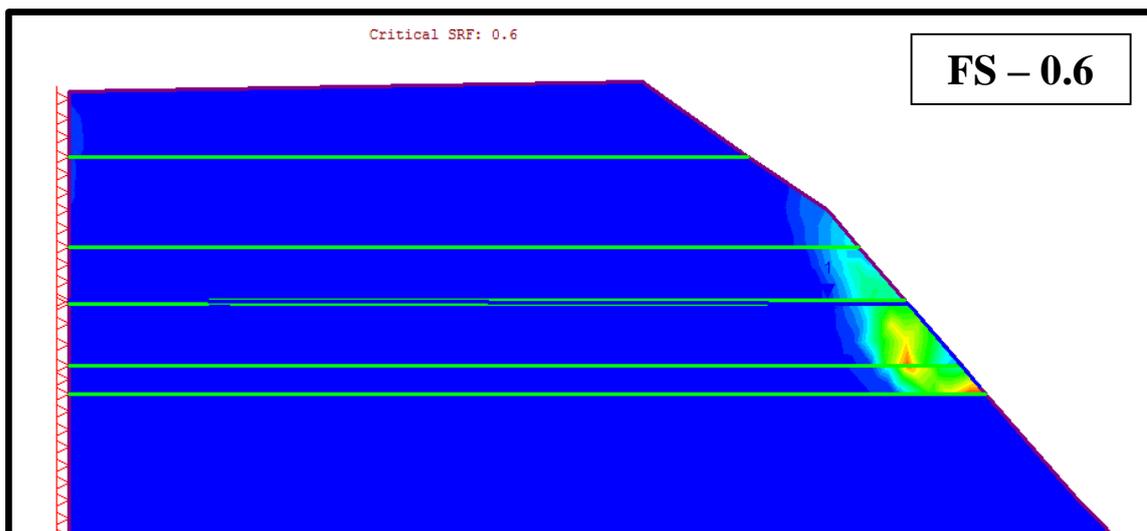
5.2.2.4 Cenário 4

Neste quarto e último cenário analisado foi feita uma retroanálise do talude, considerando a presença água vista em campo com cerca de 30% de saturação. Este quarto cenário tem como objetivo observar a real condição exercida pela água no talude de estudo. Na Figura 59 é possível observar a posição da cota da linha de água utilizada durante este cenário.



Com a cota de água estabelecida as camadas afetadas foram devidamente selecionadas nos programas para terem seus parâmetros iniciais influenciados pela introdução de água na simulação. A Figura 60 mostra o resultado obtido no programa RS2.

Figura 60: Simulação com saturação de água vista em campo RS2

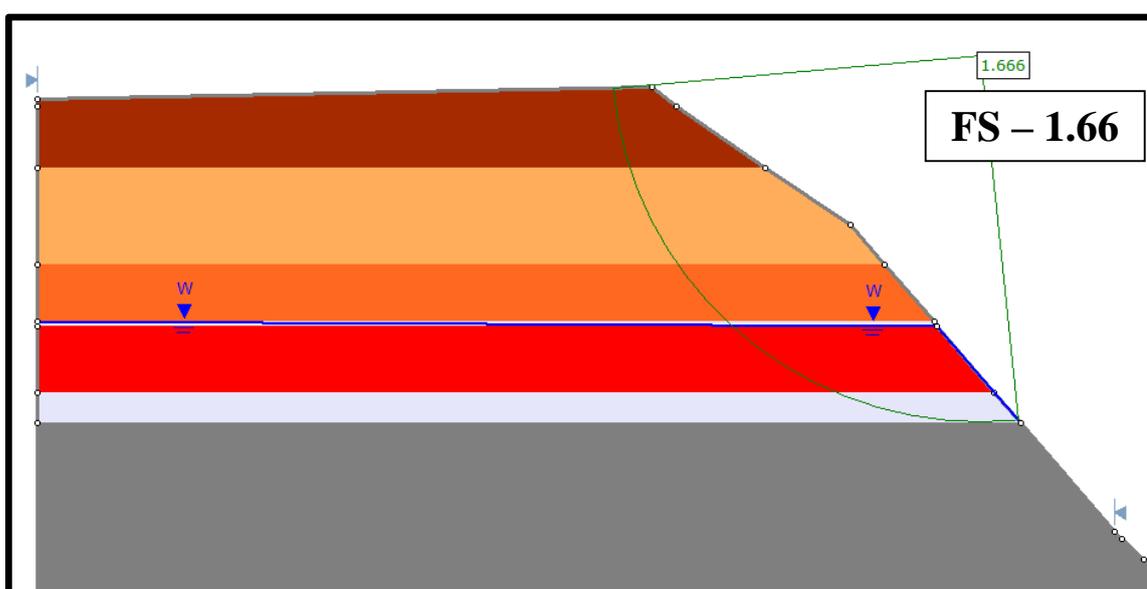


Fonte: Autoria própria

O fator de segurança encontrado pelo Método de Elemento Finitos foi de 0.6. A água mesmo em 30% do talude continua exercendo influência na condição do FS. A forma como o programa modela a ruptura é satisfatória.

O mesmo cenário foi analisado através do programa Slide, conforme é possível observar na Figura 61.

Figura 61: Simulação Slide talude com saturação de água vista em campo, ruptura circular



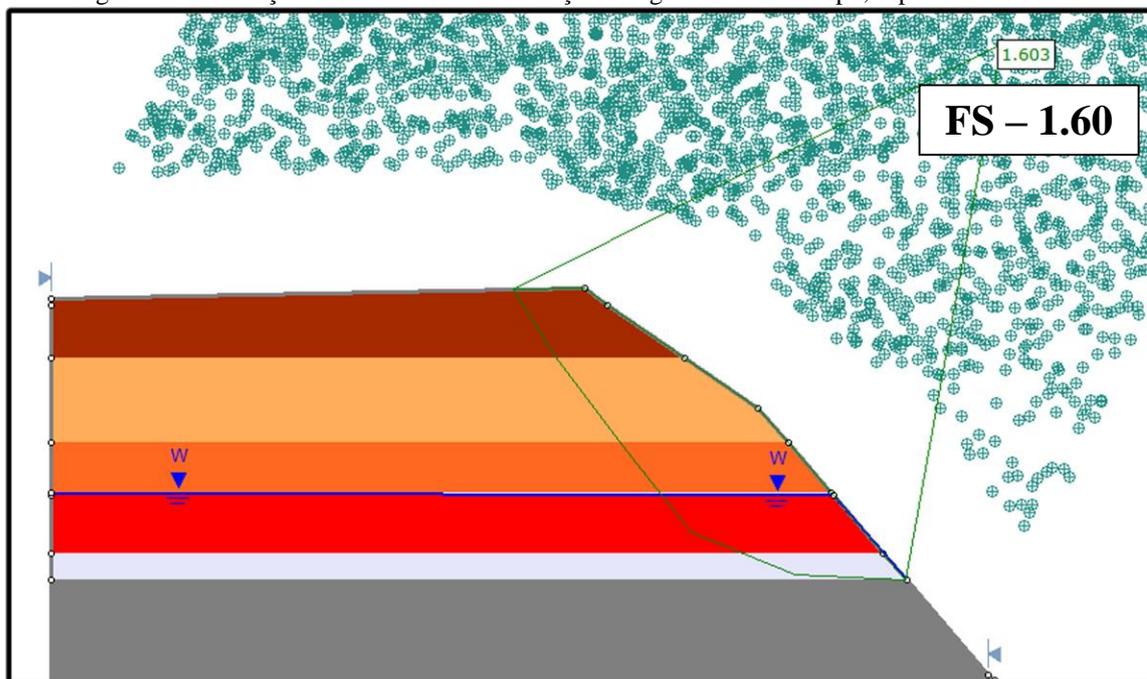
Fonte: Autoria própria

Pelo Método de Equilíbrio Limite, o fator de segurança encontrado tanto por Bishop Simplificado quanto por Morgenstern e Price é de 1,66 considerando uma ruptura com

envoltória de busca circular. A simulação se restringe à área do aluvião e ao primeiro metro da camada de siltito.

Para fins de avaliar a superfície de ruptura foi feita uma análise da superfície não circular como mostra a Figura 62.

Figura 62: Simulação Slide talude com saturação de água vista em campo, ruptura não circular



Fonte: Autoria própria

O FS encontrado é de 1.60 levemente mais baixo que a análise feita para superfície circular.

Ao final de todos estes cenários, é possível criar uma tabela entre os valores de FS obtidos. Tabela 100:

Tabela 10: FS obito pelo RS2 e SLIDE nos diferentes cenários

Cenário	RS2	SLIDE CIRCULAR	SLIDE NÃO CIRUCLAR
Cenário 01	1.6	1.84	1.76
Cenário 02	0.2	1.38	1.29
Cenário 03	0.3	1.57	1.47
Cenário 04	0.6	1.66	1.60

Conforme o acréscimo de água iria ocorrendo nos diferentes cenários os programas eram influenciados. O RS2 se mostrou mais suscetível a esta adição de água, mostrando uma queda nos seus índices de FS. Já o Slide não aparentou sofrer tanta influência da adição de água na simulação, seus valores de FS não apresentaram uma grande variação.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi feito um estudo de caso de retroanálise do rompimento de talude ocorrido na Mina do Calombo, Arroio dos Ratos, RS. Este evento ocorreu após fortes períodos de chuvas no fim do ano de 2015.

Para estudar este problema foi criada uma metodologia composta por etapas de coleta de amostras, ensaios em laboratório e simulação computacional. Através dos dados das propriedades físicas obtidos em laboratório, foi possível fazer uma classificação dos materiais, identificando então DEF-02 como uma areia mal graduada e as areias DEF – 03 e 04 como sendo areias bem graduadas. Os materiais argilosos foram classificados: a amostra IND-01 foi considerada uma argila pouco plástica e as amostras IND-02 e 03 como sendo argilas muito plásticas.

Após quatro cenários propostos de simulações é possível notar que a superfície de ruptura gerada nas simulações satisfaz a condição de campo. A forma de ruptura apresentada é de um deslizamento rotacional conchoidal.

Nota-se claramente durante os cenários propostos que a influência da água nas simulações gerou uma certa divergência entre os métodos. Quando os taludes se encontravam secos os valores do FS das duas metodologias eram semelhantes. Com o acréscimo de água nas simulações, saturando o talude em 80%, 50% e 30%, se observou um afastamento dos valores do FS inicialmente obtidos, conforme exposto na Tabela 11.

As simulações por Método de Elementos Finitos se mostraram muito suscetíveis à água. Como este é um método complexo que analisa cada elemento separadamente, a interferência causada entre as distintas camadas do aluvião juntamente com a água presente no modelo contribuíram para que o valor de FS caísse.

O método de Equilíbrio Limite mostrou em suas simulações sofrer uma menor influência quando a água é introduzida no modelo. Por ser este um método que leva mais em consideração a geometria e peso das matérias, e não analisa a interferência que ocorre entre essas camadas o valor do FS não sofreu grandes alterações com os diferentes cenários.

Assim, se deve fazer ponderações. Neste estudo o FS encontrado através do MEF condiz mais com a realidade encontrada no local. O método demonstra que ocorre a ruptura com a inserção de água na simulação. O método de EL apresenta uma diminuição do FS, porém não demonstra a ruptura com $FS \leq 1$.

Apesar das diferenças, ambos os métodos são confiáveis, mas devem ser usados de forma adequada ao tipo de problema existente. Em situações mais simples e com taludes mais homogêneos o EL torna-se mais indicado, para problemas de maior complexidade e interações entre camadas o MEF se mostrou satisfatório e com boa resposta.

Independentemente da metodologia e da ferramenta computacional, em retroanálises de escorregamentos ainda prevalece a observação crítica e experimentada do engenheiro, seja por um lado, no entendimento da lógica do programa, ou por outro lado, no entendimento da superposição de efeitos e a influência de cada agente envolvido no escorregamento.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Proposta de retaludeamento do talude rompido levando em consideração fatores da operação, para melhor relação de custo benefício.
- Realizar maior estudo nas camadas de areias do aluvião. Ensaio triaxiais nas areias iriam determinar com maior exatidão os ângulos de atrito de cada material e camada.
- Realizar testes com difratometria de raios x nas argilas para um melhor entendimento de suas propriedades e minerais que as compões.
- Aplicar a metodologia em outros taludes para observar e comparar os dados encontrados, taludes simples e de maior complexibilidade.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Rochas e Solos: NBR 6502**. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Abertura de poços e trincheiras de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas: NBR 9604**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo – Análise granulométrica: NBR 7181**. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo - Determinação do limite de liquidez: NBR 6459**. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Solo - Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180**. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica: NBR 6508**. Rio de Janeiro, 1984.8p.

Aryal, K. P., (2006). Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods. Dissertação de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology.

AUGUSTO FILHO, O., Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica, In: Anais. 1ª Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, 1992, pp 721-733

BRINKGREVE, R.B.J e BAKKER, H.L. Computer Methods and Advances in Geomechanics. In: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER METHODS AND ADVANCES IN GEOMECHANICS CAIRNS: ed. BalKema A.A., 1991. p 1117-1118-1119.

Clough, R.W. e Woodward, R.J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. J. Soil Mech. e Found. Div., ASCE, 93(4), pp.529-549.

COSTA NUNES, A. J. da. Estabilidade de Taludes- Rocha e Solo. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÃO, [1970],[s.l] : [s.n], [1970]. p 98-118

CPRM – GEOBANK, **Levantamento geológico**. Em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br>; Data de acesso: 20/04/2016

CRUDEN, D.M. e VARNES, D.J., Landslide types and processes, In. Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation (A.K. Turner e R.L. Schuster, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1996, pp 36-75.

DAEMON, R. F.; CASSALETTI, P.; CIGUEL, J. H. G. 1991. Biopaleogeografia da bacia do paraná. Curitiba, Petrobrás. Relatório interno

DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da bacia do paraná. In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Porto Alegre, 1: 41-67

DAEMON, R. F.; QUADROS, L. P. 1969. Bioestratigrafia do neopaleozico da bacia do paraná. In: XXIV Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Brasília.p355-412.

Delgado, R.(1987). Método dos elementos finitos. Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, pp.1-85.

Fredlund, D.G., Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, Vol 14, pp.429-439.

GOMES, R. Aula 1 – Taludes e movimentos de massa.

GRIFFITHS, D.V. e LANE P.A. Slope Stability Analysis by Finite Elements. Géotechnique, London, v 49, p 387- 403, jun. 1999.

GRIFFITHS, D. V. e Marquez R M, Three Dimensional Slope Stability Analisis By Elasto - Plastic Finite. Géotechnique, London, v 57, p 537-564, ago. 2007.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C.M., Estabilidade de taludes naturais e de escavação, Edgard Blucher, São Paulo, 1984, 194p.

GUSMÃO, R. P.; MAIO, S.R.; CARREIRA, M. E. S.; ESTEVES, M. G.; AMNDOLA P. L. 1990. Diagnóstico Brasil. A ocupação do território e o meio ambiente. IBGE. Rio de Janeiro, 170 p.

HEAD, K.H., Manual of Soil Laboratory Testing. Pentech Press, London, v. 2, 1982.

HOEK, E. e BRAY, J. W. Rock Slope Engineering. [s.l]: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. p 358.

HOLZ, M. 1997. Early sequences stratigraphy and paleophysiography of the paraná basin in northeastern rio grande do sul state, brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro. Vol. 69, nm. 4, p. 521-543.

HUTCHINSON, J.N.O., Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, In: Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 1988, pp.3-36.

LAMBE, T.W. e WHITMAN, R.V., Soil mechanics, SI version, John Wiley & Sons, 1979,553p.

Matos Fernandes, M. (2006), Mecânica dos solos, Volume 2. FEUP Edições, Porto.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A, B.; SCHNEIDER, R. L. 1994. Boletim de Geociências da Petrobrás. Rio de Janeiro. V.8, no.1, jan-mar. 68-82.

MURTHY, V.N.S., Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Marcel Dekker, New York, 2003, 1029p

NIMER, E. 1990. Clima. In: Geografia do Brasil. Região Sul. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Rio de Janeiro. v. 2, p. 151-187.

Onãte, E.(2009). Structural analysis with the finite element method. CIMNE, School of Civil Engineering, UPC, Barcelona. Plaxis b.v., manual.

RIGO, M.L., Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005, 347p.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da bacia do paraná. In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Porto Alegre, 1: 41-67.

SILVEIRA, R.M., Comportamento geotécnico de um solo coluvionar de São Vendelino (RS), Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008,302p.

TERZAGHI, K., Mechanism of landslides, In: Application of geology to engineering practice, Geological Society of America, Berkey, 1950, pp 83-123.

TAYLOR, D. W. Stability of earth slopes. J. Boston Soc. Civil Engrs, [s.l], v24, p. 197-246, 1948.

VARNES, D.J., Slope movement types and processes, In. Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster e R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C.1978, pp. 11-33.

WOLLE, C. M. Efeito Tridimensional dos Escorregamentos Translacionais da Serra do Mar. In: VI CBGE/ IX COBRAMSEF, 1990, Salvador: ABGE - ABMS, 1990. 8 p.

ZALAN, P. V.; WOLF, S. ASTOFOLI, M. A M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. 1987. Tectônica e sedimentação da bacia do paraná. Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. Curitiba. v. 1: 441-477.

ZALAN, P. V.; WOLF, S. ASTOFOLI, M. A M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A. 1990. The paraná basin, Brasil. In: LEIGHTON, KOLATA, OLTZ & EIDEL(Eds), Interior cratonic basins. AAPG Memoir 51, p.681-701.

Zhu, D,Y. (2008). Investigations on the accuracy of the simplified Bishop method. Landslides and Engineered Slopes, Chen et al. (eds.), pp. 1055-1057, Taylor & Francis Group, London.

ANEXOS

Dados gerados pelos programas RS2 e Slide durante os diferentes cenários:

CENÁRIO 01

-Simulação talude seco RS2:

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 01
Last saved with Phase2 version:	9.016
Project Title:	Project1

General Settings

Single stage model	
Analysis Type:	Plane Strain
Solver Type:	Gaussian Elimination
Units:	Metric, stress as kPa
Permeability Units:	meters/second
Time Units:	seconds

Analysis Options

Maximum Number of Iterations:	500
Tolerance:	0.01
Number of Load Steps:	Automatic
Convergence Type:	Absolute Energy
Tensile Failure:	Reduces Shear Strength
Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01	

Strength Reduction Settings

Initial Estimate of SRF:	1
Step Size:	Automatic
Tolerance (SRF):	0.1
Limit SSR Search Area:	No
Accelerate SSR Analysis:	Yes
Apply SSR to Mohr-Coulomb Tensile Strength:	Yes
Convergence Parameters:	Automatic

Groundwater Analysis

Method:	Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight:	9.81 kN/m ³

Probability: None

Field Stress

Field stress:	Gravity
Ground surface elevation:	0 m
Unit weight of overburden:	27 kN/m ³
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane):	1
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane):	1
Locked-in horizontal stress (in-plane):	0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane):	0

Mesh

Mesh type: Graded

Element type: 3 Noded triangles

Number of elements: 13132
Number of nodes: 6818

Mesh Quality

- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because they are inverted
- **Note:** Elements can be of poor quality for more than one reason

Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Reset Displacements

Displacements reset after: 1

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas

- External Boundary Area: 5968.768 m²
- External Boundary Perimeter: 387.329 m

1

- Values not available until this stage is viewed in a window

Material Properties

Material: DEF 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	25000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	11 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	11 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: DEF 03

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	25000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	52 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	52 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: DEF 04

Color	
-------	--

Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	25000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	42 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	42 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IND 03

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	14.5 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	15000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	22 degrees
Peak cohesion	25 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	21 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IND 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force

Unit weight	15 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	15000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27.87 degrees
Peak cohesion	20 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	25 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IND 01

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	17.7 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	15000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	34.8 degrees
Peak cohesion	13 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	34.5 degrees
Residual Cohesion	5 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: SILTITO

Color	
Initial element loading	field stress only
Elastic type	isotropic

Young's modulus	5e+006 kPa
Poisson's ratio	0.4
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27 degrees
Peak cohesion	173 kPa
Material type	Elastic
Piezo to use	None
Ru value	0

Shear Strength Reduction - Material Properties

Strength Reduction Factor: 1
Maximum Total Displacement: 0.0563156 m
Converged: yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	11 kPa
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	11 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	52 kPa
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	52 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	42 kPa
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	42 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	22 degrees
Peak cohesion	25 kPa
Residual Friction Angle	21 degrees
Residual Cohesion	9 kPa

Material	IND 02
-----------------	---------------

Peak friction angle	27.87 degrees
Peak cohesion	20 kPa
Residual Friction Angle	25 degrees
Residual Cohesion	9 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	34.8 degrees
Peak cohesion	13 kPa
Residual Friction Angle	34.5 degrees
Residual Cohesion	5 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Strength Reduction Factor: 1.5
Maximum Total Displacement: 0.063451 m
Converged: yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	25.0234 degrees
Peak cohesion	7.33333 kPa
Residual Friction Angle	25.0234 degrees
Residual Cohesion	7.33333 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	25.0234 degrees
Peak cohesion	34.6667 kPa
Residual Friction Angle	25.0234 degrees
Residual Cohesion	34.6667 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	25.0234 degrees
Peak cohesion	28 kPa
Residual Friction Angle	25.0234 degrees
Residual Cohesion	28 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	15.0749 degrees
Peak cohesion	16.6667 kPa
Residual Friction Angle	14.3545 degrees
Residual Cohesion	6 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	19.4193 degrees
Peak cohesion	13.3333 kPa
Residual Friction Angle	17.269 degrees

Residual Cohesion	6 kPa
-------------------	-------

Material	IND 01
Peak friction angle	24.8604 degrees
Peak cohesion	8.66667 kPa
Residual Friction Angle	24.6167 degrees
Residual Cohesion	3.33333 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Critical Strength Reduction Factor: 1.6
Maximum Total Displacement: 0.148417 m
Converged: yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	23.6356 degrees
Peak cohesion	6.875 kPa
Residual Friction Angle	23.6356 degrees
Residual Cohesion	6.875 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	23.6356 degrees
Peak cohesion	32.5 kPa
Residual Friction Angle	23.6356 degrees
Residual Cohesion	32.5 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	23.6356 degrees
Peak cohesion	26.25 kPa
Residual Friction Angle	23.6356 degrees
Residual Cohesion	26.25 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	14.1719 degrees
Peak cohesion	15.625 kPa
Residual Friction Angle	13.4911 degrees
Residual Cohesion	5.625 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	18.2888 degrees
Peak cohesion	12.5 kPa
Residual Friction Angle	16.2484 degrees
Residual Cohesion	5.625 kPa

Material	IND 01
-----------------	---------------

Peak friction angle	23.4795 degrees
Peak cohesion	8.125 kPa
Residual Friction Angle	23.246 degrees
Residual Cohesion	3.125 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Strength Reduction Factor: 1.7
Maximum Total Displacement: 0.746265 m
Converged: no

Material	DEF 02
Peak friction angle	22.3861 degrees
Peak cohesion	6.47059 kPa
Residual Friction Angle	22.3861 degrees
Residual Cohesion	6.47059 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	22.3861 degrees
Peak cohesion	30.5882 kPa
Residual Friction Angle	22.3861 degrees
Residual Cohesion	30.5882 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	22.3861 degrees
Peak cohesion	24.7059 kPa
Residual Friction Angle	22.3861 degrees
Residual Cohesion	24.7059 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	13.369 degrees
Peak cohesion	14.7059 kPa
Residual Friction Angle	12.7241 degrees
Residual Cohesion	5.29412 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	17.2788 degrees
Peak cohesion	11.7647 kPa
Residual Friction Angle	15.3389 degrees
Residual Cohesion	5.29412 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	22.2364 degrees
Peak cohesion	7.64706 kPa
Residual Friction Angle	22.0126 degrees

Residual Cohesion	2.94118 kPa
-------------------	-------------

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

- Simulação Slide talude seco ruptura circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 01
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
--------------	----------

Analysis Methods Used

	Bishop simplified
GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Half Sine

	Janbu simplified
	Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $m_{\alpha} < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Circular
Search Method:	Auto Refine Search
Divisions along slope:	10
Circles per division:	10
Number of iterations:	10
Divisions to use in next iteration:	50%
Composite Surfaces:	Disabled
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined

Seismic

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SILT ITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unit							
Weight [kN/m ³]	20	20	20	14.5	15	17.7	27
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface	None						
Ru Value	0	0	0	0	0	0	0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.842000
Center:	16.784, 59.201
Radius:	14.600
Left Slip Surface Endpoint:	2.242, 57.894
Right Slip Surface Endpoint:	18.701, 44.727
Resisting Moment:	22716.1 kN-m
Driving Moment:	12332.3 kN-m
Total Slice Area:	90.6013 m ²
Surface Horizontal Width:	16.4583 m
Surface Average Height:	5.5049 m

Method: janbu simplified

FS	1.738450
Center:	16.784, 59.201
Radius:	14.600
Left Slip Surface Endpoint:	2.242, 57.894
Right Slip Surface Endpoint:	18.701, 44.727
Resisting Horizontal Force:	1198.62 kN
Driving Horizontal Force:	689.479 kN
Total Slice Area:	90.6013 m ²
Surface Horizontal Width:	16.4583 m
Surface Average Height:	5.5049 m

Method: spencer

FS	1.822290
Center:	18.026, 60.762
Radius:	16.076
Left Slip Surface Endpoint:	2.208, 57.894
Right Slip Surface Endpoint:	18.723, 44.701
Resisting Moment:	23762.6 kN-m
Driving Moment:	13040 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1170.79 kN
Driving Horizontal Force:	642.481 kN
Total Slice Area:	82.9109 m ²
Surface Horizontal Width:	16.5154 m
Surface Average Height:	5.02022 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.809950
Center:	16.784, 59.201
Radius:	14.600
Left Slip Surface Endpoint:	2.242, 57.894
Right Slip Surface Endpoint:	18.701, 44.727
Resisting Moment:	22320.9 kN-m
Driving Moment:	12332.3 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1201.93 kN
Driving Horizontal Force:	664.065 kN
Total Slice Area:	90.6013 m ²
Surface Horizontal Width:	16.4583 m
Surface Average Height:	5.5049 m

- Simulação Slide talude seco ruptura não circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 01
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
--------------	----------

Analysis Methods Used

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Bishop simplified Half Sine Janbu simplified Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Non-Circular Path Search
Number of Surfaces:	5000
Pseudo-Random Surfaces:	Enabled
Convex Surfaces Only:	Disabled
Segment Length:	Auto Defined
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined
Upper Angle:	Auto Defined
Lower Angle:	Auto Defined

Seismic

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SILT ITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unit							
Weight [kN/m3]	20	20	20	14.5	15	17.7	27
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface	None						
Ru Value	0	0	0	0	0	0	0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.761040
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	37658.1 kN-m
Driving Moment:	21384.1 kN-m
Total Slice Area:	85.5902 m2
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: janbu simplified

FS	1.683580
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Horizontal Force:	1144.01 kN
Driving Horizontal Force:	679.511 kN
Total Slice Area:	85.5902 m2

Surface Horizontal Width: 17.8372 m
 Surface Average Height: 4.79841 m

Method: spencer

FS	1.819570
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	37194 kN-m
Driving Moment:	20441.1 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1160.1 kN
Driving Horizontal Force:	637.571 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.830270
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	37217.8 kN-m
Driving Moment:	20334.6 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1161.44 kN
Driving Horizontal Force:	634.574 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

CENÁRIO 02

-Simulação talude máxima saturação RS2:

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 02
Last saved with Phase2 version:	9.016
Project Title:	Project1

General Settings

Single stage model	
Analysis Type:	Plane Strain
Solver Type:	Gaussian Elimination
Units:	Metric, stress as kPa
Permeability Units:	meters/second
Time Units:	seconds

Analysis Options

Maximum Number of Iterations:	500
Tolerance:	0.01
Number of Load Steps:	Automatic
Convergence Type:	Absolute Energy
Tensile Failure:	Reduces Shear Strength
Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01	

Strength Reduction Settings

Initial Estimate of SRF:	1
Step Size:	Automatic

Tolerance (SRF):	0.1
Limit SSR Search Area:	No
Accelerate SSR Analysis:	Yes
Apply SSR to Mohr-Coulomb Tensile Strength:	Yes
Convergence Parameters:	Automatic

Groundwater Analysis

Method:	Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight:	9.81 kN/m ³

Probability: None

Field Stress

Field stress:	Gravity
Ground surface elevation:	0 m
Unit weight of overburden:	27 kN/m ³
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane):	1
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane):	1
Locked-in horizontal stress (in-plane):	0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane):	0

Mesh

Mesh type: Graded

Element type: 3 Noded triangles

Number of elements: 13132
Number of nodes: 6818

Mesh Quality

- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because they are inverted
- **Note:** Elements can be of poor quality for more than one reason

Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Reset Displacements

Displacements reset after: 1

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas

- External Boundary Area: 5968.768 m²
- External Boundary Perimeter: 387.329 m

1

- Values not available until this stage is viewed in a window

Material Properties

Material: DEF 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m ³
Elastic type	isotropic

Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	11 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	11 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: DEF 03

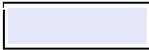
Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	52 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	52 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: DEF 04

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m3

Elastic type	isotropic
Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	42 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	42 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: IND 03

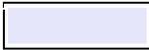
Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	14.5 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	22 degrees
Peak cohesion	25 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	21 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: IND 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force

Unit weight	15 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	25000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27.87 degrees
Peak cohesion	20 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	25 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IND 01

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	17.7 kN/m ³
Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	34.8 degrees
Peak cohesion	13 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	34.5 degrees
Residual Cohesion	5 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: SILTITO

Color	
Initial element loading	field stress only

Elastic type	isotropic
Young's modulus	5e+006 kPa
Poisson's ratio	0.4
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27 degrees
Peak cohesion	173 kPa
Material type	Elastic
Piezo to use	None
Ru value	0

Shear Strength Reduction - Material Properties

Strength Reduction Factor:	0.1
Maximum Total Displacement:	0.111011 m
Converged:	yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	81.8723 degrees
Peak cohesion	110 kPa
Residual Friction Angle	81.8723 degrees
Residual Cohesion	110 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	81.8723 degrees
Peak cohesion	520 kPa
Residual Friction Angle	81.8723 degrees
Residual Cohesion	520 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	81.8723 degrees
Peak cohesion	420 kPa
Residual Friction Angle	81.8723 degrees
Residual Cohesion	420 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	76.0982 degrees
Peak cohesion	250 kPa
Residual Friction Angle	75.3985 degrees
Residual Cohesion	90 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	79.2915 degrees
Peak cohesion	200 kPa
Residual Friction Angle	77.8962 degrees
Residual Cohesion	90 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	81.8124 degrees
Peak cohesion	130 kPa
Residual Friction Angle	81.7215 degrees
Residual Cohesion	50 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Critical Strength Reduction Factor: 0.2
Maximum Total Displacement: 0.111011 m
Converged: yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	74.0591 degrees
Peak cohesion	55 kPa
Residual Friction Angle	74.0591 degrees
Residual Cohesion	55 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	74.0591 degrees
Peak cohesion	260 kPa
Residual Friction Angle	74.0591 degrees
Residual Cohesion	260 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	74.0591 degrees
Peak cohesion	210 kPa
Residual Friction Angle	74.0591 degrees
Residual Cohesion	210 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	63.6638 degrees
Peak cohesion	125 kPa
Residual Friction Angle	62.4797 degrees
Residual Cohesion	45 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	69.2827 degrees
Peak cohesion	100 kPa

Residual Friction Angle	66.7854 degrees
Residual Cohesion	45 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	73.9462 degrees
Peak cohesion	65 kPa
Residual Friction Angle	73.7749 degrees
Residual Cohesion	25 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Strength Reduction Factor: 0.3
Maximum Total Displacement: 0.179662 m
Converged: no

Material	DEF 02
Peak friction angle	66.8076 degrees
Peak cohesion	36.6667 kPa
Residual Friction Angle	66.8076 degrees
Residual Cohesion	36.6667 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	66.8076 degrees
Peak cohesion	173.333 kPa
Residual Friction Angle	66.8076 degrees
Residual Cohesion	173.333 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	66.8076 degrees
Peak cohesion	140 kPa
Residual Friction Angle	66.8076 degrees
Residual Cohesion	140 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	53.4052 degrees
Peak cohesion	83.3333 kPa
Residual Friction Angle	51.9914 degrees
Residual Cohesion	30 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	60.4329 degrees
Peak cohesion	66.6667 kPa
Residual Friction Angle	57.2447 degrees
Residual Cohesion	30 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	66.6529 degrees
Peak cohesion	43.3333 kPa
Residual Friction Angle	66.4186 degrees
Residual Cohesion	16.6667 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

- Simulação Slide talude máxima saturação ruptura circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 02
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
--------------	----------

Analysis Methods Used

Bishop simplified

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Half Sine Janbu simplified Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Circular
Search Method:	Auto Refine Search
Divisions along slope:	10
Circles per division:	10
Number of iterations:	10
Divisions to use in next iteration:	50%
Composite Surfaces:	Disabled
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined

Seismic

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SILT ITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unit							
Weight [kN/m ³]	20	20	20	14.5	15	17.7	27
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface	Water Table	Water Table	Water Table	Water Table	None	Water Table	None
Value	0.5	0.5	1	1		0.5	
Value					0		0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.407460
Center:	15.456, 57.894
Radius:	13.222
Left Slip Surface Endpoint:	2.234, 57.894
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Moment:	15682.5 kN-m
Driving Moment:	11142.5 kN-m
Total Slice Area:	96.495 m ²

Surface Horizontal Width: 16.2194 m
 Surface Average Height: 5.94937 m

Method: janbu simplified

FS	1.380060
Center:	15.291, 57.891
Radius:	13.256
Left Slip Surface Endpoint:	2.035, 57.891
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Horizontal Force:	920.685 kN
Driving Horizontal Force:	667.134 kN
Total Slice Area:	99.5017 m ²
Surface Horizontal Width:	16.4184 m
Surface Average Height:	6.06038 m

Method: spencer

FS	1.380170
Center:	15.593, 57.897
Radius:	13.195
Left Slip Surface Endpoint:	2.398, 57.897
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Moment:	15119.3 kN-m
Driving Moment:	10954.6 kN-m
Resisting Horizontal Force:	878.111 kN
Driving Horizontal Force:	636.232 kN
Total Slice Area:	94.0317 m ²
Surface Horizontal Width:	16.055 m
Surface Average Height:	5.85686 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.399740
Center:	15.571, 57.897
Radius:	13.199
Left Slip Surface Endpoint:	2.372, 57.897
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Moment:	15375.4 kN-m
Driving Moment:	10984.4 kN-m
Resisting Horizontal Force:	891.293 kN
Driving Horizontal Force:	636.754 kN
Total Slice Area:	94.4197 m ²

Surface Horizontal Width: 16.0809 m
Surface Average Height: 5.87154 m

- Simulação Slide talude máxima saturação ruptura não circular

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name: Cenario 02
Slide Modeler Version: 7.017
Project Title: Project1

General Settings

Units of Measurement: Metric Units
Time Units: seconds
Permeability Units: meters/second
Failure Direction: Left to Right
Data Output: Standard
Maximum Material Properties: 100
Maximum Support Properties: 100

Analysis Options

Slices Type: Vertical

Analysis Methods Used

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Bishop simplified
Half Sine
Janbu simplified
Spencer
Number of slices: 50
Tolerance: 0.005

Maximum number of iterations:	50
Check $\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Non-Circular Path Search
Number of Surfaces:	5000
Pseudo-Random Surfaces:	Enabled
Convex Surfaces Only:	Disabled
Segment Length:	Auto Defined
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined
Upper Angle:	Auto Defined
Lower Angle:	Auto Defined

Seismic

Advanced seismic analysis:	No
----------------------------	----

Staged pseudostatic analysis: No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SILT ITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unit							
Weight [kN/m ³]	20	20	20	14.5	15	17.7	27
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface Value	Water Table	Water Table	Water Table	Water Table	None	Water Table	None
Hu Value	0.5	0.5	1	1		0.5	
Ru Value					0		0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.328390
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	28332.7 kN-m
Driving Moment:	21328.5 kN-m
Total Slice Area:	85.5908 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79845 m

Method: janbu simplified

FS	1.296400
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Horizontal Force:	849.182 kN
Driving Horizontal Force:	655.029 kN
Total Slice Area:	85.5908 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79845 m

Method: spencer

FS	1.354920
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	28099.5 kN-m
Driving Moment:	20738.9 kN-m
Resisting Horizontal Force:	858.242 kN
Driving Horizontal Force:	633.428 kN
Total Slice Area:	85.5908 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79845 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.364090
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	28130.8 kN-m
Driving Moment:	20622.4 kN-m
Resisting Horizontal Force:	860.533 kN
Driving Horizontal Force:	630.847 kN
Total Slice Area:	85.5908 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79845 m

CENÁRIO 03

-Simulação talude parcialmente saturado RS2:

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 03
Last saved with Phase2 version:	9.016
Project Title:	Project1

General Settings

Single stage model	
Analysis Type:	Plane Strain
Solver Type:	Gaussian Elimination
Units:	Metric, stress as kPa
Permeability Units:	meters/second
Time Units:	seconds

Analysis Options

Maximum Number of Iterations:	500
Tolerance:	0.01
Number of Load Steps:	Automatic
Convergence Type:	Absolute Energy
Tensile Failure:	Reduces Shear Strength
Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01	

Strength Reduction Settings

Initial Estimate of SRF:	1
Step Size:	Automatic

Tolerance (SRF):	0.1
Limit SSR Search Area:	No
Accelerate SSR Analysis:	Yes
Apply SSR to Mohr-Coulomb Tensile Strength:	Yes
Convergence Parameters:	Automatic

Groundwater Analysis

Method:	Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight:	9.81 kN/m ³

Probability: None

Field Stress

Field stress:	Gravity
Ground surface elevation:	0 m
Unit weight of overburden:	27 kN/m ³
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane):	1
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane):	1
Locked-in horizontal stress (in-plane):	0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane):	0

Mesh

Mesh type: Graded

Element type: 3 Noded triangles

Number of elements: 13132
Number of nodes: 6818

Mesh Quality

- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because they are inverted
- **Note:** Elements can be of poor quality for more than one reason

Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Reset Displacements

Displacements reset after: 1

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas

- External Boundary Area: 5968.768 m²
- External Boundary Perimeter: 387.329 m

1

- Values not available until this stage is viewed in a window

Material Properties

Material: DEF 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m ³
Elastic type	isotropic

Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	11 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	11 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: DEF 03

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	52 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	52 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	0.5

Material: DEF 04

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m3
Elastic type	isotropic

Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	42 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	42 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: IND 03

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	14.5 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	22 degrees
Peak cohesion	25 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	21 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: IND 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	15 kN/m3

Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27.87 degrees
Peak cohesion	20 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	25 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IND 01

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	17.7 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	34.8 degrees
Peak cohesion	13 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	34.5 degrees
Residual Cohesion	5 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	0.5

Material: SILTITO

Color	
Initial element loading	field stress only
Elastic type	isotropic

Young's modulus	5e+006 kPa
Poisson's ratio	0.4
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27 degrees
Peak cohesion	173 kPa
Material type	Elastic
Piezo to use	None
Ru value	0

Shear Strength Reduction - Material Properties

Critical Strength Reduction Factor:	0.4
Maximum Total Displacement:	0.0303239 m
Converged:	yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	60.2624 degrees
Peak cohesion	27.5 kPa
Residual Friction Angle	60.2624 degrees
Residual Cohesion	27.5 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	60.2624 degrees
Peak cohesion	130 kPa
Residual Friction Angle	60.2624 degrees
Residual Cohesion	130 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	60.2624 degrees
Peak cohesion	105 kPa
Residual Friction Angle	60.2624 degrees
Residual Cohesion	105 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	45.2869 degrees
Peak cohesion	62.5 kPa
Residual Friction Angle	43.8207 degrees
Residual Cohesion	22.5 kPa

Material	IND 02
-----------------	---------------

Peak friction angle	52.8952 degrees
Peak cohesion	50 kPa
Residual Friction Angle	49.3769 degrees
Residual Cohesion	22.5 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	60.0785 degrees
Peak cohesion	32.5 kPa
Residual Friction Angle	59.8004 degrees
Residual Cohesion	12.5 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Strength Reduction Factor: 0.5
Maximum Total Displacement: 0.121668 m
Converged: no

Material	DEF 02
Peak friction angle	54.4704 degrees
Peak cohesion	22 kPa
Residual Friction Angle	54.4704 degrees
Residual Cohesion	22 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	54.4704 degrees
Peak cohesion	104 kPa
Residual Friction Angle	54.4704 degrees
Residual Cohesion	104 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	54.4704 degrees
Peak cohesion	84 kPa
Residual Friction Angle	54.4704 degrees
Residual Cohesion	84 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	38.94 degrees
Peak cohesion	50 kPa
Residual Friction Angle	37.5145 degrees
Residual Cohesion	18 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	46.6036 degrees
Peak cohesion	40 kPa
Residual Friction Angle	43.0031 degrees

Residual Cohesion	18 kPa
-------------------	--------

Material	IND 01
Peak friction angle	54.2685 degrees
Peak cohesion	26 kPa
Residual Friction Angle	53.9639 degrees
Residual Cohesion	10 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

- Simulação Slide talude parcialmente saturado ruptura circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 03
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type: Vertical

Analysis Methods Used

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Bishop simplified Half Sine Janbu simplified Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $m\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Circular
Search Method:	Auto Refine Search
Divisions along slope:	10
Circles per division:	10
Number of iterations:	10
Divisions to use in next iteration:	50%
Composite Surfaces:	Disabled
Minimum Elevation:	Not Defined

Minimum Depth: Not Defined
 Minimum Area: Not Defined
 Minimum Weight: Not Defined

Seismic

Advanced seismic analysis: No
 Staged pseudostatic analysis: No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SILT ITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unit							
Weight [kN/m3]	20	20	20	14.5	15	17.7	27
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface	None	Water Table	Water Table	Water Table	None	Water Table	None
Humidity Value		1	1	1		1	
Ru Value	0				0		0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.570500
Center:	15.377, 57.892

Radius:	13.238
Left Slip Surface Endpoint:	2.138, 57.892
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Moment:	17669 kN-m
Driving Moment:	11250.6 kN-m
Total Slice Area:	97.9292 m ²
Surface Horizontal Width:	16.3146 m
Surface Average Height:	6.00257 m

Method: janbu simplified

FS	1.530020
Center:	15.341, 57.892
Radius:	13.246
Left Slip Surface Endpoint:	2.095, 57.892
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Horizontal Force:	1020.07 kN
Driving Horizontal Force:	666.706 kN
Total Slice Area:	98.5833 m ²
Surface Horizontal Width:	16.3578 m
Surface Average Height:	6.02668 m

Method: spencer

FS	1.532130
Center:	15.593, 57.897
Radius:	13.195
Left Slip Surface Endpoint:	2.398, 57.897
Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Moment:	16783.9 kN-m
Driving Moment:	10954.6 kN-m
Resisting Horizontal Force:	980.339 kN
Driving Horizontal Force:	639.855 kN
Total Slice Area:	94.0311 m ²
Surface Horizontal Width:	16.055 m
Surface Average Height:	5.85682 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.558610
Center:	15.341, 57.892
Radius:	13.246
Left Slip Surface Endpoint:	2.095, 57.892

Right Slip Surface Endpoint:	18.453, 45.017
Resisting Moment:	17611.5 kN-m
Driving Moment:	11299.5 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1020.57 kN
Driving Horizontal Force:	654.794 kN
Total Slice Area:	98.5833 m ²
Surface Horizontal Width:	16.3578 m
Surface Average Height:	6.02668 m

- Simulação Slide talude parcialmente saturado ruptura não circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 03
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
--------------	----------

Analysis Methods Used

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Bishop simplified Half Sine Janbu simplified Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Non-Circular Path Search
Number of Surfaces:	5000
Pseudo-Random Surfaces:	Enabled
Convex Surfaces Only:	Disabled
Segment Length:	Auto Defined
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined
Upper Angle:	Auto Defined
Lower Angle:	Auto Defined

Seismic

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SILT ITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unit							
Weight [kN/m ³]	20	20	20	14.5	15	17.7	27
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface	None	Water Table	Water Table	Water Table	None	Water Table	None
Humidity Value		1	1	1		1	
Ru Value	0				0		0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.472310
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	31330.2 kN-m
Driving Moment:	21279.6 kN-m

Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: janbu simplified

FS	1.430940
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Horizontal Force:	937.532 kN
Driving Horizontal Force:	655.185 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: spencer

FS	1.511170
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	31120.1 kN-m
Driving Moment:	20593.4 kN-m
Resisting Horizontal Force:	949.693 kN
Driving Horizontal Force:	628.449 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.517790
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	31087.6 kN-m
Driving Moment:	20482.1 kN-m
Resisting Horizontal Force:	951.902 kN
Driving Horizontal Force:	627.162 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

CENÁRIO 04

-Simulação talude saturação real vista em campo RS2:

Phase2 Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 04
Last saved with Phase2 version:	9.016
Project Title:	Project1

General Settings

Single stage model	
Analysis Type:	Plane Strain
Solver Type:	Gaussian Elimination
Units:	Metric, stress as kPa
Permeability Units:	meters/second
Time Units:	seconds

Analysis Options

Maximum Number of Iterations:	500
Tolerance:	0.01
Number of Load Steps:	Automatic
Convergence Type:	Absolute Energy
Tensile Failure:	Reduces Shear Strength
Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01	

Strength Reduction Settings

Initial Estimate of SRF:	1
Step Size:	Automatic

Tolerance (SRF):	0.1
Limit SSR Search Area:	No
Accelerate SSR Analysis:	Yes
Apply SSR to Mohr-Coulomb Tensile Strength:	Yes
Convergence Parameters:	Automatic

Groundwater Analysis

Method:	Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight:	9.81 kN/m ³

Probability: None

Field Stress

Field stress:	Gravity
Ground surface elevation:	0 m
Unit weight of overburden:	27 kN/m ³
Total stress ratio (horizontal/vertical in-plane):	1
Total stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane):	1
Locked-in horizontal stress (in-plane):	0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane):	0

Mesh

Mesh type: Graded

Element type: 3 Noded triangles

Number of elements: 13132
Number of nodes: 6818

Mesh Quality

- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
- 2 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
- 0 of 13132 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because they are inverted
- **Note:** Elements can be of poor quality for more than one reason

Poor quality elements defined as:

- Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
- Minimum interior angle < 2.0 degrees
- Maximum interior angle > 175.0 degrees

Reset Displacements

Displacements reset after: 1

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas

- External Boundary Area: 5968.768 m²
- External Boundary Perimeter: 387.329 m

1

- Values not available until this stage is viewed in a window

Material Properties

Material: DEF 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m ³
Elastic type	isotropic

Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	11 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	11 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: DEF 03

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	60000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	52 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	52 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: DEF 04

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	20 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	60000 kPa

Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	42 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	42 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: IND 03

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	14.5 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	22 degrees
Peak cohesion	25 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	21 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: IND 02

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	15 kN/m3
Elastic type	isotropic

Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27.87 degrees
Peak cohesion	20 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	25 degrees
Residual Cohesion	9 kPa
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IND 01

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	17.7 kN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	20000 kPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	34.8 degrees
Peak cohesion	13 kPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	34.5 degrees
Residual Cohesion	5 kPa
Piezo to use	1
Hu Type	Custom
Hu value	1

Material: SILTITO

Color	
Initial element loading	field stress only
Elastic type	isotropic
Young's modulus	5e+006 kPa

Poisson's ratio	0.4
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Is Jointed	No
Peak tensile strength	0 kPa
Residual tensile strength	0 kPa
Peak friction angle	27 degrees
Peak cohesion	173 kPa
Material type	Elastic
Piezo to use	None
Ru value	0

Shear Strength Reduction - Material Properties

Strength Reduction Factor:	0.4
Maximum Total Displacement:	0.0301692 m
Converged:	yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	60.2624 degrees
Peak cohesion	27.5 kPa
Residual Friction Angle	60.2624 degrees
Residual Cohesion	27.5 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	60.2624 degrees
Peak cohesion	130 kPa
Residual Friction Angle	60.2624 degrees
Residual Cohesion	130 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	60.2624 degrees
Peak cohesion	105 kPa
Residual Friction Angle	60.2624 degrees
Residual Cohesion	105 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	45.2869 degrees
Peak cohesion	62.5 kPa
Residual Friction Angle	43.8207 degrees
Residual Cohesion	22.5 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	52.8952 degrees

Peak cohesion	50 kPa
Residual Friction Angle	49.3769 degrees
Residual Cohesion	22.5 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	60.0785 degrees
Peak cohesion	32.5 kPa
Residual Friction Angle	59.8004 degrees
Residual Cohesion	12.5 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Critical Strength Reduction Factor: 0.6
Maximum Total Displacement: 0.0302839 m
Converged: yes

Material	DEF 02
Peak friction angle	49.4071 degrees
Peak cohesion	18.3333 kPa
Residual Friction Angle	49.4071 degrees
Residual Cohesion	18.3333 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	49.4071 degrees
Peak cohesion	86.6667 kPa
Residual Friction Angle	49.4071 degrees
Residual Cohesion	86.6667 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	49.4071 degrees
Peak cohesion	70 kPa
Residual Friction Angle	49.4071 degrees
Residual Cohesion	70 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	33.9554 degrees
Peak cohesion	41.6667 kPa
Residual Friction Angle	32.61 degrees
Residual Cohesion	15 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	41.3909 degrees
Peak cohesion	33.3333 kPa
Residual Friction Angle	37.8536 degrees
Residual Cohesion	15 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	49.1964 degrees
Peak cohesion	21.6667 kPa
Residual Friction Angle	48.8789 degrees
Residual Cohesion	8.33333 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

Strength Reduction Factor: 0.7
Maximum Total Displacement: 0.114594 m
Converged: no

Material	DEF 02
Peak friction angle	45.0085 degrees
Peak cohesion	15.7143 kPa
Residual Friction Angle	45.0085 degrees
Residual Cohesion	15.7143 kPa

Material	DEF 03
Peak friction angle	45.0085 degrees
Peak cohesion	74.2857 kPa
Residual Friction Angle	45.0085 degrees
Residual Cohesion	74.2857 kPa

Material	DEF 04
Peak friction angle	45.0085 degrees
Peak cohesion	60 kPa
Residual Friction Angle	45.0085 degrees
Residual Cohesion	60 kPa

Material	IND 03
Peak friction angle	29.9927 degrees
Peak cohesion	35.7143 kPa
Residual Friction Angle	28.7394 degrees
Residual Cohesion	12.8571 kPa

Material	IND 02
Peak friction angle	37.0686 degrees
Peak cohesion	28.5714 kPa
Residual Friction Angle	33.6697 degrees
Residual Cohesion	12.8571 kPa

Material	IND 01
Peak friction angle	44.7954 degrees

Peak cohesion	18.5714 kPa
Residual Friction Angle	44.4747 degrees
Residual Cohesion	7.14286 kPa

Material	SILTITO
Elastic material - no strength reduction	

- Simulação Slide talude saturação real vista em campo ruptura circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 04
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
--------------	----------

Analysis Methods Used

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Bishop simplified Half Sine Janbu simplified Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $m\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Circular
Search Method:	Auto Refine Search
Divisions along slope:	10
Circles per division:	10
Number of iterations:	10
Divisions to use in next iteration:	50%
Composite Surfaces:	Disabled
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined

Seismic

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SIL TITO
Color							
Strength Type	M Mohr-Coulomb	M Mohr-Coulomb	M Mohr-Coulomb	M Mohr-Coulomb	M Mohr-Coulomb	M Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m ³]				14 .5		17 .7	
Saturated Unit Weight [kN/m ³]				20		20	
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27 .87	34 .8	27
Water Surface Value	No Hu	No Hu	Water Table 1	Water Table 1	No Hu	Water Table 1	No Hu
Ru Value	0	0			0		0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.666170
Center:	17.221, 59.184
Radius:	14.556
Left Slip Surface Endpoint:	2.721, 57.904

Right Slip Surface Endpoint:	18.719, 44.705
Resisting Moment:	19666.3 kN-m
Driving Moment:	11803.3 kN-m
Total Slice Area:	84.0873 m ²
Surface Horizontal Width:	15.9982 m
Surface Average Height:	5.25604 m

Method: janbu simplified

FS	1.607650
Center:	17.221, 59.184
Radius:	14.556
Left Slip Surface Endpoint:	2.721, 57.904
Right Slip Surface Endpoint:	18.719, 44.705
Resisting Horizontal Force:	1025.27 kN
Driving Horizontal Force:	637.747 kN
Total Slice Area:	84.0873 m ²
Surface Horizontal Width:	15.9982 m
Surface Average Height:	5.25604 m

Method: spencer

FS	1.631410
Center:	16.138, 57.906
Radius:	13.290
Left Slip Surface Endpoint:	2.848, 57.906
Right Slip Surface Endpoint:	18.599, 44.846
Resisting Moment:	17704 kN-m
Driving Moment:	10851.9 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1030.5 kN
Driving Horizontal Force:	631.658 kN
Total Slice Area:	89.0639 m ²
Surface Horizontal Width:	15.7513 m
Surface Average Height:	5.65439 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.650680
Center:	17.221, 59.184
Radius:	14.556
Left Slip Surface Endpoint:	2.721, 57.904
Right Slip Surface Endpoint:	18.719, 44.705
Resisting Moment:	19483.4 kN-m

Driving Moment:	11803.3 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1027.6 kN
Driving Horizontal Force:	622.532 kN
Total Slice Area:	84.0873 m ²
Surface Horizontal Width:	15.9982 m
Surface Average Height:	5.25604 m

- Simulação Slide talude saturação real vista em campo ruptura não circular:

Slide Analysis Information

Project1

Project Summary

File Name:	Cenario 04
Slide Modeler Version:	7.017
Project Title:	Project1

General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	seconds
Permeability Units:	meters/second
Failure Direction:	Left to Right
Data Output:	Standard
Maximum Material Properties:	100
Maximum Support Properties:	100

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
--------------	----------

Analysis Methods Used

	Bishop simplified
GLE/Morgenstern-Price with interslice force function:	Half Sine
	Janbu simplified

	Spencer
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	50
Check $m\alpha < 0.2$:	Yes
Initial trial value of FS:	3
Steffensen Iteration:	Yes

Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m ³]:	9.81
Use negative pore pressure cutoff:	Yes
Maximum negative pore pressure [kPa]:	0
Advanced Groundwater Method:	None

Random Numbers

Pseudo-random Seed:	10116
Random Number Generation Method:	Park and Miller v.3

Surface Options

Surface Type:	Non-Circular Path Search
Number of Surfaces:	5000
Pseudo-Random Surfaces:	Enabled
Convex Surfaces Only:	Disabled
Segment Length:	Auto Defined
Minimum Elevation:	Not Defined
Minimum Depth:	Not Defined
Minimum Area:	Not Defined
Minimum Weight:	Not Defined
Upper Angle:	Auto Defined
Lower Angle:	Auto Defined

Seismic

Advanced seismic analysis: No
 Staged pseudostatic analysis: No

Material Properties

Property	DE F 02	DE F 03	DE F 04	IN D 03	IN D 02	IN D 01	SIL TITO
Color							
Strength Type	Mohr-Coulomb						
Unsaturated Unit Weight [kN/m ³]				14.5		17.7	
Saturated Unit Weight [kN/m ³]				20		20	
Cohesion [kPa]	11	52	42	25	20	13	173
Friction Angle [deg]	35	35	35	22	27.87	34.8	27
Water Surface Value	None	None	Water Table	Water Table	None	Water Table	None
Hu Value			1	1		1	
Ru Value	0	0			0		0

Global Minimums

Method: bishop simplified

FS	1.602740
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	34243.8 kN-m
Driving Moment:	21365.8 kN-m
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m

Surface Average Height: 4.79841 m

Method: janbu simplified

FS	1.548120
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Horizontal Force:	1028.92 kN
Driving Horizontal Force:	664.627 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: spencer

FS	1.653440
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	33994.5 kN-m
Driving Moment:	20559.9 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1044.02 kN
Driving Horizontal Force:	631.424 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m

Method: gle/morgenstern-price

FS	1.660560
Axis Location:	23.113, 69.085
Left Slip Surface Endpoint:	0.950, 57.870
Right Slip Surface Endpoint:	18.787, 44.626
Resisting Moment:	33987.3 kN-m
Driving Moment:	20467.3 kN-m
Resisting Horizontal Force:	1045.01 kN
Driving Horizontal Force:	629.312 kN
Total Slice Area:	85.5902 m ²
Surface Horizontal Width:	17.8372 m
Surface Average Height:	4.79841 m