



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**TERRAS CAÍDAS: CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM GEOTÉCNICA DO
FENÔMENO EROSIVO AMAZÔNICO**

ELIAS SANTOS SOUZA

Manaus
2019

ELIAS SANTOS SOUZA

**TERRAS CAÍDAS: CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM GEOTÉCNICA DO
FENÔMENO EROSIVO AMAZÔNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Professor *DSc.* Nilton de Souza Campelo

Manaus
2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729t Souza, Elias Santos
Terras Caídas : Caracterização e Modelagem Geotécnica do fenômeno erosivo Amazônico. / Elias Santos Souza. 2019
185 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Terras Caídas. 2. Modelagem Geotécnica. 3. Permeabilidade.
4. Resistência ao Cisalhamento. 5. Estabilidade de Taludes. I.
Campelo, Nilton de Souza II. Universidade Federal do Amazonas
III. Título



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 002/2019

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

DATA DO EXAME: 29/03/2019

DISCENTE: Elias Santos Souza

ORIENTADOR: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo (Presidente)

Prof. Dr. René Levy Aguiar (Membro Externo)

Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima (Membro Externo)

TÍTULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: **TERRAS CAÍDAS: CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM GEOTÉCNICA DO FENÔMENO EROSIVO AMAZÔNICO**

LOCAL: Sala Integrada ao Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia.

HORA DE INÍCIO: 14h00

De acordo com o Regimento Interno do Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 65 minutos arguido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

Aprovação por unanimidade de sua dissertação. O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.

() Reprovação de sua Dissertação. O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

Observações O CANDIDATO DEVERÁ SEGUIR ÀS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Manaus, 29 de março de 2019

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo (Presidente)

Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima (Membro Externo)

Prof. Dr. René Levy Aguiar (Membro Externo)

Elias Santos Souza (Discente)

Dedico esta obra à minha amada esposa Luana, por todo amor, carinho e apoio que me proporciona diariamente e também pelas suas inesgotáveis paciência e compreensão durante o período que estive dedicado à realização desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter proporcionado à minha pessoa alcançar este nível singular na jornada do conhecimento, agora na pós-graduação.

Ao meu orientador, Doutor Nilton de Souza Campelo, por todos os ensinamentos, pela agradável amizade e exemplos pessoais passados ao longo destes nove anos de convivência na Universidade, primeiro como seu aluno de graduação, depois monitor em Projeto Geotécnico de Fundações e orientado de pós-graduação. Ao estimado professor apenas digo as sábias palavras de Bias: “*Omnia mea mecum porto*”. Obrigado, e tudo aquilo que o senhor me ensinou, levo comigo!

À minha esposa Luana, que por muitas vezes me acompanhou nesta jornada científica, além do amor, carinho e conselhos sempre dispensados comigo.

À minha mãe Dulce, meu pai Antônio, minha irmã Laís, minha avó Tereza e meus tios Alfredo e Lauro pelo carinho, amor, sabedoria e honestidade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, Elias Simão Assayag pelos diversos títulos emprestados e o equipamento cedido (bancada de permeabilidade) que em muito auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, aos professores Atlas Augusto Bacellar e Wagner Queiroz Silva, pelas boas ideias e a amizade sincera e, finalmente, por servir juntamente com demais professores deste departamento, como grandes exemplos intelectuais e profissionais.

Ao laboratorista, o Eng. Antônio Reinaldo Mesquita, apelidado gentilmente no âmbito do Laboratório de Pavimentação (LabPav/UFAM) de “Capitão” e “Batalha”, sem o qual os ensaios laboratoriais das diversas gerações que por lá passaram dificilmente seriam feitos, ou, corretamente interpretados. Muito mais que um técnico, mas um profundo conhecedor da teoria e da prática aplicada aos solos.

Aos membros desta banca, professor Humberto Lima (Geociências/UFAM) pela assistência nas etapas de análises geológicas, química e mineralógica, além das visitas técnicas deste trabalho e ao estimado professor René Levy Aguiar (EST/UEA) pelas diversas contribuições na redação e no melhor desenvolvimento deste trabalho.

Ao senhor Evandro Moreira, *in memoriam*, pelos trabalhos de coletas das amostras no campo de estudo, que dificilmente seriam feitos sem sua incrível força.

Ao engenheiro de materiais Mitsuo Takeno (CMDI/UFAM) na interpretação sistemática dos ensaios de Difração de Raios-X (*DRX*) e Fluorescência de Raios-X (*FRX*) e ao geólogo Davi Paulo (PPGGEO/UFAM) pela confecção das imagens de Geoprocessamento deste trabalho.

Aos laboratórios e seus servidores desta Instituição, em especial ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC/UFAM) pelas análises das amostras de solo por *FRX* e ao Laboratório de Materiais (LabMat/UFAM) pelas análises das amostras por *DRX* e o Laboratório de Mecânica dos Solos pelos ensaios de cisalhamento direto.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, meu local de labor, pelas liberações parciais e integrais a fim de que eu pudesse cursar e realizar as atividades obrigatórias deste programa de pós-graduação. Neste, faço o adendo de agradecer meus estimados amigos e amigas do IFAM-Reitoria, que por muitas vezes “seguraram as broncas” quando eu não pude, sendo eles, engenheiros: Luiz Gabriel, Péricles Veiga, Gabriel Alencar, Gabriel Pereira, Arthur Vinícius, Sérgio Martins, Hellington Sousa, Henrique Castelo, Andrei Porfiro, Arnilson Damasceno, Adriano Carvalho e Yan Nogueira e elas, engenheira Cynthia Pinto e arquiteta Jeanni Nunes. Essa vitória também pertence a vocês, pois sem sua ajuda, ela não existiria.

Aos meus bons amigos que nessa batalha entraram comigo e graças à amizade, fortes nos mantemos, Eng. Ariel Praia e Eng^a. Fernanda Caroline. Além destas amigas, aquelas que vieram com ingresso do programa, em que destaco meu grande amigo, Eng. Marcos Baia, que em muitas ocasiões estivemos juntos e nos ajudamos, seja tirando dúvidas e realizando experimentos, seja num momento de descontração (a famosa pausa para o “cafezinho”).

E finalmente, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na pessoa do caríssimo professor *DSc.* Raimundo Pereira de Vasconcelos, com quem pude estudar grandes lições de Engenharia Estrutural (da Teoria Hiperestática à Dinâmica), da graduação até a pós, além das oportunidades de monitoria que ele gentilmente me ofereceu durante esse grande período.

“A sabedoria vem das mãos”.

Milton Vargas (1914-2011).

“Apresentei minhas teorias e fiz meus experimentos com o propósito de estabelecer uma ajuda para formar uma opinião correta e percebi, com horror, que eles ainda são considerados pela maioria como substitutos do bom senso e da experiência”.

Karl Terzaghi (1883-1963).

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo central, a caracterização e modelagem geotécnica de taludes em margem de rios no estado do Amazonas, acometidos pelo notável fenômeno das terras caídas. Para realização desta, utilizar-se-á de vasta teoria desenvolvida na Mecânica dos Solos para completa caracterização identificação dos solos que compõem os maciços afetados e, *a posteriori*, conhecimento da permeabilidade das camadas, tensões geostáticas a que os maciços estão submetidos, a resistência ao cisalhamento e, finalmente, a estabilidade de taludes em modelos em miniatura (recriação do fenômeno em escala). O campo de estudo será uma localidade próxima à cidade de Manaus (aproximadamente à 7km), onde o fenômeno tem se desenvolvido de maneira gradual e interessante à pesquisa. Ao final desta pesquisa, com auxílio das imagens por satélite, observou-se que o fenômeno está em franco desenvolvimento, modificando a cada novo ciclo de cheia/vazante a paisagem. Por meio dos ensaios de caracterização física, química e mecânica, que as camadas de solos estudados possuem classificação de solos siltsos e arenosos e com baixa quantidade de argila, sendo esta bastante ativa. Em termos de resistência, seja à compressão, seja ao cisalhamento, os solos de base possuem baixa capacidade de suporte, diferentemente dos solos intermediários e de topo. Por intermédio da modelagem computacional, registrou-se que além das variáveis da composição química e mineral, a disposição, a permeabilidade e capacidade de resistir ao corte, o regime fluvial (cheia/vazante) é fator determinante ao equilíbrio dos taludes que margeiam os rios de águas barrentas.

Palavras-chave: Terras Caídas; Modelagem Geotécnica; Permeabilidade; Resistência ao Cisalhamento; Estabilidade de Taludes.

ABSTRACT

The main objective of this research is the characterization and geotechnical modeling of embankments in river banks in the state of Amazonas, affected by the remarkable phenomenon of fallen lands. To accomplish this, we will use a vast theory developed in Soil Mechanics to fully characterize the identification of the soils that make up the affected massifs and, posteriori, knowledge of the permeability of the layers, geostatic stresses to which the masses are subjected, the resistance to shear and finally the slope stability in miniature models (recreation of the phenomenon in scale). The field of study will be a locality close to the city of Manaus (approximately 7km), where the phenomenon has developed in a gradual and interesting way to the research. At the end of this research, with the aid of satellite images, it was observed that the phenomenon is in full development, modifying with each new cycle of flood/ebb the landscape. By means of the physical, chemical and mechanical characterization tests, the layers of soils studied are classified as silty and sandy soils with a low amount of clay, which is very active. In terms of resistance, either to compression or to shear, the base soils have low bearing capacity, unlike intermediate and top soils. Through the computational modeling, it was recorded that besides the variables of chemical and mineral composition, the arrangement, permeability and ability to resist cutting, the fluvial regime (flood/ebb) is a determining factor for the balance of slopes bordering rivers of muddy water.

Keywords: Fall lands, geotechnical modeling, permeability, shear strength and slope stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Moradores deixam suas casas, enquanto as terras caídas se aproximam.	28
Figura 2: Exemplo de escorregamento, no Careiro/AM.	29
Figura 3: Perfil ilustrativo do escorregamento na vazante.....	29
Figura 4: Exemplo de desmoronamento.	30
Figura 5: Esquemático do desmoronamento, durante a ocorrência da cheia.	30
Figura 6: Exemplo do movimento abrupto e randômico do desabamento.	31
Figura 7: Esquemático do desabamento.	31
Figura 8: Simulação de talude exposto à água de um corpo hídrico.	34
Figura 9: Talude com nível d'água variável (NA_1 e NA_2). Analogia teórica do fenômeno das terras caídas.	34
Figura 10: Constituição do solo a partir da rocha-mãe. Processo de intemperismo simplificado.....	38
Figura 11: Erosão fluvial.....	40
Figura 12: Formas de transporte de sedimentos.....	41
Figura 13: Classificação Unificada por A. Casagrande.	44
Figura 14: Classificação AASHO.....	45
Figura 15: As fases de um solo.	46
Figura 16: Modelo simplificado de análise do gradiente hidráulico, em direções horizontal e vertical.	49
Figura 17: Redes de fluxo numa barragem com apenas 1 (um) tipo de solo.	50
Figura 18: Redes de fluxo numa barragem com 2 (dois) tipos de solos e sistema de leito drenantes.....	51
Figura 19: Tensões efetivas numa coluna de solo	52
Figura 20: Tensões num plano horizontal.	52
Figura 21: Tensões geostáticas (neutras e efetivas) num solo.	53
Figura 22: Experimento das Tensões Efetivas.	54

Figura 23: Tensões principais num elemento de solo.	55
Figura 24: Critérios de ruptura dos solos	57
Figura 25: Diagramas de estados últimos de tensões de solos (a) não-coesivos e (b) coesivos.	58
Figura 26: Representação gráfica da envoltória de resistência ao cisalhamento, por Mohr e Coulomb.	58
Figura 27: Escoamento não-permanente um trecho de rio.	60
Figura 28: Distribuição vertical e horizontal da velocidade numa seção transversal genérica de um rio.	61
Figura 29: Distribuição de velocidades (por isolinhas) na seção do rio Solimões em Manacapuru/AM.	61
Figura 30: Diagrama de pressão hidrostática.	62
Figura 31: Diagrama simplificado de tensões tangenciais num trecho de rio.	62
Figura 32: Distribuição transversal de tensões tangenciais numa seção genérica de rio.	63
Figura 65: Bancada de Ensaios de Permeabilidade.	68
Figura 33: Área de estudo (inscrita ao retângulo).	70
Figura 34: Aproximação da imagem da área de estudo.	71
Figura 35: Perfil esquemático (genérico) da Bacia Amazônica.	72
Figura 36: Margem afetada pelo fenômeno. Conforme notícia, a mesma sofreu o desmoronamento na noite anterior à visita técnica.	73
Figura 37: Observação do fenômeno e das variações de camadas.	74
Figura 38: Desmoronamento recente (cont.).....	74
Figura 39: Estratificação em iminente desabamento (circulada em vermelho).	75
Figura 40: Estratificação finamente distribuída.....	75
Figura 41: Variação de camadas e umidades ao longo da margem.	76
Figura 42: Reaparecimento das camadas distribuídas de modo organizado e desmoronamento em blocos	76
Figura 43: Variação do horizonte estratigráfico	77
Figura 44: Outro possível talude representativo.....	77
Figura 45: Imagem das camadas que serão modeladas na reconstrução do fenômeno em laboratório	78

Figura 46: Ponto de interesse da coleta, entrada da vila de pescadores no Careiro da Várzea-AM, nas coordenadas 3°07'37,10" S e 59°53'2,40" W.....	80
Figura 47: Entrada da vila de pescadores, onde se observa com abundância depósitos do solo denominado "Areia" na pesquisa.....	80
Figura 48: Blocos fruto de desmoronamento dos solos "Mosqueado" e "Areia".....	81
Figura 49: Observação do desmoronamento pelo topo do maciço.	82
Figura 50: Descida num bloco desmoronado.....	83
Figura 51: Visão do bloco desmoronado por dentro.....	84
Figura 52: Ocorrência do desabamento.....	84
Figura 53: Camadas do maciço prestes a desabar.....	85
Figura 54: Ponto de coleta dos solos "Mosqueado" e "Cinza", tidos como mais representativos, nas coordenadas 3°07'42,5" S e 59°53'11,2" W.....	86
Figura 55: Margem com desmoronamento em blocos.....	86
Figura 56: Margem em processo simultâneo de desmoronamento e desabamento em destaque.....	87
Figura 57: Observação do maciço representativo.....	87
Figura 58: Ponto de coleta do solo "Areia".....	88
Figura 59: Coleta de amostras indeformadas em tubos de 75mm e 100mm na razão de 1 para 2 (d/h).....	88
Figura 60: Abertura da cava para coleta do solo "Cinza".	88
Figura 61: Amostra do solo "Areia".....	89
Figura 62: Amostra "mosqueado".....	89
Figura 63: Amostras coletadas pela equipe de sondagem à percussão.....	90
Figura 64: Equipe de sondagem à percussão para investigação da disposição e resistência dos solos componentes do maciço.	90
Figura 66: Perfil de elevação do terreno entre o ponto de sondagem (a) e o ponto de coleta (b).	92
Figura 67: Imagem de satélite de dezembro de 1969, da área de pesquisa.....	97
Figura 68: Imagem de satélite de outubro de 2009.....	97
Figura 69: Imagem de satélite de outubro de 2011.....	98
Figura 70: Imagem de satélite de outubro de 2013.....	98
Figura 71: Imagem de satélite de outubro de 2016.....	99
Figura 72: Imagem de satélite de outubro de 2017.....	99

Figura 73: Imagem por satélite em alta resolução do local de pesquisa (coletas e sondagem).	101
Figura 74: Mapa geomorfológico da área de estudo.	102
Figura 75: Mapa pedológico da área de estudo.	103
Figura 76: Perfil pedológico do maciço-padrão para análises e simulações.	104
Figura 77: Corpo de prova do solo "mosqueado" após ensaio de compressão simples não confinada.	118
Figura 78: Corpo de prova do solo "cinza" após ensaio de compressão simples não confinada.	118
Figura 79: Corpo de prova do solo "areia" após ensaio de compressão simples não confinada.	119
Figura 80: Modelo em escala reduzida montado.	130
Figura 81: Modelo montado em vista aproximada de suas camadas.	130
Figura 82: Modelo pré-ensaio, com fitas adesivas na cor verde para delimitar a forma antes da remoção da placa permeável.	132
Figura 83: Modelo com ensaio em andamento	132
Figura 84: Início da fissuração (trincas destacadas) da camada de solo "mosqueado" com a erosão da base	133
Figura 85: Desmoronamento de uma parte do maciço	133
Figura 86: Desmoronamento de mais uma parte da margem do maciço	134
Figura 87: Maciço após o desmoronamento de parte da camada.	134
Figura 88: Início da drenagem do sistema, para avaliação do comportamento do maciço após a redução do nível de água.	135
Figura 89: Vista superior do experimento, após a drenagem e início das fissuras na superfície, a exemplo da Figura 49	135
Figura 90: Fissuras de tração no topo do maciço.	136
Figura 91: Movimento de escorregamento de parte do maciço.	136
Figura 92: Movimento de escorregamento	137
Figura 93: Modelo inicial, como delimitações antes da remoção da placa permeável.	138
Figura 94: Remoção da placa permeável do modelo e início da erosão da camada arenosa.	138

Figura 95: Estabilização da erosão da camada arenosa e início da drenagem da água do sistema.	139
Figura 96: Aumento da erosão da camada de areia, deixando a camada de solo "mosqueado" em balanço.....	139
Figura 97: Desabamento abrupto da camada de solo "mosqueado", tal como o perfil esquemático apresentado na figura 7.	140
Figura 98: Situação do maciço após o desabamento.....	140
Figura 99: Vista superior do maciço, formação da cunha de deslizamento e drenagem até o centro da camada de solo "cinza".	141
Figura 100: Vista superior do maciço e do desabamento abaixo.	141
Figura 101: Vista lateral do maciço após o desabamento	142
Figura 102: Modelo computacional tridimensional do maciço-padrão para avaliação de deslizamento.	145
Figura 103: 1ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no topo (cota 32,05m)	147
Figura 104: 2ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no topo da camada de solo "mosqueado" (cota 30,05m).....	147
Figura 105: 3ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no centro da camada de solo "mosqueado" (cota 26,05m).....	148
Figura 106: 4ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no topo da camada de solo "areia" (cota 22,05m).....	148
Figura 107: 5ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no centro da camada de solo "areia" (cota 20,05m).....	149
Figura 108: 6ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. na cota 19,05m, que em aproximação representa a vazante média no local de estudo	149
Figura 109: Talude-padrão, com nível de máximo (32m), no tempo igual a 0 mês, com visualização da direção da poropressão (setas).	153
Figura 110: Talude-padrão, com nível de água de 32m, no tempo igual a 0 mês, sendo o FS=1,28, menor que 1,50 (coeficiente aceitável).	154
Figura 111: Talude-padrão, no tempo de 1 mês (cota 28m).	154
Figura 112: Talude-padrão, no tempo igual a 1 mês (cota 28m), com FS=1,018<1,50.	155

Figura 113: Talude-padrão, no tempo igual a 2 meses (cota 24m).....	155
Figura 114: Talude-padrão, no tempo igual a 2 meses (cota 24m), com FS=0,944<1,50.....	156
Figura 115: Talude-padrão, no tempo igual a 3 meses (cota 20m).....	156
Figura 116: Talude-padrão, no tempo igual a 3 meses (cota 20m), com FS=0,930<1,50.....	157
Figura 117: Talude-padrão, no tempo igual a 4 meses (cota 16m).....	157
Figura 118: Talude-padrão, no tempo igual a 4 meses (cota 16m), com FS=0,948<1,50.....	158

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distâncias observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (1969 a 2018).	93
Gráfico 2: Distâncias observadas entre o ponto de sondagem e sua respectiva margem, no tempo (1969 a 2018).	93
Gráfico 3: Distância observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (apenas nos meses de junho, julho e agosto).	94
Gráfico 4: Distância observadas entre o ponto de sondagem e sua respectiva margem, no tempo (apenas nos meses de junho, julho e agosto). Com alguns destaques sobre os decaimentos.	95
Gráfico 5: Distância observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (apenas no mês de outubro).	96
Gráfico 6: Distância observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (apenas no mês de outubro).	96
Gráfico 7: Curvas granulométricas dos solos em estudo.	106
Gráfico 8: Curvas granulométricas em especial atenção à partição fina.	108
Gráfico 9: Permeabilidade dos Solos.	114
Gráfico 10: Compressão simples de amostras de solos.	115
Gráfico 11: Envoltória de Tensões para Resistência à Compressão Simples.	117
Gráfico 12: Resistência ao Cisalhamento.	123
Gráfico 13: Análise mineralógica do solo "Mosqueado", via DRX.	125
Gráfico 14: Compostos químicos presentes no solo "Mosqueado", via ensaio de FRX.	125
Gráfico 15: Análise mineralógica do solo "Areia", via DRX.	126
Gráfico 16: Compostos químicos presentes no solo "Areia", via ensaio de FRX. ...	126
Gráfico 17: Análise mineralógica do solo "Cinza", via DRX.	127
Gráfico 18: Compostos químicos presentes no solo "Cinza", via ensaio de FRX. .	127
Gráfico 19: Nível de Água e Fator de Segurança do maciço-padrão.	150

Gráfico 20: Superfícies de ruptura localizadas no maciço-padrão, com dados do nível de água aplicados nas simulações.....	151
Gráfico 21: Fator de segurança em função do nível do rio durante a vazante conforme as modelagens computacionais.	159
Gráfico 22: Fator de Segurança em função dos dias de vazante.....	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principal Causes of Landslides.....	26
Tabela 2: Fatores Deflagradores dos Movimentos de Massa.....	37
Tabela 3: Típicos coeficientes de permeabilidade.....	49
Tabela 4: Típicos coeficientes de permeabilidade.....	49
Tabela 5: Propriedades Físicas das amostras indeformadas de solos.....	105
Tabela 6: Resultados dos Limites de Consistência.....	109
Tabela 7: Classificação de Solos via SUCS e AASHO, com defloculante.....	110
Tabela 8: Classificação de Solos via SUCS e AASHO, sem defloculante.....	110
Tabela 9: Solos em estudo em relação as informações já conhecidas, via classificação.....	111
Tabela 10: Permeabilidade dos Solos.....	113
Tabela 11: Vazões exemplificativas.....	114
Tabela 12: Picos de resistência à compressão simples.....	116
Tabela 13: Resumo da Resistência ao Cisalhamento dos solos dos maciços.....	120
Tabela 14: Dados para construção do modelo em escala reduzida.....	129

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.1. Notas Propedêuticas.....	21
1.2. Objetivo Geral.....	25
1.3. Objetivos Específicos	25
1.4. Da estruturação da dissertação	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – AS TERRAS CAÍDAS	26
2.1. Primeiras palavras: Terras Caídas em <i>lato e stricto sensu</i>.....	26
2.2. O processo geotécnico/geológico (as fases) das Terras Caídas.....	28
2.3. A problemática das Terras Caídas – uma descrição mecânica aproximada	32
2.4. Conceitos geológicos aplicáveis	35
2.4.1 Intemperismo	36
2.4.2 Erosão	38
2.4.3 Transporte	41
2.4.4 Depósito	42
2.5. Fatores intrínsecos (geotécnicos) ao fenômeno.....	42
2.5.1 Tipos de solos.....	43
2.5.2 Índices Físicos	45
2.5.3 Permeabilidade, Percolação e Redes de Fluxo	48

2.5.4	As tensões geostáticas (totais, efetivas e neutras).....	51
2.5.5	Resistência ao cisalhamento	54
2.6.	Fatores extrínsecos ao fenômeno	59
2.6.1	As características fluviais do rio de ocorrência	59
2.6.2	O Clima na região de estudo	63
3.	MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS APLICÁVEIS	65
3.1.	Das investigações <i>in loco</i> e da coleta	65
3.2.	Dos materiais (caracterização, classificação, preparo e ensaio).....	65
3.3.	Ensaio aplicáveis à estrutura formada.....	66
3.4.	Construção e teste de modelo em escala reduzida do fenômeno	67
3.5.	Modelagem Computacional (Aplicação do <i>softwares GEO5</i> ® e <i>Geostudio</i> ®)	68
3.6.	Outras normas aplicáveis.....	69
4.	DESCRIÇÃO DO LOCAL DA PESQUISA <i>IN SITU</i>	70
4.1.	Da descrição geral	70
4.2.	Da descrição específica.....	73
3.2.1	Visita 1 – 03.11.2017	73
3.2.2	Visita 2 – 05.10.2018	79
3.2.3	Visita 3 – 26.11.2018	85
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
5.1.	Da investigação <i>in loco</i>	91
5.2.	Da avaliação por imagens de satélite (<i>Google Earth</i> ®)	92
5.3.	Da avaliação geológica (geomorfologia e geopedologia)	100

5.4. Dos materiais (caracterização física e mecânica)	104
5.4.1 Condições iniciais e Índices Físicos	104
5.4.2 Análise Granulométrica	106
5.4.3 Limites de Consistência	109
5.4.4 Classificação de Solos.....	110
5.4.5 Permeabilidade dos Solos	113
5.4.6 Resistência à Compressão Simples	115
5.4.7 Resistência ao Cisalhamento	119
5.5. Da análise mineralógica e química (FRX e DRX)	124
5.6. Do modelo em escala reduzida	129
5.7. Dos modelos computacionais	143
5.7.1 GEO5®.....	144
5.7.2 Geostudio®.....	152
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
6.1. Conclusões sobre a pesquisa.....	162
6.2. Sugestões para pesquisas futuras	165
7. REFERÊNCIAS	167
ANEXO A – RELATÓRIO DE SONDAGEM	176
ANEXO B – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	177
ANEXO C – ENVOLTÓRIAS DE TENSÕES (VIA COMPRESSÃO SIMPLES)	183

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Notas Propedêuticas

As “Terras Caídas” nas palavras das doudas pesquisadoras Torres de Freitas & Albuquerque (2012)¹ é atribuído ao processo de solapamento das margens de grandes rios, que na pós-fase de ocorrência provoca mudanças na morfologia dos padrões de drenagem dos canais. Por solapamento, compreende-se como a ruptura de taludes marginais do rio por erosão e ação das águas. Carvalho (2006)² incrementou os termos supracitados com uma perspicaz e hodierna definição que é a erosão lateral acelerada que afeta a vida dos moradores ribeirinhos.

Freitas & Albuquerque (2012) dão a explicação categórica sobre o assunto ao dizer que as “Terras Caídas” constituem modalidade erosiva deflagrada por causas naturais, devido ao processo de transporte de sedimentos, deposição e erosão, que ocorrem na fase atual de colmatagem e configuração da planície fluvial amazônica.

Registra-se também importante contribuição ao tema, o estudo realizado por Lopes & Rodrigues (2014), que situam o plano de atuação preponderante do fenômeno correlacionando-o à dinâmica fluvial, uma vez que a bacia hidrográfica do rio Solimões apresenta uma intensa e complexa dinâmica fluvial, pois sua forma e características dependem muito de como o rio exerce seu equilíbrio entre erosão e transporte de sedimentos, fator de extrema importância quando tratamos das terras caídas nos rios de águas brancas, que possuem grande quantidade de argila em suspensão, como o rio Solimões, o Madeira e o Purus (IBGE, 1977)³.

Ao se analisar e correlacionar as ideias apresentadas, verifica-se que ao se falar em terras caídas hoje, não basta analisar o cunho estritamente científico do fenômeno, porém, há o dever intrínseco de investigar além, averiguar quem são os interessados nessa demanda, como isso afeta o sistema regional e a sociedade

¹ TORRES DE FREITAS, Francimara; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha. **Análise Temporal sobre as “Terras Caídas” no médio Solimões/Coari – AM. Mercator – Revista de Geografia da Universidade Federal do Ceará.** Fortaleza: V. 11, N. 25, maio-agosto, p. 129-140, 2012.

² CARVALHO, José Alberto Lima de. **Terras Caídas e consequências sociais: Costa do Miracauerá – Paraná Trindade, Município de Itacoatiara – AM, Brasil.** Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia), 2006.

³ IBGE, **Geografia do Brasil - Região Norte.** Rio de Janeiro: Vol I, 1977, p. 123-125.

constituída nele. É fundamental pesquisar orientado pela finalidade de prestar auxílio àquelas cujas vidas são afetadas por um fato naturalístico o qual não conseguem compreender integralmente, como bem disseram Lopes & Rodrigues (2014), pois tal situação (ocorrência das terras caídas) gera desconforto na população local por conta do desbarrancamento com proporções maiores que possam provocar o desabamento de residências, como já ocorreu em muitos municípios do Amazonas.

O fenômeno das “terras caídas” está tão entrelaçado à vivência e à história regional do caboclo que pelas palavras do eminente historiador amazonense Mário Ypiranga Monteiro (1964) *apud* Carvalho (2006), têm-se a belíssima citação do fato científico revestido de lenda do folclore regional:

É um fenômeno tão comum êsse do comportamento da água em relação à terra, que não escapou à observação do selvagem, associando êle, o desmoronamento das margens (tiritiri) à freqüência com que o jacaré sagrado da sua mitologia se sacode no interior da terra, ou muda de posição. O frequentativo *nheengatú* ou tupi corresponde à comum expressão portuguesa terra-caída. É o ataque lateral da corrente (MONTEIRO, 1964, p. 10-11 *apud* CARVALHO, 2006, p. 56).⁴

Para se ter um breve panorama atual da situação, são comuns, nas *headlines* dos jornais locais nos períodos de vazante – meados de junho à meados de novembro – algo no sentido de “Fenômeno 'terras caídas' ameaça comunidades ribeirinhas no AM” (site G1, 2015⁵), ou, “Fenômeno 'terras caídas' arrasta casas, escola e igreja em Porto de Moz – PA (site G1, 2016⁶). Somente por saber que o fenômeno existe e desconsiderar sua grandiosidade e as investigações técnicas mais aprofundadas (de Engenharia de Materiais, Engenharia Geotécnica, Engenharia Hidráulica e Hidrologia) serem esparsas, vários prejuízos são causados anualmente: são avenidas destruídas, portos com acessos prejudicados, navegação lesada pelo deslocamento absurdo de massas nos rios adentro. Todos esses fatores trazem sérios riscos à vida humana. Um agravante a este quadro, que potencializa perigosamente os fatos já citados, é que a ocorrência se dá no mais das vezes em cidades interioranas, ligadas à capital

⁴ Texto extraído *ipsis literis* da fonte (1964).

⁵ Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2015/10/fenomeno-terras-caidas-ameaca-comunidades-ribeirinhas-no-am.html>>. Acessado em 17 de abril de 2017.

⁶ Disponível em: <<http://g1.globo.com/pa/para/noticia/2016/08/fenomeno-terras-caidas-arrasta-casas-escola-e-igreja-em-porto-de-moz.html>>. Acessado em 17 de abril de 2017.

através de vias aquáticas que são obstruídas pelo solo e pelas árvores arrastadas, fazendo assim a assistência tardiamente chegar.

Carvalho (2006) faz uma interessante ponderação daquilo que é o fenômeno na visão dos viventes das margens diretamente afetadas:

Terras caídas é uma terminologia regional amazônica usada principalmente para designar indiferenciadamente todo processo de erosão fluvial lateral como escorregamento, deslizamento, desmoronamento e desabamento. (CARVALHO, 2006, p. 55).

Faz-se um *plus* à definição retromencionada com auxílio de Igreja, Carvalho & Franzinelli (2010)⁷ que foram reconhecidos diversos fatores que atuam na ocorrência das Terras Caídas: clima, erosão fluvial, infiltração de água no solo e ação antrópica (em menor escala). Há de se aclarar melhor esta definição, principalmente a respeito do clima, o qual Torres de Freitas & Albuquerque (2012)⁸ ensina que essa modalidade erosiva é desencadeada por uma combinação de fatores, onde se destaca em grau de importância, os climáticos, em face aos altos níveis pluviométricos desta região, estimados na ordem de 2.600 mm/ano.

Por meio de consulta as bibliografias ímpares da Mecânica dos Solos tais como Terzaghi (1943), Vargas (1977), Caputo (1966), Venkatramaiah (2006), Tschebotarioff (1978), Das (2008 e 2010), entre outros, especificamente sobre o movimento de massas e as tensões da água no solo, observa-se que este estudo se mostra indispensável ao tema trazido à baila, dado que o estudo da percolação se presta a grande número de problemas práticos, tais como a estabilidade, porque a tensão efetiva (que comanda a resistência do solo) depende da pressão neutra, que, por sua vez depende das tensões provocadas pela percolação da água.

Como pode ser observado na bibliografia preliminarmente consultada sobre as terras caídas, existe todo um ambiente propício para o salutar desenvolvimento da pesquisa sobre o assunto, uma vez que os textos examinados apresentam diversas

⁷ IGREJA, Hailton Luiz Siqueira da, CARVALHO, José Alberto Lima de, FRANZINELLI, Elena. **Aspectos das Terras Caídas na Região Amazônica**. In: RABELLO, Adoréa. Contribuições Teórico-metodológicas da Geografia Física. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2010.

⁸ TORRES DE FREITAS, Francimara; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha. **Análise Temporal sobre as “Terras Caídas” no médio Solimões/Coari – AM**. Mercator – Revista de Geografia da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: V. 11, N. 25, maio-agosto, p. 129-140, 2012.

visões sobre o fato, que apesar de complementarem a gama de conhecimentos da Engenharia, não a substituem, e.g., a Geologia, que por definição, estuda as matérias que formam o globo e o respectivo mecanismo de formação e a Geografia Física que é uma vertente voltada para a análise dos elementos naturais do espaço terrestre, abordando as características da Terra, sua dinâmica e elementos naturais, tais como o clima, relevo, geologia, topografia, vegetação, hidrografia, entre outros. Nas consultas realizadas, apenas a suas visões foram dadas espaço.

Bandeira *et al.* (2018) e Nascimento & Simões (2017) citam em seus exemplares (e atualíssimos) trabalhos, principalmente em suas conclusões, a necessidade de melhor exame de dados relacionados à resistência dos materiais e às superfícies de ruptura, haja vista este ser um fenômeno diferenciado (*suis generis* da Amazônia), os dados sobre as propriedades dos materiais das margens dos rios ainda restam insuficientes sob a visão geotécnica.

O problema físico envolvido foi tratado apenas com único rigor científico de uma ciência, que fez exemplar serviço ao se debruçar no exame, caracterização das variáveis e descrição, porém, sem, ainda, trazer solução à perigosa questão, esta inclusive é uma crítica reiterada de Carvalho (2006) e reforçada por Lopes & Rodrigues (2014) e Freitas & Albuquerque (2012) ao tema: o baixo quantitativo de pesquisas neste sentido e a superficialidade daqueles que o pesquisaram, que em outras palavras, o fenômeno das terras caídas foi tratado apenas como reles figurante nessa peça da natureza amazônica. Este trabalho pretende, humildemente, preencher essa lacuna científica e em conjunto aos demais dados, dar o próximo passo na compreensão da questão.

Finalmente, em retrospecto ao desenvolvido nestas palavras iniciais, tem-se o ponto de partida ideal para as investigações comumente difundidas na Engenharia Geotécnica, pois no(s) solo(s) onde ocorrem os fenômenos devem ser categoricamente examinados, classificados e testados como bem preleciona a Mecânica dos Solos vigente, assim como toda constituição do maciço que ele faz parte com outros tipos de solos (que também passaram pelas mesmas verificações) deve ser minuciosamente examinado e montado proporcionalmente (em escala) em laboratório, para que assim o fenômeno possa ser artificialmente recriado (simulado), observado e equacionado, trazendo a devida comprovação físico-matemática de

como atua o fenômeno no âmbito natural e como as possíveis soluções se comportarão, quando a elas forem impostas, proporcionalmente, as mesmas condições da natureza.

A seguir os objetivos: geral e específicos para o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2. Objetivo Geral

Esta proposta de dissertação tem como objetivo norteador **o estudo geotécnico do fenômeno das “terras caídas”, que assolam uma parte das comunidades ribeirinhas amazonenses, em rios de “águas barrentas”**.

1.3. Objetivos Específicos

- i. **Caracterização** dos componentes materiais (solos) dos taludes vitimados pelo fenômeno;
- ii. **Identificação das condições ambientais** impostas aos taludes;
- iii. **Modelagem e replicação do fenômeno** em laboratório para melhor compreensão do fenômeno, além da proposição de medidas de prevenção e mitigação efeitos da histórica celeuma.

1.4. Da estruturação da dissertação

A dissertação será estruturada da seguinte maneira:

- i.* **Capítulo 1:** apresenta as considerações iniciais da pesquisa e seus objetivos;
- ii.* **Capítulo 2:** é feita uma meticolosa revisão bibliográfica sobre os principais pontos inerentes à pesquisa, tais como os índices físicos, a questão da resistência ao cisalhamento e o modelo mecânico de equilíbrio de maciços;
- iii.* **Capítulo 3:** é mostrada a descrição do local de visitas e coletas;
- iv.* **Capítulo 4:** são apresentados os materiais usados, os métodos aplicáveis e os resultados obtidos;
- v.* **Capítulo 5:** apresenta-se os principais resultados e correlações obtidos;
- vi.* **Capítulo 6:** proporcionam-se as principais conclusões visualizadas de maneira sincrética entre a pesquisa experimental e bibliográfica e sugestões às pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – AS TERRAS CAÍDAS

2.1. Primeiras palavras: Terras Caídas em *lato e stricto sensu*

As terras caídas são um fenômeno erosivo amazônico típico. E pela sua tipicidade, compreende-se que o mesmo ocorre anualmente, logo após as vazantes. Seu local de ocorrência é também já típico, pois está sempre nas margens dos rios de águas barrentas.

O conceito ao fenômeno já está bem contornado: erosão fluvial em rios jovens (ou em processo de amadurecimento). Isso nada mais representa em nossa pesquisa as terras caídas em *stricto sensu*, um fenômeno que perpassa a geografia, a geologia e a geotecnia (ramo da Engenharia Civil afeito a resolução de questões envolvendo solos, rochas e suas interações com as estruturas). Esta pesquisa há de se deter essencialmente a este conceito (estrito), a fim de fragmentá-lo, entender cada uma de suas partes e depois recriá-lo em menor escala para que daí se possa com ferramentas e linguagens de engenharia descrever e entender a sua natureza. Ao longo desta revisão e das etapas que ela seguirem, muito dessa linguagem e dessas ferramentas serão expostas para busca da solução, ou, ao menos, de algum controle.

A seguir, uma pequena contribuição de Highland & Bobrowsky (2008)⁹ sobre as principais causas de deslizamentos:

Tabela 1: Principal Causes of Landslides.
Fonte: Highland & Bobrowsky (2008), p. 64.

Causas naturais	
Causas geológicas	Causas morfológicas
Materiais fracos, como algumas encostas vulcânicas ou sedimentos marinhos não consolidados, por exemplo;	> Elevação tectônica ou vulcânica;
> Materiais suscetíveis;	> Rebote glacial;
> Materiais reunidos;	> Explosão glacial de degelo;
> Materiais cortados Materiais articulados ou fissurados;	> Erosão fluvial de inclinação do pé;
> Descontinuidade maciça de orientação adversa (cama, xistosidade e assim por diante);	> Erosão ondulatória no pé do talude;
> Descontinuidade estrutural de orientação adversa (falha, discordância, contato e assim por diante);	> Erosão glacial no pé em declive;
> Contraste na permeabilidade;	> Erosão das margens laterais;
> Contraste na rigidez (material rígido e denso sobre materiais plásticos).	> Erosão subterrânea (solução <i>pipping</i>);
	> Encosta de carga de deposição ou sua crista;
	> Remoção de vegetação (por fogo florestal, seca);

⁹ HIGHLAND, Lynn M; BOBROWSKY, Peter. **The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides**. Virginia (USA): Geological Survey Circular, 2008.

No entanto, há de explorar um conceito maior das terras caídas, algo que permita ao técnico e ao leigo, que em nossa visão é o mais afetado, o que são as terras caídas, isso posto, temos o fenômeno descrito em *lato sensu*.

Essa descrição ampla do fenômeno busca apresentar o fator humano, econômico e social deste acontecimento natural. Ainda que nesta pesquisa ele tenha um papel (ou influência) menor, não significa que as pessoas, seus bens móveis e imóveis não serão afetados. Muito pelo contrário. A eles que esta pesquisa e todos os esforços são direcionados. Tomemos, *verbi gratia*, a belíssima reportagem de Estarque (2018)¹⁰, veiculada no jornal *Folha de S. Paulo*, cuja *headline* é “Natureza do Desastre”, com subtítulo que os governos falham e os brasileiros são obrigados a abandonar suas casas antes que as mesmas sejam encolhidas pelas terras caídas.

Segue impressionante enxerto da matéria *supra*:

Entre 2005 e 2017, ao menos 19 municípios do Amazonas e 36.602 pessoas foram afetados por esse tipo de erosão fluvial, segundo a Defesa Civil do estado. Mas é possível que o número seja ainda maior. De acordo com esses registros, o município de Iranduba, por exemplo, teve 541 pessoas afetadas e nenhum desabrigado ou desalojado – no entanto, apenas em Catalão (comunidade de Iranduba/AM), várias famílias tiveram casas destruídas.

(...)

As terras caídas, assim como as secas e enchentes extremas, afetam principalmente as comunidades ribeirinhas. Segundo pesquisa do Instituto Igarapé, ao menos 6,4 milhões de brasileiros ficaram desabrigados ou desalojados por desastres naturais desde 2000, **o equivalente a um a cada dois minutos**. (Grifei).

Com isso é nítido que as terras caídas estão muito além da ocorrência de desabamento de margens, mas se trata de um processo que envolve muitos elementos, pessoas e órgãos governamentais, pois aqueles que abandonam suas casas dependem de assentamentos noutros locais, que no mais das vezes em muito diferem da sua atual realidade (e.g., saída do meio rural para urbano), a perda de sua identidade local e de seus bens. Sem contar que o próprio fenômeno (terras caídas) está em mutação (em função de outros eventos climáticos globais, assoreamento dos

¹⁰ ESTARQUE, Marina. **Natureza do Desastre**. Folha de São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://temas.folha.uol.com.br/natureza-do-desastre/amazonas/moradores-do-am-abandonam-comunidade-afetada-por-erosao-fluvial.shtml>>. Acesso em: 03 de março de 2018.

rios, entre outros, tal como na impressionante Figura 1). A discussão vai longe, e é bastante interessante.



Figura 1: *Moradores deixam suas casas, enquanto as terras caídas se aproximam.*
Fonte: *Estarque (2008).*

Por fim, os critérios a serem avaliados nesta pesquisa, são muitos, principalmente quando o objetivo é tão alto (conhecimento/domínio racional do fenômeno), porém é sempre de bom alvitre entender o porquê de se estar fazendo e quem será agraciado com fruto deste esforço.

2.2. O processo geotécnico/geológico (as fases) das Terras Caídas

As terras caídas, na avaliação meticulosa de Carvalho (2006)¹¹ é, no rio Amazonas, a erosão lateral que resulta de um processo complexo envolvendo simultaneamente escorregamento (a), desmoronamento (b) e desabamento (c). Com referência a isso, cabem as seguintes explicações de como se desenvolvem esses processos-componentes deste grande processo sincrético natural.

- a. Escorregamento: nas palavras do eminente geólogo Suguio (2003)¹², este fenômeno se caracteriza como o deslizamento rápido de um corpo mais ou menos coerente de rocha ou regolito, ao longo de superfícies de ruptura curvas. De acordo com Terzaghi (1980) *apud* Carvalho (2006), trata-se de um

¹¹ CARVALHO, José Alberto Lima de. ***Terras Caídas e consequências sociais: Costa do Miracauera – Paraná Trindade, Município de Itacoatiara – AM, Brasil.*** Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia), 2006. p. 86.

¹² SUGUIO, Kenitiro. ***Geologia sedimentar.*** São Paulo: Blucher, 2003. p. 32.

deslocamento rápido de uma massa rochosa, solo residual, ou sedimentos adjacentes de um talude no qual o centro de gravidade da massa em movimento avança numa direção orientada de fora para baixo (vide a Figura 2 a seguir). Na pesquisa no Miracauera/AM feita por Carvalho (2006), o escorregamento é tido como um movimento de massa bem mais lento, de perceptível observação e conseqüente alerta aos ocupantes da região de ocorrência, além de sua ocorrência estar fortemente adstrita ao período de vazante do rio, como pode ser visto na Figura 2 e seu respectivo esquema comportamental (Figura 3).



Figura 2: Exemplo de escorregamento, no Careiro/AM.
Fonte: Nunes (2004) apud Carvalho (2006).

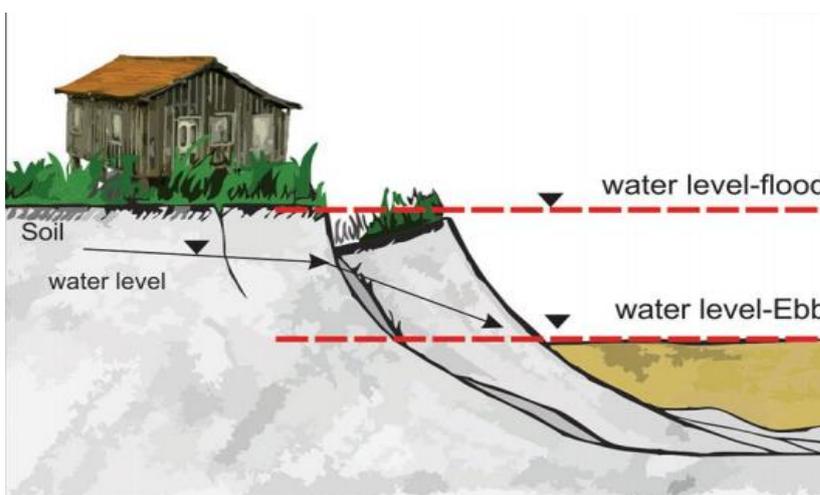


Figura 3: Perfil ilustrativo do escorregamento na vazante.
Fonte: Bandeira et al. (2018), p. 7.

- b. Desmoronamento: este movimento está associado à rápida descida de material, com a formação de montes de aspecto irregular na parte inferior do

talude (pé). Christofolletti (1980) *apud* Labadessa (2011)¹³ descreve tal fenômeno como um rápido movimento de um bloco de solo ou rocha, quando o solapamento criou um vazio na parte inferior da vertente, de comum ocorrência nas margens fluviais. Na pesquisa de Carvalho (2006), este processo busca explicar o movimento rápido do material, com plano de ruptura bem próximo de 90°. Uma das possíveis explicações está relacionada à saturação do solo nos períodos de cheia e com a vazante, o mesmo permanece ainda saturado e com peso específico maior, rompe pelo acréscimo de tensão¹⁴. A Figura 4 e Figura 5, as quais bem ilustram a dimensão do fenômeno.



Figura 4: Exemplo de desmoronamento.
Fonte: Carvalho (2006).

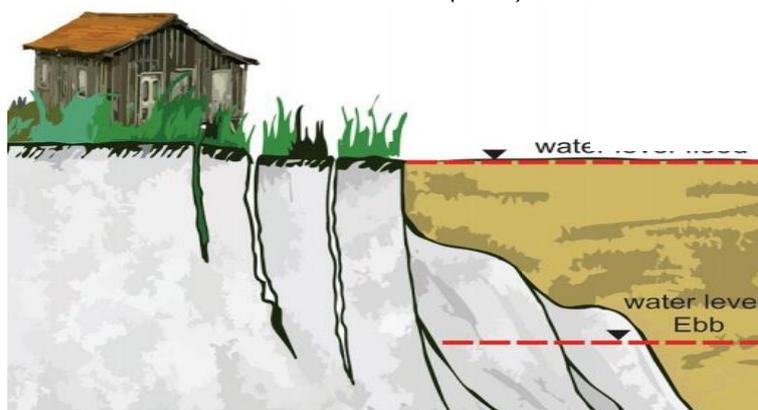


Figura 5: Esquemático do desmoronamento, durante a ocorrência da cheia.
Fonte: Bandeira et al. (2018), p. 7.

¹³ LABADESSA, Aparecido S. “Terras Caídas”, as causas naturais e antrópicas: Uma ocorrência na comunidade de São Carlos – Médio Madeira/RO. *Revista Geoingá (do Programa de Pós-Graduação em Geografia)*. Maringá: v. 3, n. 1, p. 45-61. 2011. p. 50.

¹⁴ O desmoronamento é um conceito primordial a este trabalho, haja vista que a teoria-base (**item 2.3 – a problemática das Terras Caídas**) se calca no fenômeno da saturação do maciço e sua posterior ruptura por acréscimo de tensão. As investigações necessárias a estas áreas atingidas logo mais serão explicadas assim como os ensaios que lhes são inerentes.

- c. Desabamento: este, por último, é também uma forma abrupta de deslizamento de massa, no entanto, este não tem superfície de deslizamento (e na visão de Labadessa (2011)¹⁵, se quer há necessidade de superfície de deslizamento para ocorrer, pois a gravidade se encarrega de fazê-la) bem definida (tal como as anteriores), ocorrem de maneira randômica, sem que defina a forma da massa desprendida (assim como a superfície). A seguir, as caracterizações ilustradas do subtipo do fenômeno (Figura 6 e Figura 7).



Figura 6: Exemplo do movimento abrupto e randômico do desabamento.
Fonte: Carvalho (2006).



Figura 7: Esquemático do desabamento.
Fonte: Bandeira et al. (2018), p. 7.

Carvalho (2006) faz mais uma contribuição a esse estudo, ao mencionar que estes três processos advêm, mormente, da ação dos “banzeiros” (ondas, similares às

¹⁵ LABADESSA, Aparecido S. “Terras Caídas”, as causas naturais e antrópicas: Uma ocorrência na comunidade de São Carlos – Médio Madeira/RO. *Revista Geoingá (do Programa de Pós-Graduação em Geografia)*. Maringá: v. 3, n. 1, p. 45-61. 2011. p. 50.

ondas de mares), do vento e até dos barcos que deslocam a água, formando ondas que se dissipam nas margens dos corpos hídricos. Observa-se que a pesquisa nessa área possui bastante material a investigar, no entanto, com poucos conceitos já desenvolvidos e consolidados para melhoria ou comparação.

Por fim, traz-se importante consideração feita por Nascimento & Simões (2017)¹⁶, no que diz respeito ao estudo por estes realizado:

Os trabalhos realizados permitiram inferir que os processos (das terras caídas) considerados **estão intrinsecamente associados aos efeitos causados pela infiltração das águas de chuva e pelas solicitações impostas pela dinâmica fluvial** (erosão e oscilação de nível). Grifei.

Vencida esta etapa de verificação de como se desenvolve este fenômeno sob a perspectiva estritamente (e global) geológica, passar-se-á a desenvolver a questão pelo campo da engenharia civil (subárea da geotecnia), onde poderá se inferir (*a priori*) como as terras caídas ocorrem matematicamente e fisicamente.

2.3. A problemática das Terras Caídas – uma descrição mecânica aproximada

Em busca de uma base teórica que se aproxime da situação explanada *supra*, realizou-se extensa e prospectiva pesquisa nas principais referências em Mecânica dos Solos, especialmente sobre a estabilidade de taludes (que aqui será tratada como as margens acometidas pelas terras caídas), sendo que em Vargas (1977)¹⁷, que o ponto inicial é lançado.

Em sua cometida análise sobre a influência da água em taludes (*in casu*, as margens em iminente desabamento de estudo), este eminente autor expõe o seguinte:

A prática tem mostrado que embora não haja influência da presença d'água sobre o valor do ângulo de atrito interno dos solos, há uma notável influência da mesma sobre a coesão, pois que essa diminui com a saturação do solo. **Assim, para se calcular a estabilidade de um talude que possa vir a saturar-se será necessário que os ensaios de laboratório para determinação dos parâmetros de resistência a cisalhamento sejam feitos sobre corpos de prova saturados.** (Grifei).

¹⁶ NASCIMENTO, Ricardo R.; SIMÕES, Gustavo F. **Avaliação da Suscetibilidade a movimentos de massa de cursos d'água da cidade de Rio Branco (AC).** *Revista Geociências (UNESP)*. São Paulo: v. 36, n. 2, p. 233-249, 2017. p. 238.

¹⁷ VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977. p. 383.

A citação supra é, sem sombra de dúvida, a descrição daquilo que ocorre com as margens deterioradas pelas terras caídas. Durante a cheia dos rios, o maciço é inundado e no mais das vezes fica completamente submerso, com isso, a água fica adentrando aos seus poros e lá se acomoda, sem mudar-lhe a forma (inclusive lhe proporcionando equilíbrio por meio do empuxo), uma vez que as tensões impostas pela água são neutras¹⁸ e o nível d'água não sobe de modo abrupto, acontece com o passar de meses.

Duncan (2014)¹⁹ contribuiu a esse estudo com as principais causas de acréscimo de tensões aos maciços, levando-os à ruptura:

1. Cargas no topo da encosta. Se o solo no topo de uma encosta estiver carregado, a tensão de cisalhamento necessária para o equilíbrio da encosta aumentará. Ocorrências comuns que carregam o solo são a colocação de aterro e a construção de edifícios apoiados em fundações superficiais. Para evitar o aumento significativo das tensões de cisalhamento na inclinação, tais cargas devem ser mantidas longe da crista da encosta. Uma distância aceitável pode ser determinada pela análise da estabilidade da inclinação.

(...)

3. Aumento do peso do solo devido ao aumento do teor de água. Infiltração no solo em um declive podem aumentar o teor de água do solo, aumentando assim o seu peso. Este aumento de peso é apreciável, especialmente em combinação com os outros efeitos que acompanham o aumento do teor de água.

(...)

5. Queda no nível da água na base de um declive. A pressão externa da água atuando na face de um declive fornece um efeito estabilizador. (Esta é talvez a única coisa boa que a água pode fazer em um declive). Se o nível da água cair, a influência estabilizadora é reduzida, e as tensões de cisalhamento dentro do solo aumentam. Quando isso ocorre rapidamente, e as pressões dos poros dentro do declive não diminuem em conjunto com a queda no nível da água externa, a inclinação é menos estável. Essa condição, chamada de rebaixamento rápido ou rebaixamento repentino, é uma importante condição de projeto para as encostas a montante de barragens e para outras encostas parcialmente submersas. (Grifei).

Ao se visitar Aysen (2002)²⁰, comprova-se que a afirmação do empuxo como um dos efeitos (ações) estabilizantes ao maciço/margem é verdadeira. Na imagem a seguir (Figura 8), a força P_{we} , que se refere ao empuxo da água, age em sentido oposto à força de deslizamento, representada por G .

¹⁸ Este conceito de tensões totais, neutras e efetivas será melhor desenvolvido no **item 2.5.4 – As tensões geostáticas**.

¹⁹ DUNCAN, James M. **Soil strength and slope stability**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2014. p. 32-33.

²⁰ AYSEN, A. **Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications**. Gorter (NED): Swets & Zeitlinger B.V., 2002. p. 369.

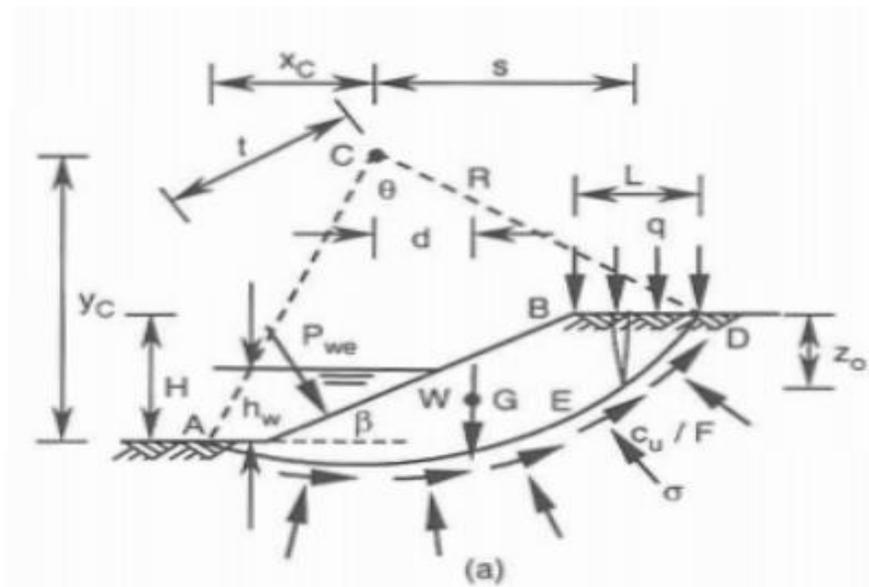


Figura 8: Simulação de talude exposto à água de um corpo hídrico.

Fonte: Aysen (2002), p. 369.

Vencida a etapa de inundação e submersão da margem (talude), com a água em seus poros, o talude agora experimenta a vazante (a descida do nível do rio), no entanto, a água que nele se encontra (pela questão da permeabilidade) mantém-se presa, por não conseguir acompanhar o mesmo ritmo de descida da água, logo, aquele solo que antes estava submerso (com pressões neutras atuantes), passa a ser um solo saturado, que em teoria é o solo com maior peso específico encontrado na natureza, o que tende a gerar uma nova condição de equilíbrio ao maciço. Vide a Figura 9.

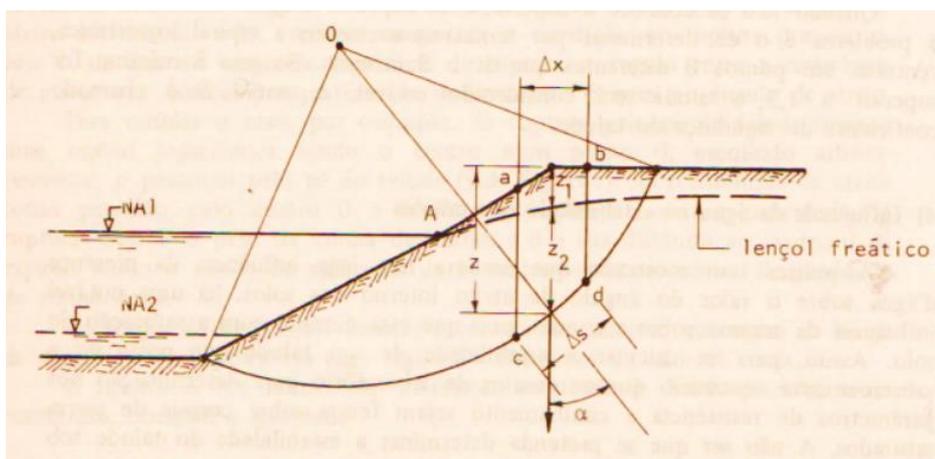


Figura 9: Talude com nível d'água variável (NA₁ e NA₂). Analogia teórica do fenômeno das terras caídas.

Fonte: Vargas (1977), p. 384.

Vargas (1977)²¹ prossegue em sua teoria, com a apresentação de outra possível situação que pode ocorrer com a mudança de nível d'água, que é o surgimento de forças de percolação, que podem empurrar o solo na direção do fluxo da água, como na fórmula $|\vec{p}| = |\vec{i}|\gamma_0$, onde o vetor “ p ” é a força de percolação expressa em unidade força por unidade de volume do solo, o vetor “ i ” é módulo e direção do gradiente hidráulico e γ_0 o peso específico do solo do entorno.

Bandeira *et al.* (2018)²² apresentam a seguinte situação que pode acontecer com a margem (ou maciço) de solo na variação de nível de água:

Entre os fatores hidrodinâmicos, a variação do nível de água é outro fator que pode influenciar o fenômeno terras caídas. Tricart (1977) e Sternberg (1998) estudaram a gênese e os tipos de leitos fluviais na Amazônia e atribuíram o enfraquecimento das margens dos rios a grandes amplitudes de flutuações de descarga durante o fluxo de inundação. (...). Quando o material do banco (corpo/maciço) ainda está em uma condição saturada ou próxima e a pressão confinante do rio diminui, o solo saturado apresenta maior probabilidade para o processo de movimentação em massa. (Grifei e Modifiquei).

Conforme será visto adiante, os conceitos geológicos/geotécnicos serão explicados (e aprofundados) para um entendimento global da questão, onde os maciços serão analisados pelos principais aspectos que os afetam e podem ter influência para desenvolvimento das terras caídas.

2.4. Conceitos geológicos aplicáveis

Ao se debater sobre as terras caídas, insta, primeiramente, fazermos uma explanação (ainda que sucinta) dos principais conceitos geológicos empregados a este estudo.

Isso se presta pela razão desse fenômeno, em especial, encontrar-se numa interseção científica. Por uma parte, o mesmo é explicado pela Geologia (intemperismo, erosão, entre outros fenômenos), por outra explicado pela Engenharia Civil (Geotécnica, Hidráulica, Hidrologia e Topografia), pela Geografia Física e pela Sociologia, Economia, entre outros. Todos têm a capacidade (e competência)

²¹ VARGAS, Milton. *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977. p. 388.

²² BANDEIRA, Iris C. N.; *et al.* *Terras Caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon?* Springer Environmental Earth Sciences. In: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7405-7>. 2018.

enquanto ciências, de tratar e dar sua opinião rigorosa, inclusive, ser-lhes-á cedido espaço (**itens 2.4 ao 2.7** deste trabalho).

2.4.1. Intemperismo

Primeiramente, pelas palavras do eminente autor Ollier (1969/1975) *apud* Suguio (2003)²³ por Intemperismo podemos compreender como um conjunto de processos naturais que causa a alteração das rochas, próximas à superfície terrestre, em produtos que estejam mais em equilíbrio com as novas condições físico-químicas diferentes das que deram origem à maioria das rochas.

Roque (2006)²⁴ cita que o solo residual (em estudo, por compor as margens acometidas pelas terras caídas) é resultado da decomposição da rocha *in situ*, devido a ação de processos de alteração pedogenéticos característicos de regiões tropicais úmidas. Basicamente, os processos de intemperismo físicos, químicos e biológicos estão em atividade e proporcionam a deposição de horizontes (camadas) diferenciadas ao longo do tempo.

Claramente que o intemperismo está diretamente ligado à natureza e a sua efetividade tende a ser ampla, quando presentes as condições climáticas ideais (temperatura e chuvas), propriedades do material (composição química, coesão, entre outros) e as características locais (flora, fauna, presença de lençóis freáticos, margem de corpos hídricos e relevo). A concatenação desses fatores produz o material solo e conseqüentemente, também, influencia nas suas modificações (enquanto maciços de terra), como preleciona Bittar (1995) *apud* Abreu (2007)²⁵. Na Tabela 2 (a seguir), são tratados os principais fatores que desencadeiam os movimentos de massas e mudança dos horizontes naturais ou artificiais:

²³ SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003. p.11.

²⁴ ROQUE, Wallace Vargas. **Mapeamento Geoambiental da Área Urbana de Manaus-AM**. Brasília: Universidade de Brasília – UNB. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2006.

²⁵ ABREU, Solange Hingst. **Escorregamento de Encostas em Áreas Urbanas habitadas por População de Baixa Renda**. Universidade Anhembi Morumbi. (Trabalho de Conclusão de Curso), 2007.

Tabela 2: Fatores Deflagradores dos Movimentos de Massa.

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS GEOLÓGICOS/ANTRÓPICOS
AUMENTO DA SOLICITAÇÃO	REMOÇÃO DE MASSA (lateral ou da base)	Erosão, escorregamentos Cortes
	SOBRECARGA	peso da água de chuva, neve, granizo, etc. acúmulo natural de material (depósito) peso da vegetação construção de estruturas, aterros, etc.
	SOLICITAÇÕES DINÂMICAS	terremotos, ondas, vulcões, etc. explosões, tráfego, sismos induzidos.
REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA	PRESSÕES LATERAIS	água em trincas, congelamento, material expansivo.
	CARACTERÍSTICAS INERENTES AO MATERIAL (geometria, estruturas, etc.).	característica geomecânicas do material, tensões.
	MUDANÇAS OU FATORES VARIÁVEIS	intemperismo=> redução na coesão, ângulo de atrito. elevação do N.A.

Finalmente, em referência ao item anterior, o qual tratava das condições/fatores que proporcionam o intemperismo, é possível observar que os agentes responsáveis por todo este fenômeno, concentram-se em áreas (ou disciplinas específicas), sendo eles, na proposição de Suguio (2003)²⁶:

- a. Físico: seria basicamente o alívio de pressão (expansão da rocha durante a erosão), cristalização/congelamento e expansão térmica. Ocorre com a degradação granulométrica e aumento da superfície específica, sem mudança da composição química do material;
- b. Químico: seria a dissolução, hidratação/hidrólise, oxirredução e carbonatação. Ocorre como completa mudança nas propriedades físicas e químicas, com aumento dos volumes dos compostos secundários;
- c. Biológico: seria a ação de cunha das raízes, escavação por animais e ácidos orgânicos de alguns vegetais. São observados como uma combinação dos efeitos de intemperismo físico e químico induzidos pela fauna e pela flora.

Gomes (2001)²⁷, ao descrever as origens de um determinado solo residual, fez um importante adendo à esquematização retromencionada, com a inclusão de mais um item, o qual ao nosso ver, aparenta grande importância e deve com os outros figurar:

²⁶ SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003. p. 13.

²⁷ GOMES, Fabíola de Souza. **Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um solo em processo erosivo**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2001. p. 87.

- d. Mecânico: ligado à trituração, abrasão, etc. Este está amplamente relacionado aos agentes transportadores dos solos (água, ventos, entre outros).

A seguir, na Figura 10, apresentamos uma breve representação do intemperismo (*lato sensu*) com a formação dos horizontes (camadas) com mais (próxima) e menos (distante) características físico-químicas com a rocha *mater*.

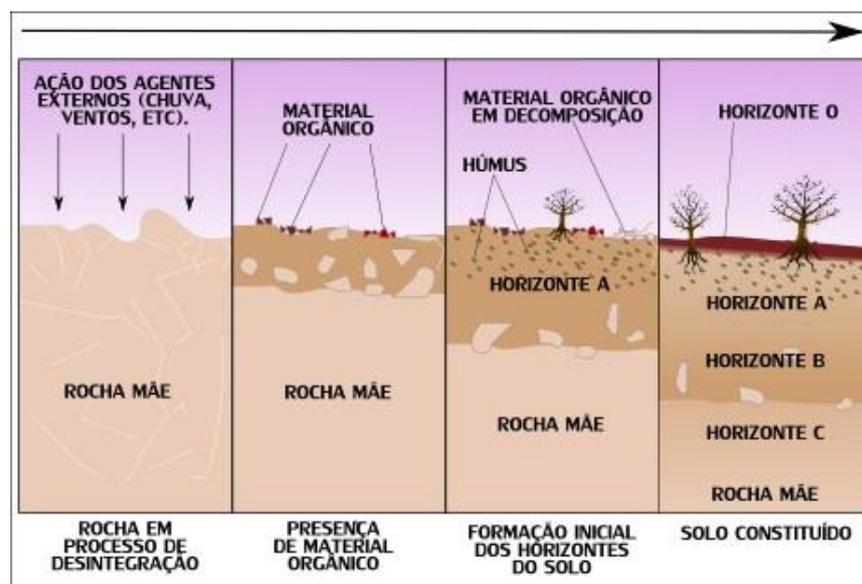


Figura 10: Constituição do solo a partir da rocha-mãe. Processo de intemperismo simplificado.
Fonte: Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/formacao-dos-solos.htm>>. Acesso em 22 de abril de 2018.

2.4.2. Erosão

Adentrando nos processos geológicos de modificação do relevo, sem os quais o processo de intemperismo não sobreviveria, passa-se a tratar dos processos fundamentais da geologia física²⁸.

A erosão, na definição trazida por Suguio (2003)²⁹:

A erosão ou gliptogênese (dos termos gregos *glyptós* = gravado + *gênesis* = geração) é um fenômeno natural, através do qual a superfície terrestre é desgastada e afeiçoada por processos físicos, químicos e biológicos de remoção, que modelam a paisagem.

²⁸ Este ramo da Geologia se ocupa das diversas transformações por que passa a superfície terrestre, devido ao trabalho realizado pelos fatores exógenos o arcabouço do subsolo do Planeta resultante dos fatores endógenos. In: NUNES, Elias; NÓBREGA, Orgival. **Geologia Física**. Apostila do Programa Universidade a Distância. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

²⁹ SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003. p. 25.

Outra importante definição é trazida por Gomes (2001)³⁰, que trata a erosão como um fenômeno amplo, de desgaste das rochas e solos, com a desagregação, deslocamentos ou arrastamento das partículas por ação de agentes erosivos, sendo ainda – a erosão – diferenciável pela velocidade e pelos agentes que a produz.

Em seu expediente, Domingos (2007) *apud* Barbosa (2008)³¹, trata da erosão, ao analisar a questão da estabilização de solos, como:

A ação de desgaste e remoção dos diferentes detritos e soluções, que acontece a seguir ou em simultâneo com a meteorização, designa-se erosão. Os principais agentes envolvidos neste processo são a água, o vento e a gravidade, que frequentemente actuam de forma combinada.

Assim como Plese *et al.* (2013)³², que citam a erosão com enfoque em seus agentes (inclusive o antrópico), uma degradação do solo causada pelo vento, pela água e pelo gelo, cuja ação é favorecida pela intervenção antrópica, que deixa descoberto ou destrói sua estrutura por um excesso de aração e gradagem.

Conforme a literatura consultada, existem verificadas ao menos 10 (dez) tipos de erosões distintas, em relação principalmente aos agentes (água, ventos, gelo, entre outros). Posto que esta pesquisa procura as causas (ou fatores determinantes) para ocorrência das terras caídas, buscar-se-á extrair do material consultado, os principais aspectos da erosão fluvial e seu ciclo erosivo.

A erosão fluvial (também conhecida como erosão normal, vista na Figura 11 que segue), apresentada por Suguio (2003)³³ e Santos (2007)³⁴ é aquele trabalho natural de remodelamento do relevo por meio da ação dos rios nas vertentes e interflúvios. Essa é fortemente influenciada pela litologia (uma vez que as rochas são caracterizadas pelas diferenças em suas consistência, porosidade e suscetibilidade química frente às alterações), estrutura (estratificações, fatores tectônicos, entre outros) e pelo clima (mudança na descarga fluvial de rios efêmeros e perenes). Ainda

³⁰ GOMES, Fabíola de Souza. **Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um solo em processo erosivo**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2001. p. 41.

³¹ BARBOSA, Carla Alexandra Fernandes. **Soluções para Estabilização de Taludes Sujeitos a Erosão Superficial**. Aveiro: Universidade de Aveiro. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2008.

³² PLESE, Luís; *et al.* **Áreas degradadas da Amazônia: ações antrópicas e a degradação ambiental**. Rio Branco: PROIN-IFAC, 2013.

³³ SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003.

³⁴ SANTOS, Rozely. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007.

na esteira da erosão fluvial, adentra-se em outros dois subtipos, a saber: *a. Erosão lateral*: que se identifica como efeito de erosão horizontal de um rio em seu estado de maturidade, promovendo o alargamento de seu leito. E, *b. Erosão vertical*: que num estado de juventude do rio, este passa a cavar (aprofundar) seu leito.

Chow *et al.* (1964)³⁵ não analisam diretamente a erosão fluvial, mas apresenta interessante definição da *channel erosion*³⁶ (que ao nosso ver, em muito se aproxima):

A erosão do canal depende da energia exercida pelas forças do fluxo de água concentrado. Barrancos, leito de córrego, leito de córrego e escarificação de várzea são exemplos de erosão causada pelo fluxo concentrado de água.



Figura 11: Erosão fluvial.
Fonte: Carvalho, 2006.

Sobre o ciclo da erosão, explica-se que está intimamente relacionado às modificações geomorfológicas ligadas à erosão por água corrente, que fora utilizado por Davis (1889) *apud* Suguio (2003). A estimativa de transformação de uma área em extenso peneplano³⁷, pode demandar aproximadamente 15 a 100 milhões de anos, a

³⁵ CHOW, Ven Te; *et al.* **Handbook of Applied Hydrology: A compendium of Water-resources Technology**. San Francisco: McGraw-Hill, 1964. p. 17-19.

³⁶ Erosão de canais.

³⁷ *Região geomorfológicamente madura, com topografia plana e algum relevo suave, desenvolvida por completo processo erosivo que vigorou durante longo período de estabilidade isostática e eustática, resultando em uma superfície de aplainamento.*

dependem das altitudes iniciais do relevo, dos tipos de rochas que constituem o horizonte, a pluviosidade, entre outros³⁸.

2.4.3. Transporte

Após sofrer com os efeitos do intemperismo, as partículas de rocha ficam soltas e integram o regolito³⁹. Estas partículas soltas passam a ter seu movimento regido pela energia potencial/gravitacional, sendo encaminhadas para baixo. Noutras palavras, o transporte (e seus fatores) nada mais é que o carreamento dos produtos (partículas recém desagregadas) do local de origem para novo local.

Nesse fenômeno, assim como no anterior, há predominância dos agentes (inclusive, iguais àqueles). No entanto, há de se dar maior destaque às águas pluviais e fluviais (bastante relacionadas à esta pesquisa). Sobre o transporte fluvial de material, verifica-se que a variação está na constituição das partículas e seu peso, *exempli gratia*, as areias e cascalhos, que por serem grandes e pesadas partículas, são transportadas via arrastamento, rolamento ou saltação junto ao leito do rio e ao adentrarem no corpo hídrico, passam a ser carga de fundo. Já as partículas de silte e argila, fundamentalmente mais leves e menores, são transportadas por suspensão. O esquema seguinte (Figura 12), bem ilustra a questão.

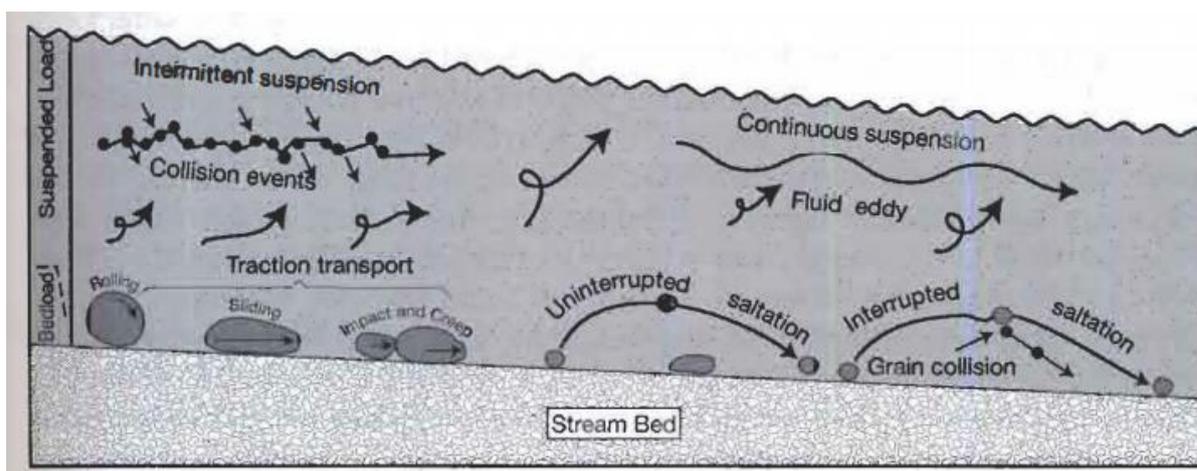


Figura 12: Formas de transporte de sedimentos.
Fonte: Boggs, 2006.

³⁸ Proposição teórica Flint & Skinner (1977). In: SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003.

³⁹ Termo utilizado pelos geólogos para designar o solo de maneira geral. É o conjunto do material superficial originado das rochas, que foi afetado pelo intemperismo químico e físico.

Os movimentos de massa também compõem os tipos de transportes de materiais geológicos, no entanto, por questão de melhor entendimento do fenômeno das terras caídas, o tópico fora explicado em conjunto com o processo geotécnico/geológico (**item 2.2**).

2.4.4. Depósito

A deposição de material representa nada mais que a fase final do ciclo do intemperismo. Nesse há a acumulação (deposição) do material desagregado e transportado em local diferente de sua origem. Nesse novo local, ocorrerá a formação do material, gerando novas estruturas (horizontes). O marco inicial desta etapa é justamente quando a força transportadora (força gravitacional) é vencida pelo peso das partículas, ou, a solução se torna supersaturada. O acúmulo, naturalmente, ocorre nos pontos mais baixos (sopés das vertentes, nos ambientes subaéreos ou subaquáticos)⁴⁰.

Tucci *et al.* (2004)⁴¹ trazem uma importante definição sobre esta etapa:

Designa-se depósito a parada total da partícula em suspensão recém decantada sobre o fundo, ou daquela transportada por arraste. Difere da decantação (...) pois uma partícula recém-decantada pode continuar se movimentando após entrar em contato com o fundo, de acordo com as forças hidrodinâmicas existentes rente ao fundo.

2.5. Fatores intrínsecos (geotécnicos) ao fenômeno

Ao se confrontar com as questões relativas à ocorrência do fenômeno de terras caídas, faz-se extremamente necessária a avaliação de todos os possíveis aspectos geotécnicos que podem, ou não, influenciar o sinistro. Claramente, ao se estudar a teoria do equilíbrio dos maciços de solo aplicável ao caso (**item 2.3**), observa-se que a coesão, o ângulo de atrito e o peso específico das partículas constituintes e a variação do nível de água (fator externo) são as principais variáveis que podem levar ao “desbarrancamento”.

Entretanto, as três primeiras variáveis retrocitadas não de ser obtidas pela experimentação e caracterização do solo, ou seja, são particulares ao(s) tipo(s) de

⁴⁰ SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003. p. 37.

⁴¹ TUCCI, Carlos; SILVEIRA, André; *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2004. p. 918.

solo(s) a ser(em) recolhido(s) e ensaiado(s). Posto isso, para que se melhor compreenda as características internas e externas ao fenômeno de terras caídas, passa-se a examinar os principais fatores que influenciam o comportamento mecânico (estático) de um solo e como estes podem levar o maciço ao colapso.

2.5.1. Tipos de solos

A natureza em sua capacidade infinita de se modificar, haja vista o **item 2.4 – Conceitos geológicos utilizáveis**, permite por meio do intemperismo (e seus processos auxiliares) a criação dos mais diversos relevos (formas) e tipos de solos. Em Engenharia Geotécnica, os tipos de solos são levados em consideração para que se dimensione sólidas e seguras estruturas e previna comportamentos indesejados (recalques, soerguimentos e rupturas), pois esses comportamentos têm consequências extremamente graves social e economicamente.

Nesta seção, os tipos de solos são aqueles que a técnicas de Engenharia Geotécnica permite classificar e com isso estabelecer um primeiro parâmetro no que tange ao seu comportamento. Das (2010)⁴² cita que a diversidade e a diferença de comportamentos de engenharia (aqui vistos como respostas às solicitações/carregamentos) dos diversos tipos de solos, levou ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos, aos quais podem estimar suas respostas às solicitações e orientar a programação de investigação necessária ao projeto.

A classificação deve ser vista como uma forma da Engenharia procurar falar uma mesma língua e com isso melhor compartilhar seus conhecimentos, para transmissão dos mesmos.

Claramente que a classificação não é única informação a ser levada em conta na elaboração de pesquisas ou projetos, nada mais é como um *start* ou primeiro enquadramento sobre o que é compõe aquele solo, *e.g.*, maiores frações de argila, areias, pedregulhos, *etc.* Diversas referências tratam da classificação como técnica menor, que podem induzir a uma visão distorcida daquilo que o solo pode realmente ser, tal como Vargas (1977)⁴³, que explana que para fins geotécnicos, as

⁴² DAS, Braja M. **Principles of Geotechnical Engineering**. Stamford (USA): Cengage Learning, 2010.

⁴³ VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

classificações geotécnicas só são eficientes no caso de solos grossos, porém, falham completamente no caso de solos que têm plasticidade (argilas e siltes), daí a inserção da avaliação granulométrica aos solos mais grossos e a avaliação granulométrica e de plasticidade (índice de plasticidade) aos solos finos.

Com isso, apresenta-se as principais classificações que podem ser aplicadas à pesquisa:

- a. Classificação Unificada: proposta pelo eminente Engenheiro Arthur Casagrande para obras aeroportuárias e depois passou a ser empregado em diversas obras de engenharia (rodovias, barragens, entre outras). A classificação basicamente é definida em 5 (cinco) letras, que representam os solos “fundamentais” e 4 (quatro) dados complementares, sendo 2 (dois) para solos grossos (retido na peneira ASTM n. 200) e os demais para solos finos. O ensaio, para classificação, consiste em peneiramento do solo, avaliação da quantidade de solos que passar mais de 50% da peneira n. 200, o solo é considerado fino, e se passa ao teste de plasticidade. Do contrário, avaliar-se-á a distribuição granulométrica para sua qualificação. A seguir, a Figura 13 que apresenta a Classificação proposta.

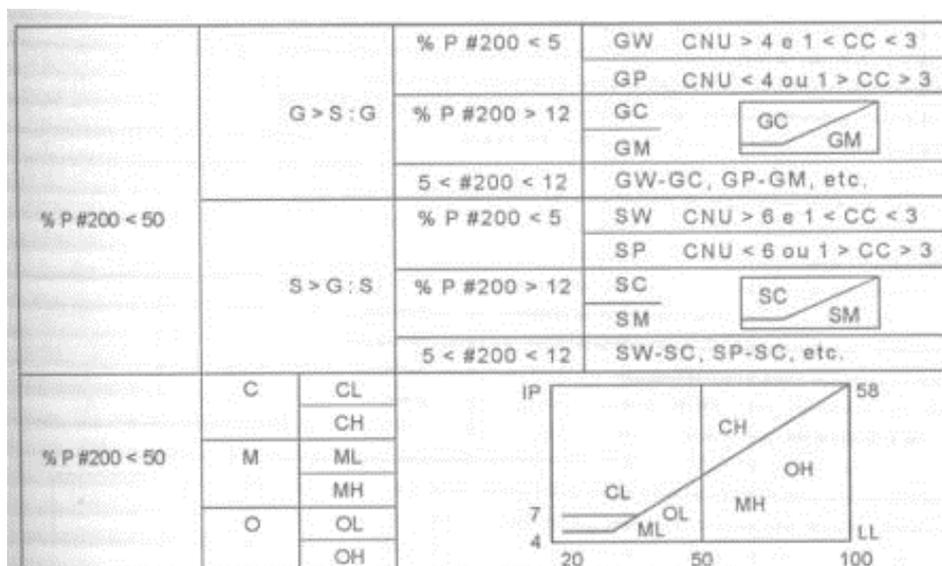


Figura 13: Classificação Unificada por A. Casagrande.
Fonte: Pinto (2006).

- b. Sistema Rodoviário de Classificação (AASHO): Desenvolvido nos Estados Unidos, pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHO, na década de 20 para indicar a adequação do emprego

de determinados solos na execução de estradas secundárias de baixo custo⁴⁴. O procedimento de realização se iguala ao da classificação anterior, no que diz respeito ao peneiramento e a aplicação do limite de plasticidade, a mudança está na porcentagem de avaliação de solo fino, que naquela era de 50% e nesta é de 35%. Ao que parece, os desenvolvedores consideraram o comportamento da partição fina como preponderante, ainda que em menor quantidade.

A seguir, a classificação esquematizada na Figura 14.

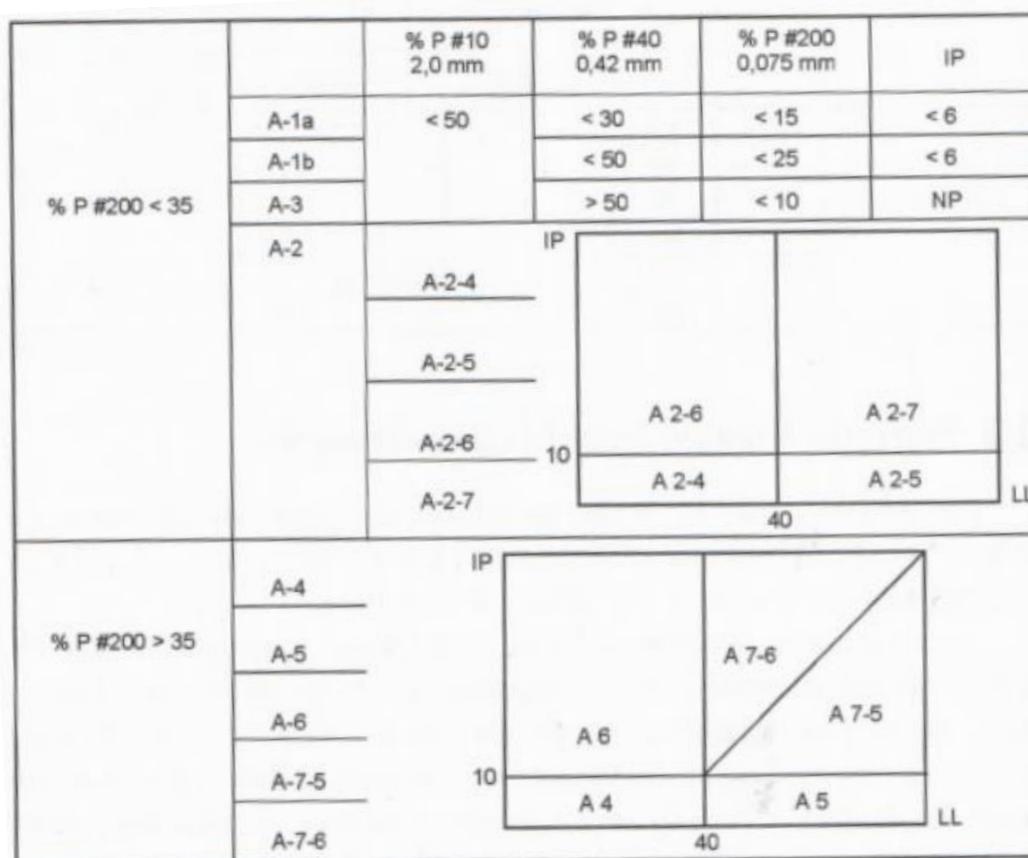


Figura 14: Classificação AASHO.

Fonte: Pinto (2006).

2.5.2. Índices Físicos

Ao nos depararmos com questões (de modo mais geral, “problemas”) atinentes à Mecânica dos Solos e de suas disciplinas correlatas, faz-se premente a avaliação

⁴⁴ TSCHEBOTARIOFF, Gregory Porphyriewitch. **Fundações, Estruturas de Arrimo e Obras de Terra: A arte de projetar e construir suas bases científicas na mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. p. 89.

do estado do solo. Por este estado, compreende-se as 3 (três) fases que envolvem uma partição de solo qualquer, que são: sólido (as partículas de solos e rochas), líquido (a água presente entre os interstícios, pela umidade e saturação) e ar (presentes nos canalículos onde nem há solo e nem água). Uma ilustração (Figura 15) de como se dá esta distribuição.

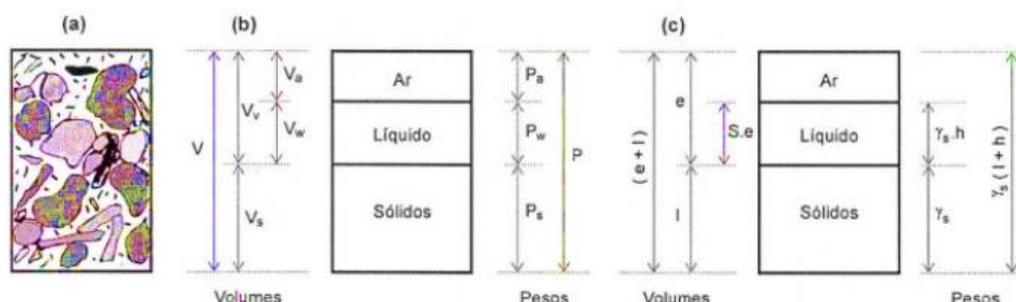


Figura 15: As fases de um solo. Sendo (a) o estado natural, (b) separação em volumes e pesos correspondentes e (c) em função do volume de sólidos.

Fonte: Pinto (2006), p. 35.

A presença destes componentes (solo, água e ar) um determinado volume e numa determinada proporção, tende a gerar diversos comportamentos, tal como a mistura de concreto magro a ser lançada num elemento estrutural, que a depender do tipo de cimento e a proporção de água e agregados escolhida pelo projetista, adquirirá a resistência mecânica desejada. O mesmo ocorre ao solo, porém de modo “menos controlável” e mais natural, que enseja ainda mais atenção do engenheiro.

Conforme pesquisas (consultas) diversas, vários autores⁴⁵ ao longo do tempo trouxeram sua contribuição ao formar um grupo de índices físicos, que permitem a avaliação do estado do solo e de certa maneira, com maior rigor e precisão técnica que a classificação (item anterior), sendo alguns deles obtidos por correlação nuns com os outros. A seguir os índices físicos, algumas características e formulações básicas:

- i. **Umidade:** relação entre o peso da água na amostra de solo e o peso dos sólidos também presentes na mesma amostra. É representada pela letra “w”, sendo a sua formulação mais característica, $w = \frac{P_w}{P_s}$.

⁴⁵ Ao se desenvolver esta parte, fez-se a leitura obrigatória de Krynine (1947), Reynolds (1956), Tsytoich (1976), Vargas (1977), Pinto (2006), Caputo (1966), Das (2008 e 2010), entre tantos outros constantes no rol de referências. Devido a diferenças temporais e geográficas entre os autores, podem haver diferenças entre suas notações, no entanto, o “sentido” e a “razão” do índice e sua obtenção, permanecem.

- ii. **Índice de Vazios:** este é resultado da relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas presentes na amostra, sendo expresso pela letra “e”. A formulação geralmente encontrada é $e = \frac{V_v}{V_s}$. Pode ser obtido por outros índices.
- iii. **Porosidade:** relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra, sendo representado pela letra “n”. Sua formulação é $n = \frac{V_v}{V}$. Pode ser obtido por correlação ao índice de vazios, tal como na fórmula, $n = \frac{e}{(1+e)}$.
- iv. **Grau de Saturação:** relação matemática entre o volume de água na amostra e o volume de vazios da mesma, que é interpretado como o volume máximo que pode ser ou não ocupado por esta amostra. Sua letra de representação é “S”, sendo sua formulação, $S = \frac{V_w}{V_v}$, ou podendo ser obtido por outras correlações.
- v. **Peso Específico dos Grãos (Sólidos):** é a relação entre o peso das partículas sólidas da amostra e o volume das mesmas. É, em teoria, uma aproximação entre o peso de um material sem impurezas pelo volume isento de vazios e outros materiais. É representado pelo γ_s , sendo sua formulação, $\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$.
- vi. **Peso Específico da Água:** tido como padrão às pesquisas corriqueiras, é representado pelo símbolo γ_w , com valor de 10kN/m³.
- vii. **Peso Específico Natural:** relação do peso total do solo (com água e ar juntos), pelo seu volume completo. O símbolo é γ_{nat} , como formulação $\gamma_{nat} = \frac{P}{V}$. Também pode ser obtido por outros índices.
- viii. **Peso Específico Aparente Seco:** relação entre o peso das partículas sólidas e o volume total da amostra (volume de sólidos somados ao do ar e da água). Seu símbolo é γ_d e sua formulação é $\gamma_d = \frac{P_s}{V}$, ou, $\gamma_d = \frac{\gamma_{nat}}{(1+w)}$.
- ix. **Peso Específico Aparente Saturado:** é o peso específico do solo, caso o mesmo tivesse todos os seus vazios completos com água, sem a alteração do volume total da amostra. Sua representação é dada por γ_{sat} , e a formulação é $\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{(1+e)}$.
- x. **Peso Específico Submerso:** é o peso específico da amostra de solo, quando a mesma está completamente submersa (caso clássico das tensões neutras). Seu símbolo é γ_{sub} , com formulação igual à $\gamma_{sub} = \gamma_{nat} - \gamma_w$.

Conforme se observará no **item 4. Materiais Utilizados, Métodos Aplicáveis e Resultados**, esses índices terão importante papel na identificação e estudo comportamental dos solos que compõe os maciços de solos atormentados pelas terras caídas.

2.5.3. Permeabilidade, Percolação e Redes de Fluxo

Conforme pode ser observado, o solo é um material bastante complexo e com inúmeras possibilidades de comportamento a depender de seus constituintes (solos de granulometrias diferentes, mais ou menos vazios e água). Sobre este último componente, importa um meticoloso estudo, haja vista uma gama de problemas de engenharia geotécnica serem causados por esta, tais como: a. Cálculo de Vazões; b. Análise de Recalques e c. Estudos de Estabilidade de Maciços.

A permeabilidade, pelas lições do eminente Tschebotarioff (1978)⁴⁶:

É a propriedade que possuem os solos de se deixarem atravessar por um fluxo de água. Os cálculos que levam em consideração o fluxo de água gravitacional se baseiam na aplicação da lei de Darcy (1856)⁴⁷, segundo a qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico ($v_p = k_p i$).

Das (2008)⁴⁸ também faz importante consideração acerca da permeabilidade, além de defini-la, onde:

Qualquer massa de solo consiste em partículas sólidas de vários tamanhos com espaços vazios interconectados. Os espaços vazios contínuos em um solo permitem que a água flua de um ponto de alta energia para um ponto de baixa energia. **Permeabilidade é definida como a propriedade de um solo que permite a infiltração de fluidos através de seus espaços vazios interconectados.** (Grifei).

Na imagem que segue (Figura 16), pode-se retratar a lei Darcy, com fluxos horizontais (I) e verticais (II) e em seguida explicá-la.

⁴⁶ TSCHEBOTARIOFF, Gregory Porphyriewitch. **Fundações, Estruturas de Arrimo e Obras de Terra: A arte de projetar e construir suas bases científicas na mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978, p. 253.

⁴⁷ *Proposição do engenheiro francês Henry Darcy (1803-1858). Cumpre dizer que esta lei é válida somente para o fluxo laminar, uma vez que na maioria dos solos não é possível o aparecimento de correntes turbulentas.*

⁴⁸ DAS, Braja M. **Advanced Soil Mechanics**. New York: Taylor & Francis, 2008.

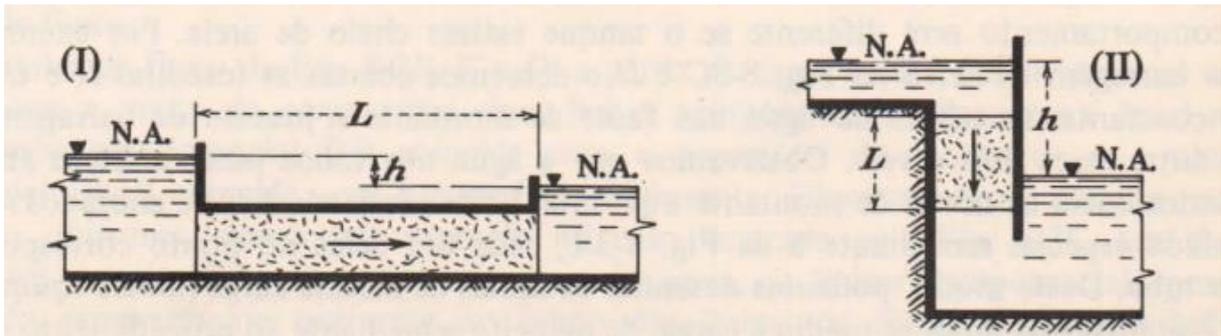


Figura 16: Modelo simplificado de análise do gradiente hidráulico, em direções horizontal e vertical.
Fonte: Tschegotarioff (1978), p. 253.

Dado que o gradiente hidráulico pode ser definido como $i = \frac{\Delta h}{L}$, sendo o numerador a diferença entre as alturas a montante e jusante da água e o denominador é a espessura da camada de solo medida na direção do fluxo. A fórmula apresentada na citação à Tschegotarioff retro ($v_p = k_p i$), é nada mais que a velocidade de um fluxo de água no solo, ajustada ao tipo de solo, por um coeficiente “ k ”, observado experimentalmente por Darcy (vide as Tabela 3 e Tabela 4 a seguir).

Tabela 3: Típicos coeficientes de permeabilidade.

Fonte: Pinto (2006), p. 117.

Solo	K (cm/seg)
Argilas	$< 10^{-7}$
Siltos	10^{-4} a 10^{-7}
Areias argilosas	10^{-5}
Areias finas	10^{-3}
Areias médias	10^{-2}
Areias grossas	10^{-1}

Tabela 4: Típicos coeficientes de permeabilidade.

Fonte: Das (2010), p. 164.

Soil type	k	
	cm/sec	ft/min
Clean gravel	100–1.0	200–2.0
Coarse sand	1.0–0.01	2.0–0.02
Fine sand	0.01–0.001	0.02–0.002
Silty clay	0.001–0.00001	0.002–0.00002
Clay	< 0.000001	< 0.000002

Como já se é esperado pela natureza do fluxo (laminar), os coeficientes de velocidades são um tanto quanto menores em função dos vazios presentes na camada de estudo e na dimensão das partículas. Como pode ser visto, nas tabelas

supra, os tipos de solos com maiores dimensões de partículas tendem a apresentar maiores números de vazios (índices) e mais permeáveis são.

Uma vez que é conhecida a área da seção transversal (A_s) da camada de estudo, torna-se possível, pela equação fundamental da vazão, transformar a velocidade num volume por unidade de tempo, ficando $Q = kiA_s$.

As redes de fluxo são, por definição, quando as partículas de água seguem caminhos curvos, mas ainda sim em planos paralelos. É um modelo de fluxo bidimensional, que geralmente se fazem presentes nas fundações de barragens e em maciços de terra (maciço que será usado em analogia as margens). A peculiaridade antecitada, faz com que as redes de fluxo tenham interesse a este estudo, pois além da questão da percolação, as mesmas tratam também da questão da estabilidade do maciço, problema central desta pesquisa.

Na Figura 17 e Figura 18 a seguir, compreende-se de maneira inicial a questão das redes de fluxos e das linhas equipotenciais (de mesma energia), onde por um lado se observa as linhas com espaçamentos uniformes entre si e noutra, as linhas em espaçamentos irregulares (uns maiores e outros menores), pela razão de ser ter solos com capacidades permeáveis distintas (e.g. um solo mais arenoso/permeável e outro mais argiloso/impermeável). A análise caso a caso das frações de solos presentes no estudo tende a trazer melhor compreensão dos solos nos maciços.

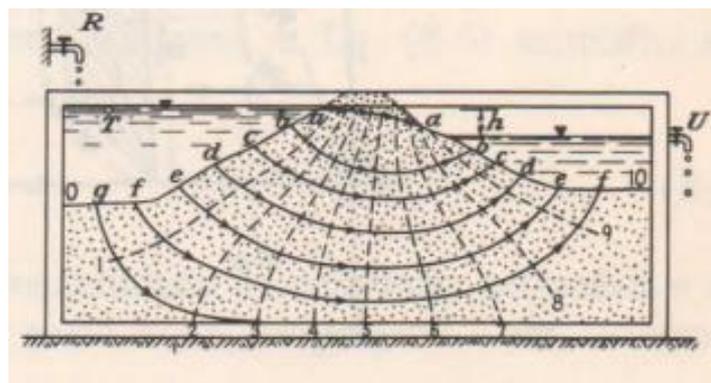


Figura 17: Redes de fluxo numa barragem com apenas 1 (um) tipo de solo.
Fonte: Tschebotarioff (1978).

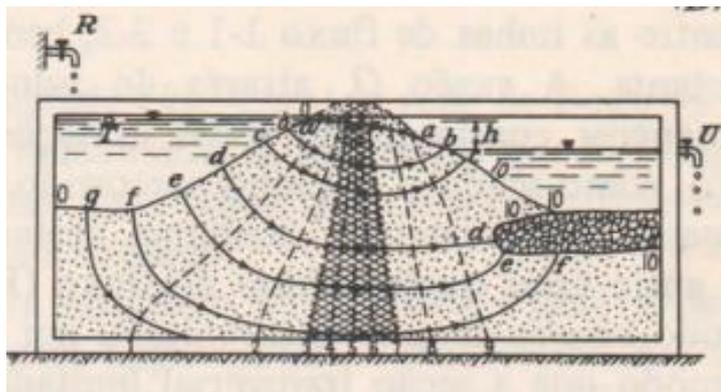


Figura 18: Redes de fluxo numa barragem com 2 (dois) tipos de solos e sistema de leito drenantes. Observa-se a nítida diferença nas equipotenciais, devido às permeabilidades ("k") dos solos.
Fonte: Tschebotarioff (1978).

Conforme o desenvolvimento do estudo das terras caídas, a análise da permeabilidade e das redes de fluxo se mostrará bastante útil para a definição de como se comporta o maciço no que tange a presença da água em função das estações de cheias e vazantes e quanto isso pode comprometer na aquisição ou perda de resistência mecânica e ruptura.

2.5.4. As tensões geostáticas (totais, efetivas e neutras)

As tensões no solo, em verdade, são uma aplicação da mecânica dos sólidos deformáveis (disciplinas de resistência dos materiais I e II, comumente ensinadas na cátedra de Engenharia Civil mundo a fora). As tensões são a transmissão partícula à partícula de forças e a sua capacidade de suportar sem colapsar⁴⁹.

A avaliação das tensões geostáticas, como bem descreve o nome, procura descrever o valor das tensões que ocorrem numa determinada situação em que um ou mais solos estão dispostos em quantas camadas houverem, de espessuras (ou alturas) diversas. Conceitualmente, a tensão σ pode ser definida pela relação $\sigma = \frac{\sum N}{\text{Área}}$, sendo a somatória de N, a totalização de todas as forças normais ao plano (a superfície ou área), já que se mostra impossível desenvolver modelos matemáticos com base nas inúmeras forças (atuantes partícula por partícula), a sua ação é substituída pelo conceito de tensões. Das (2010)⁵⁰ desenvolve o conceito de tensões

⁴⁹ O colapso de uma estrutura devido às questões de tensão será mais propriamente avaliado no item seguinte, sobre a resistência ao cisalhamento.

⁵⁰ DAS, Braja M. **Principles of Geotechnical Engineering**. Stamford (USA): Cengage Learning, 2010. p. 227.

(efetivas, ilustradas na Figura 19 a seguir) a partir dessa premissa, das forças atuantes grão a grão, sob a formulação $\sigma' = \frac{P_1(v) + P_2(v) + \dots + P_n(v)}{\bar{A}}$.

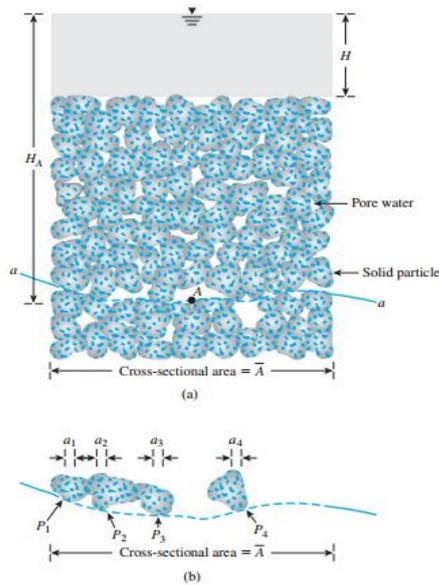


Figura 19: Tensões efetivas numa coluna de solo (a) e forças grão a grão numa seção qualquer.
Fonte: Das (2010), p. 227.

Estas tensões ainda podem ser escritas em função de uma altura “z” (e das características em que o solo se encontra), uma vez que a disposição, ainda que aproximada das camadas é horizontal, a tensão $\sigma(z)$, é igual à fórmula $\sigma(z) = \gamma_n z$, onde o γ_n será o peso específico do solo “n” na altura (cota) e no estado que o mesmo estiver, e.g., estado natural (γ_{nat}), estado saturado (γ_{sat}) e estado submerso (γ_{sub}). A Figura 20, proporciona a concepção da questão.

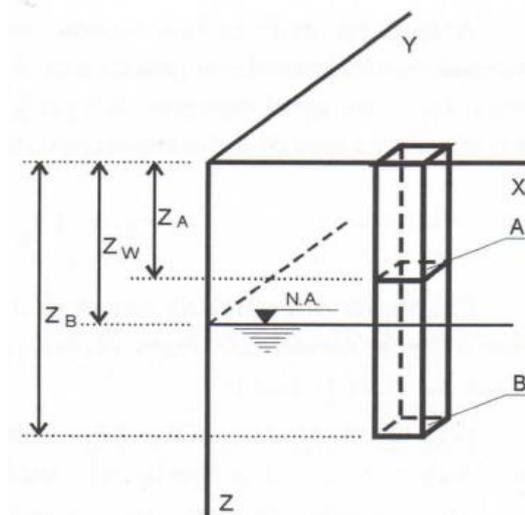


Figura 20: Tensões num plano horizontal.
Fonte: Pinto (2006), p. 97.

Sobre os casos que envolvem a água, a tensão atuante em razão da água, aqui chamada de tensão neutra (com a letra “ u ”) é obtida da mesma forma que a tensão anterior, $u(z) = \gamma_w z$, sendo o γ_w o peso específico da água. No entanto, no que tange ao comportamento do solo, há de fazer uma importante pontuação sobre as tensões numa determinada cota em que a camada está submersa, que a tensão efetiva (σ'), pode ser definida como a diferença entre as tensões ditas totais σ (no estado do solo) e as tensões neutras u (induzidas pela água). A Figura 21 faz a exemplificação.

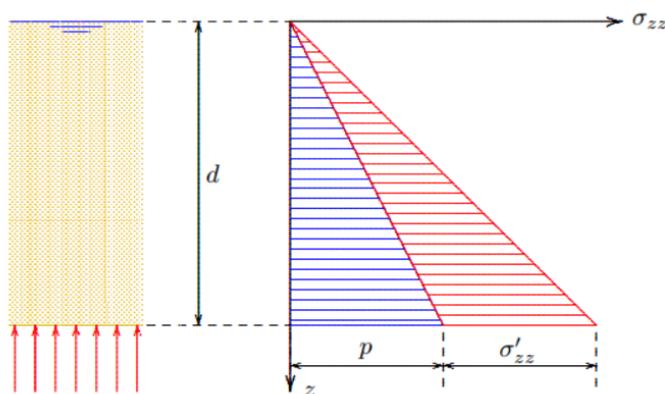


Figura 21: Tensões geostáticas (neutras e efetivas) num solo.

Fonte: Verruijt (2001), p. 32.

Este conceito, introduzido por Terzaghi (1943) é de suma importância ao entendimento das deformações do solo e sua consequente ruptura, uma vez que o mesmo só muda de forma por meio do acréscimo ou redução das tensões que efetivamente acontecem em seu interior.

O experimento (Figura 22) a seguir bem exemplifica esta situação. Em *i*, o solo está com a água lhe preenchendo até a altura, ou seja, as tensões são a soma das tensões da água e do solo submerso. Em *ii*, há um acréscimo de tensão (o qual pode ser interpretado como uma nova camada), com isso, observa-se a mudança de forma e a expulsão da água interior. Pela simples mudança de forma, comprova-se que a tensão é efetiva. Finalmente, em *iii*, acrescenta-se o mesmo peso daquela camada, porém convertido em água, logo, observa-se o aumento da pressão neutra, sem mudança de volume, com isso, pode-se afirmar categoricamente, que a pressão total (σ) aumentou, mas apenas em razão da pressão neutra (u), sem qualquer mudança dos contatos grãos a grãos, ou, tensão efetiva (σ').

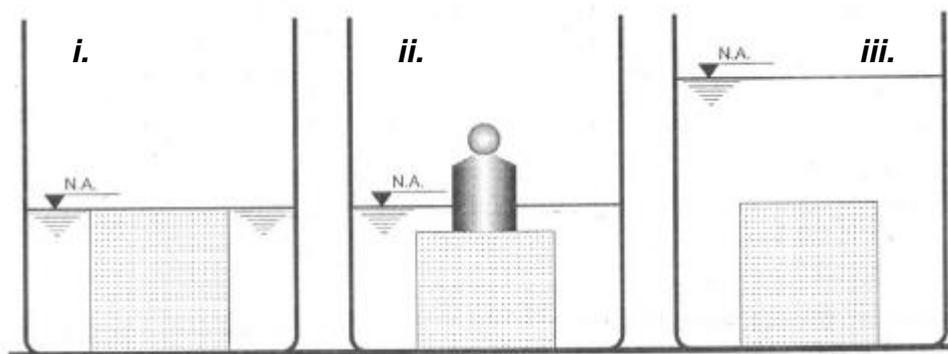


Figura 22: Experimento das Tensões Efetivas.
Fonte: Pinto (2006), p. 99.

Como já citado, o estudo das pressões geostáticas se mostra extremamente valioso à compreensão de como se desenvolvem as tensões nos maciços atingidos pelas terras caídas, uma vez que a mudança das tensões neutras ocorre de período em período, sendo que a água aprisionada no maciço, em teoria, não tem a capacidade de acompanhar a velocidade da “vazante” e passa a agir de maneira maléfica pois aquela tensão que antes era neutra, passa a ser efetiva, forçando o solo a uma nova forma, ou, destruindo-o.

2.5.5. Resistência ao cisalhamento

Finalmente, no que diz respeito aos fatores intrínsecos, que afetam o fenômeno das terras caídas, traz-se à baila, a resistência ao cisalhamento que representa, essencialmente, o entendimento de todas as etapas (itens) anteriores, uma vez que a capacidade de um solo resistir à aplicação de cargas externas, ou, do seu próprio peso, está amplamente relacionada ao tipo de solo, ao seu estado (índices físicos), a permeabilidade e as tensões geostáticas efetivas que o mesmo está recebendo/suportando.

Ao nos debruçarmos sobre o estudo das tensões de cisalhamento, há de preparar o caminho, com alguns breves conceitos, como as tensões principais efetivas (a), a coesão (b) e o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (c), sendo que questões mais “profundas” tecnicamente, serão abordadas conforme a necessidade que a pesquisa demandar, *exempli gratia*, a resistência das areias e das argilas pré-adensadas, entre outros.

- a. Tensões efetivas principais (σ_1 e σ_3): de acordo com aquilo que foi apresentado nos itens anteriores, as tensões efetivas são aquelas que tem

a possibilidade de modificar a forma do solo. Naquelas primeiras letras, apenas as tensões induzidas pelo peso da camada de solo foram avaliadas. Essas são conhecidas como σ_1 ou tensão normal principal. No entanto, proporcionalmente ao aprofundamento do elemento de análise, as tensões horizontais tendem a aumentar e com o elemento passa a ficar contido e com maior resistência, uma vez que essa tensão de confinamento (σ_3) atua em toda sua superfície.

A proporção entre as tensões verticais e horizontais é definida pelo coeficiente “ K_0 ”, o qual pode ser obtido experimentalmente (via análise dos critérios de ruptura ou por meio da análise da sensibilidade das argilas), ou consultado em referência ao solo estudado⁵¹. Na Figura 23, temos a representação dessas tensões, sendo que para melhor compreensão, a seguinte representação: $\sigma_1 = \sigma_v$ e $\sigma_3 = \sigma_h$.

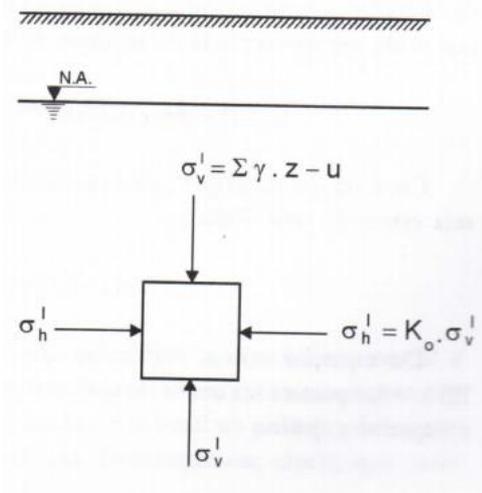


Figura 23: Tensões principais num elemento de solo.
Fonte: Pinto (2006).

- b. Coesão: a resistência que define o solo é corolário do atrito presente entre as partículas, sucede que esse atrito está para além da física clássica, mas tem razão de natureza química para existência. Esta atração é chamada de

⁵¹ Conforme aduz Pinto (2006), o coeficiente “ K_0 ” pode ser arbitrado com certa segurança para os valores de 0,4-0,5 para as areias e de 0,5-0,7 para as argilas, no entanto, recomenda-se a investigação para os solos que possuem relevantes parcelas destes tipos de solos, para que não se superestime ou subestime as tensões confinantes. Outros seguem esta linha coeficientes, tais como Das (2010), Vargas (1977). Mostra-se coerente também a aplicabilidade da fórmula contida em Krynine (1947): $K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$, onde ϕ corresponde ao ângulo de atrito interno.

coesão de um solo, pois independe da tensão normal (principal- σ_1) submetida ao solo é capaz de resistir sem que esteja presente a tensão de confinamento (σ_3). Essa é coesão enquanto fenômeno físico-químico do solo. A coesão enquanto variável da equação geral de ruptura (a ser apresentada) é um mero intercepto de uma função linear no eixo da tensão cisalhante (τ);

- c. O critério de ruptura Mohr-Coulomb: esta, quiçá, seja um dos critérios basilares da Mecânica dos Solos contemporânea, pois sua descoberta, seu estudo e sua aplicação têm sido fundamentais à compreensão de diversos fenômenos da natureza, além de ter permitido o avanço e a segurança das obras de engenharia de porte superior e artes especiais⁵².

Os critérios de ruptura buscam, dentro do campo experimental, recriar a ruptura (o desprendimento, a desconexão) de um determinado elemento submetido à elevadas tensões (confinantes e principais). Conforme aduz Venkatramaiah (2006)⁵³, o critério de Coulomb⁵⁴ pode ser definido:

Não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão $c + f\sigma$, sendo c e f constantes do material e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento.

Nas palavras de Krynine (1947)⁵⁵, aduz que no critério de Mohr⁵⁶:

Não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material.

Posto isso, apresentam-se, na Figura 24 a seguir, os critérios desenvolvidos por estes eminentes cientistas:

⁵² Obras de barragens, tuneis, canais, pontes e viadutos.

⁵³ VENKATRAMAIAH, C. *Geotechnical Engineering*. New Delhi: New Age International, 2006. p. 262.

⁵⁴ Charles-Augustin de Coulomb, engenheiro militar e físico francês (1736-1806).

⁵⁵ KRYNINE, Dimitri P. *Soil Mechanics, Its Principles and Structural Applications*. New York: McGraw-Hill, 1947. p. 151-155.

⁵⁶ Christian Otto Mohr, engenheiro civil alemão (1835-1918).

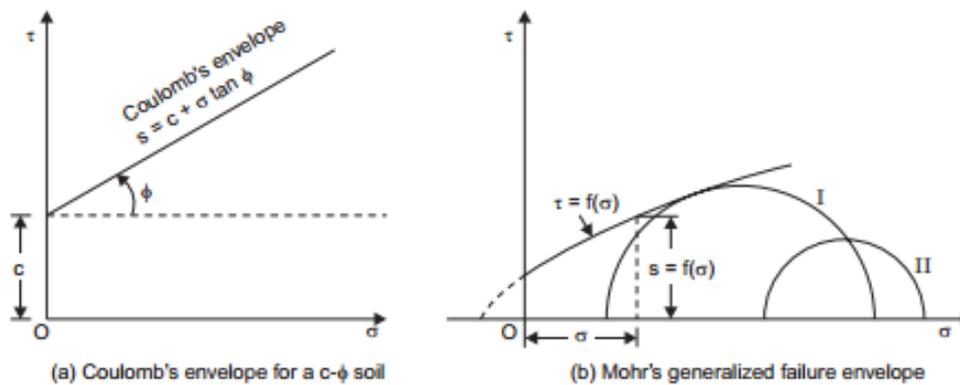


Figura 24: Critérios de ruptura dos solos, por Coulomb (a) e Mohr (b).

Fonte: Venkatramaiah (2006), p. 284.

Com isso é possível estabelecer, como bem apresentam Terzaghi (1943)⁵⁷ e Vargas (1977)⁵⁸, uma equação fundamental ao critério de ruptura, nascente da regressão linear (teórica) dos diversos tipos de tensões principais e tensões confinantes:

$$\tau_R = c + \sigma \tan \phi$$

Sendo:

c: intercepto da linha envoltória de Mohr-Coulomb, no eixo das tensões cisalhantes (τ);

σ : tensão atuante no plano de ruptura, a qual pode ser total ou efetiva;

$\tan \phi$: que representa o coeficiente angular da reta, o ângulo de atrito da envoltória de tensões.

A seguir na Figura 25, apresentam-se 2 (duas) representações teóricas de (a) solos não-coesivos e de (b) solos coesivos, sobre a perspectiva dos critérios de ruptura de Mohr-Coulomb.

⁵⁷ TERZAGHI, Karl. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943. p. 24.

⁵⁸ VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977. p. 317.

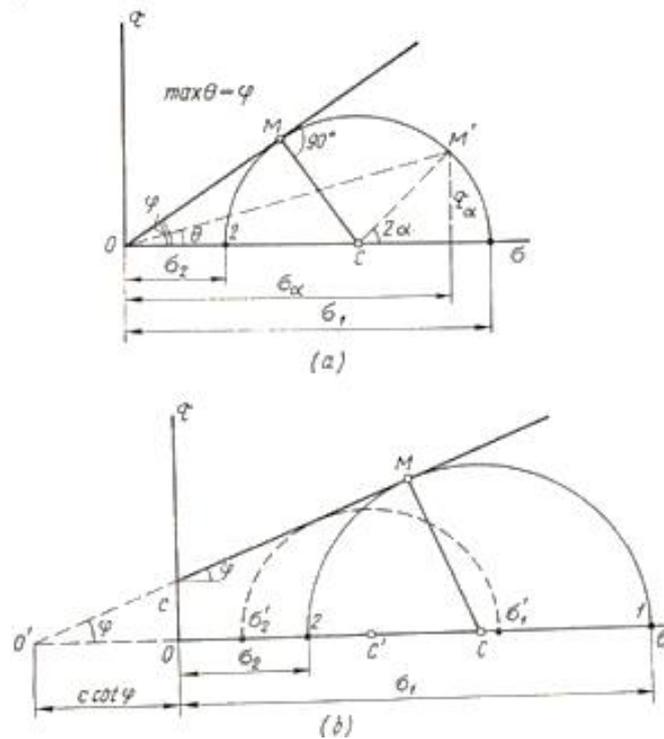


Figura 25: Diagramas de estados últimos de tensões de solos (a) não-coesivos e (b) coesivos.
Fonte: Tsytovich (1976), p.59.

Por fim, cumpre observar para a tensão principal escolhida e a tensão confinante corolária à profundidade, há de fazer as devidas correlações matemáticas para se encontrar o ângulo de ruptura da amostra ensaiada ou, comparar aos resultados obtidos em laboratório, tal como $\phi = (\alpha - 45^\circ) * 2$, sendo ϕ o ângulo de atrito da envoltória e α o ângulo de ruptura da amostra (vide a Figura 26 a seguir), além de $\phi = \arcsen\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right)$, entre outras. Na Figura 26, segue a visualização da construção da envoltória de resistência ao cisalhamento.

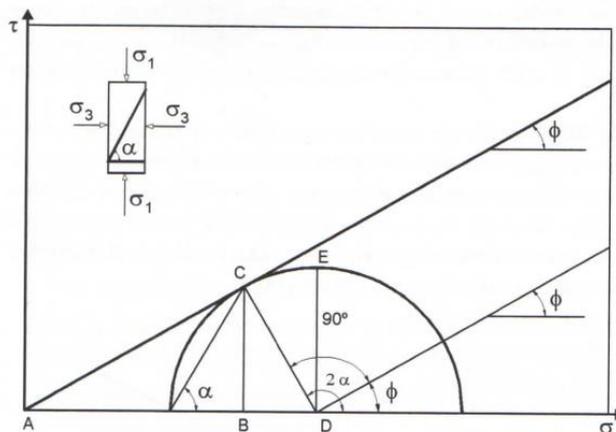


Figura 26: Representação gráfica da envoltória de resistência ao cisalhamento, por Mohr e Coulomb.
Fonte: Pinto (2006), p. 264.

O TRB (1978)⁵⁹ define como as principais causas de movimentos de massa, o incremento de tensão cisalhante (*shear stress*):

A remoção do suporte lateral é o mais comum de todos os fatores que levam à instabilidade, e inclui as seguintes ações: 1. Erosão por (a) córregos e rios, que produzem a maioria das vertentes naturais que são sujeitas a deslizamento...(Grifei).

Isso serve para reforço do argumento que o estudo das tensões cisalhantes (causas e efeitos) se faz ímpar, uma vez que toda teoria do equilíbrio do maciço nele se baseia.

Em estreita correlação com que aqui foi explanado, ao se desenvolver a pesquisa, consta no rol obrigatório dos ensaios uma completa avaliação dos critérios de ruptura, seja pelo cisalhamento direto, seja pelo ensaio triaxial (nos espectros *CD*, *CU*, *UU*), pois o ciclo de ações/fatores neles se encerra, com a ruptura e desfazimento do maciço das margens atingidas e reinício do ciclo em outro lugar.

2.6. Fatores extrínsecos ao fenômeno

Apresentados os fatores intrínsecos ao solo que em muito se correlacionam ao fenômeno *sub examine*, passa-se agora a tratar das questões externas ao solo que também possuem relevância na ocorrência ou agravamento das terras caídas. Todos os fatores aqui narrados têm origem natural (advém das forças e da readequação da própria natureza). Numa concepção inicial, havia o fator antropogênico, que era responsável pelo desmatamento incontrolável e remoção da camada vegetal que compunha certa estabilidade às margens. No entanto, as pesquisas e leituras sobre a questão demonstraram que a ação humana, para nós, nesse caso exclusivo, é menor e de pouca influência, posto isso, a ação não foi apresentada.

2.6.1. As características fluviais do rio de ocorrência

Ao analisarmos os rios de ocorrência das terras caídas, há o imperativo de verificarmos alguns fatores da vasta gama de propriedades e características fluviais,

⁵⁹ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. ***Landslides – Analysis and Control***. Washington, D.C.: Mildred Clark, 1978. p. 26-27.

tal como se desenvolve o escoamento (a), as velocidades (b) e o regime de pressões (c) (normais e tangenciais).

- a. Escoamento: é a parte vital do ciclo hidrológico, Tucci *et al.* (2004)⁶⁰ citam o escoamento sendo regido por leis físicas e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade (apresentadas na Figura 27). O comportamento do escoamento é descrito por equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

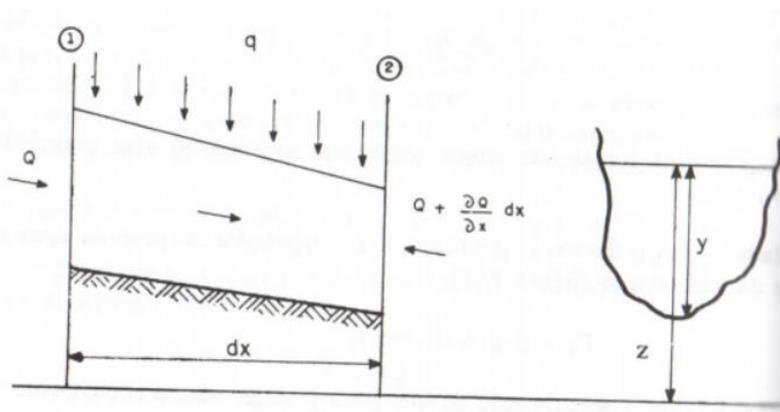


Figura 27: Escoamento não-permanente um trecho de rio.
Fonte: Tucci *et al* (2004).

Os rios em avaliação (Solimões e Amazonas) apresentam todas as características de regime não-permanente, em que se deve considerar a variação no tempo e no espaço dos gradientes de velocidade, forma da seção e nível de água.

- b. Velocidade: na obra de Silva (2003)⁶¹, é apresentada a questão da velocidade nos escoamentos em rios, inclusive com o exemplo do rio que afeta diretamente este estudo, os rios Solimões e Amazonas (Figura 29). A velocidade (representada na figura a seguir), pode ser descrita como $V = v(y)I_y + v(s)I_s$, onde “y” e “s” indicam a direção vertical e transversal do escoamento e I_y e I_s são os vetores unitários nas mesmas direções. Entretanto, a velocidade (na seção transversal de estudo) nestes casos tende a ser substituída por uma velocidade média. Na Figura 28 e Figura 29 a seguir, temos a representação de como se dá a velocidade numa seção genérica de um rio e

⁶⁰ TUCCI, Carlos; SILVEIRA, André; *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2004.

⁶¹ SILVA, Rui Carlos Vieira da. **Hidráulica fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003.

um case real, nos rios Solimões e Amazonas. A velocidade está diretamente relacionada ao regime de pressões que será logo mais apresentado.

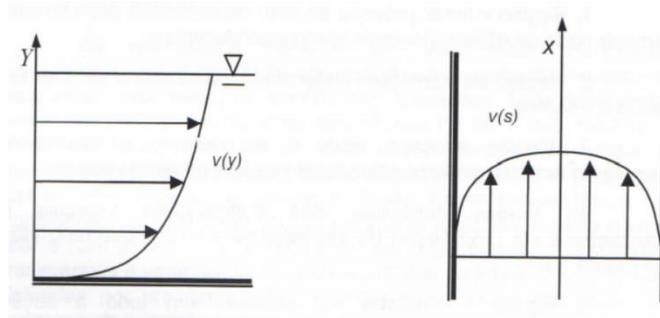


Figura 28: Distribuição vertical e horizontal da velocidade numa seção transversal genérica de um rio.
Fonte: Silva (2003).

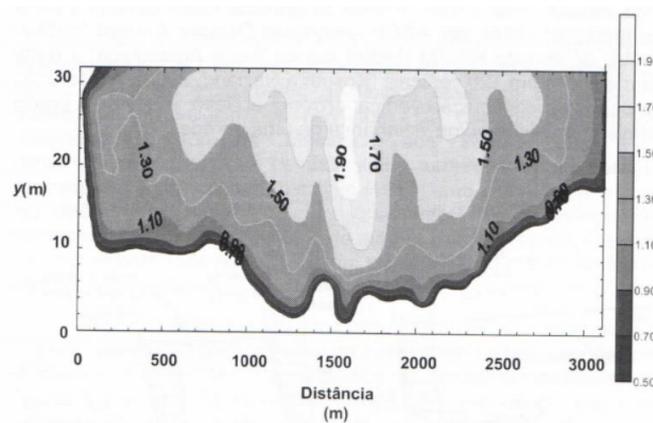


Figura 29: Distribuição de velocidades (por isolinhas) na seção do rio Solimões em Manacapuru/AM.
Fonte: Silva (2003).

- c. Regime de pressões: o regime das pressões se subdivide na pressão hidrostática, que nada mais é que o peso por unidade de área de uma coluna líquida acima deste ponto (vide as Figura 30 e Figura 31). No entanto, as tensões que mais nos interessam são as tensões tangenciais, que se desenvolvem ao longo do leito do rio, que afetam diretamente as margens acometidas pelas terras caídas. O esquema que segue ilustra a forma em que as tensões se procedem.

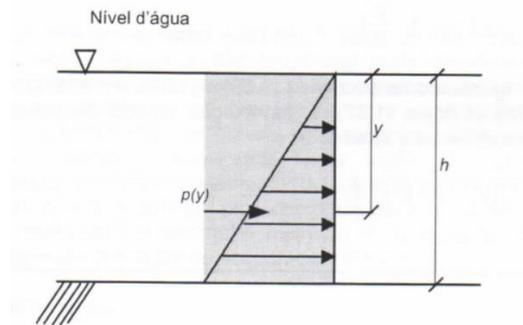


Figura 30: Diagrama de pressão hidrostática.
Fonte: Silva (2003).

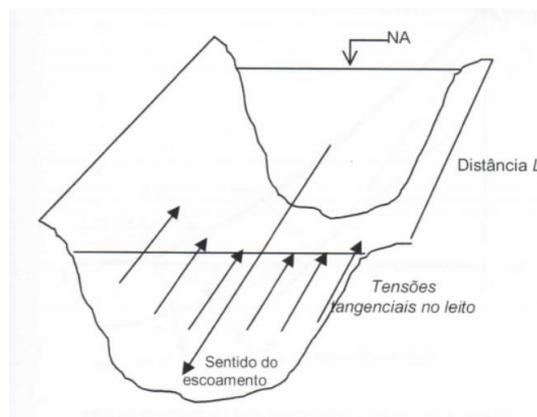


Figura 31: Diagrama simplificado de tensões tangenciais num trecho de rio.
Fonte: Silva (2003).

O cálculo, no entanto, pode ser definido pela seguinte expressão: $\tau_0 = \gamma \left(\frac{dA}{d\lambda} \right) S_0$, sendo S_0 a declividade do trecho e a derivada da área da seção “A” em função do índice λ , que representa a distância medida ao longo do perímetro molhado que em definição, representa a variação do raio hidráulico ao longo deste mesmo perímetro. A sua resposta gráfica na Figura 32. Observa-se uma quantidade de energia relevante que atinge as paredes da seção, que representa a resposta (reação) do leito contra a correnteza (velocidade), porém, nas terras caídas logo se observa que essas “paredes” tendem a sucumbir a essa e a outras forças (analisadas anteriormente).

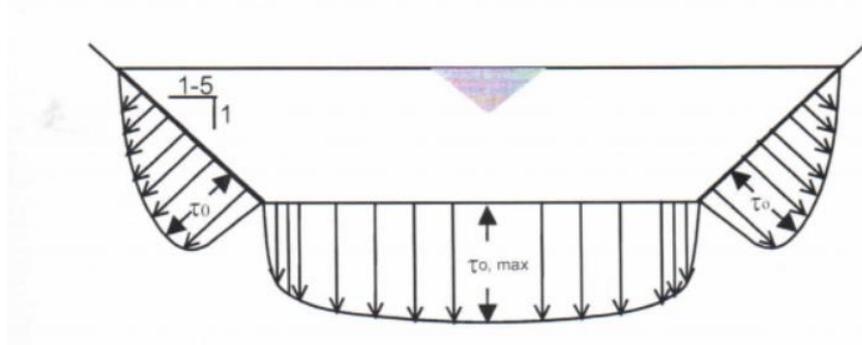


Figura 32: Distribuição transversal de tensões tangenciais numa seção genérica de rio.

Fonte: Silva (2003).

Carvalho (2006)⁶² cita que as razões para a ocorrência das terras caídas são justamente conexas à dinâmica fluvial:

A água é o principal agente da dinâmica de um sistema hidrográfico. Sua ação tanto pode ser mecânica quanto química. Ao se precipitar ou quando escoar dentro do canal, por exemplo, **a água atua principalmente como agente mecânico**, mas também como agente químico. No entanto, ao escoar superficialmente ou quando percola no solo e subsolo, a água em contato com outros minerais, atua também como um agente químico, pois além da sua composição a mesma transporta elementos dissolvidos que atuam como reagentes dentro do sistema. (Grifei).

2.6.2. O Clima na região de estudo

Fisch *et al.* (1999) *apud* Magalhães (2011)⁶³ bem citam que a Amazônia se situa na região equatorial e possui um clima quente e úmido, com precipitações médias na casa do 2.300mm/ano. Prossegue Magalhães, em citar Horel *et al.* (1989) que traz o importante dado, que é justamente a radiação média incidente na região no valor de 15MJ⁻²dia⁻¹. Esta combinação de fatores, aliada ainda a floresta (cobertura vegetal), gera em simples palavras, o “domínio climático mais chuvoso do continente americano”.

⁶² CARVALHO, José Alberto Lima de. **Terras Caídas e consequências sociais: Costa do Miracauera – Paraná Trindade, Município de Itacoatiara – AM, Brasil**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia), 2006. p. 68.

⁶³ MAGALHÃES, Regiane Campos. **As características físicas, químicas, mineralógicas e hidráulicas do solo e sua susceptibilidade ao processo de terras caídas: comunidade Divino Espírito Santo – Iranduba/AM**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM (Dissertação de Mestrado em Geografia), 2011. p. 29.

Importante dado, sobre a questão climatológica em epígrafe, é trazido por Bandeira *et al.* (2018)⁶⁴, mais propriamente a pluviosidade como um fator que desencadeia o processo erosivo:

Os principais fatores climáticos que influenciam a erosão das margens dos rios estão relacionados a fortes chuvas e ventos fortes. **A precipitação média anual na Amazônia é de aproximadamente 2.205mm, mais de 25% superior à média nacional de 1.761mm (ANA 2009). No geral, a estação chuvosa na região amazônica ocorre de novembro a abril ou de dezembro a maio, dependendo do município (CPRM 2011).** Essa precipitação está relacionada à alta disponibilidade hídrica superficial de 73.748m³/s, aproximadamente 80% da disponibilidade superficial do Brasil (91.071 m³/s) e 10,5% da disponibilidade de água doce da Terra (ANA 2015). (Grifei).

⁶⁴ BANDEIRA, Iris C. N.; *et al.* ***Terras Caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon?*** Springer Environmental Earth Sciences. In: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7405-7>. 2018. p. 6.

3. MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS APLICÁVEIS

No intuito de realizar a contento os objetivos da pesquisa sobre o tema com plano de atuação no estado do Amazonas, desenvolver-se-á um conjunto de métodos e práticas que aliados às referências bibliográficas, às instalações laboratoriais disponíveis pelo programa de Mestrado e outras que podem ser acionadas futuramente. Posto isso, seguem os 5 (cinco) eixos, ou etapas fundamentais planejadas, além de suas sub-etapas para desenvolvimento otimizado da pesquisa:

3.1. Das investigações *in loco* e da coleta

O material fundamental como dito anteriormente é o solo, logo, deve-se obediência precipuamente às lições e normas atinentes à Geotecnia (Mecânica dos Solos, Mecânica das Rochas e Geologia de Engenharia), para tanto, usar-se-á para prospecção do solo (ou investigação do solo) nas áreas de ocorrência do fenômeno em estudo. Para isso, serão aplicados:

- 3.1.1. Valores para comparação resistência do solo obtida pelo *SPT – Standard Penetration Test*, matéria disciplinada pela NBR 6.484 (ABNT, 2001);
- 3.1.2. Retirada de amostra indeformada para posteriores ensaios mecânicos, uma vez que esta retratará com aceitável aproximação as características da estrutura natural do solo. Matéria pertencente à NBR 9.820 (ABNT, 1997) para amostrador de paredes finas (tipo Shelby), ou, procedimento cada coleta de amostra prismática, geralmente doutrinado pela bibliografia, *e.g.*, Pinto (2006);
- 3.1.3. Determinação da massa específica *in situ* para comparação com a obtida a posteriori em laboratório, disciplina da NBR 9.813 (ABNT, 2016) e da NBR 7.185 (ABNT, 2016);

Outros testes e caracterizações poderão ser adicionadas para complementar e corroborar dados desta pesquisa.

3.2. Dos materiais (caracterização, classificação, preparo e ensaio)

Com os materiais (diferentes tipos de solos) coletados nos locais de ocorrência do fenômeno, passa-se agora a fase experimental desenvolvida em sua integralidade nos laboratórios do programa de pós-graduação, onde podemos fazer a breve

distinção entre dados obtidos via caracterização e índices físicos e outros dados que serão coletados por meio de ensaio da recriação da estrutura.

A rigor, ambos são ensaios, entretanto, faz-se essa distinção a fim de classificar ensaios aplicados unicamente ao solo e testes que serão aplicados à estrutura formada pelos diferentes tipos de solos e por outros materiais que por ventura podem ser incorporados ao solo para desenvolvimento dos maciços para testes e modelagens:

- 3.2.1. Determinação do volume total das amostras, massa total das amostras, massa total seca e massa específica dos sólidos, este último normatizado pela NBR 6.458 (ABNT, 2016);
- 3.2.2. Ensaio de granulometria para verificação da composição do solo, por meio da NBR 7.181 (ABNT, 1984);
- 3.2.3. Determinação do limite de liquidez, para verificação da umidade que o solo passa à fase líquida, via NBR 6.457 (ABNT, 2016);
- 3.2.4. Aferição do limite de plasticidade, para coleta da umidade pela qual o solo passa do estado plástico (maleável) ao estado. Disciplina da NBR 7.180 (ABNT, 2016);
- 3.2.5. Classificação dos solos, geralmente correlacionado aos limites de plasticidade e granulometria obtidos pelos ensaios retromencionados;

Outros ensaios adstritos ao tema, ou materiais que possam vir a compor a pesquisa, principalmente sobre a composição química destes.

3.3. Ensaios aplicáveis à estrutura formada

- 3.3.1. Compactação dos solos, ou, a densificação por meio de equipamentos (de variável energia). Proporciona o aumento do contato dos grãos e torna a estrutura montada mais homogênea, trazendo outros benefícios como aumento de resistência e baixa deformabilidade. Este ensaio é um passo fundamental ao desenvolvimento de corpos-de-prova para os ensaios subjacentes. Este se encontra disciplinado pelas normas NBR 6.457 e 7.182 (ABNT, 2016 para ambos);
- 3.3.2. Grau de compactação de solos, técnica desenvolvida para verificação e controle da compactação realizada in loco com a projetada em laboratório,

disciplinada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT através da norma 108 (DNIT, 2009);

3.3.3. A determinação do coeficiente de permeabilidade dos solos granulares por meio da NBR 13.292 (ABNT, 1995);

3.3.4. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável tal como na NBR 14.545 (ABNT, 2000);

3.3.5. Ensaio de cisalhamento direto para verificação da coesão e ângulo de atrito (critérios estabelecidos por Coulomb). A realização é simples, aplica-se a tensão constante num plano e em seguida se aplica uma carga variável no outro plano da amostra a fim de rompê-la por cisalhamento (PINTO, 2006).

3.4. Construção e teste de modelo em escala reduzida do fenômeno

Para que se construa tal modelo, serão aplicados muitos dados do item anterior, tal como umidade ótima para compactação para constituição da margem afetada pelo fenômeno das terras caídas, grau de compactação para controle de qualidade do maciço confeccionado e os coeficientes de permeabilidade de solos arenosos e argilosos. Para o modelo reduzido de percolação, pode-se tomar como base os excelentes trabalhos desenvolvidos por Marques & Ferreira (2009) e por Marques & Unas (2010) no tocante aos experimentos reduzidos de percolação em solos tal como Pinto (2006) expõe no bojo teórico de sua obra e percolação em barragens de aterro, do modo como Vargas (1977) prelecionou.

Conforme visualizado nos trabalhos supracitados, faz-se extremamente necessário um tanque, mais propriamente uma bancada de estudos para permeabilidade em maciços de solos. Este é um equipamento que o Programa não possui, no entanto, o curso de graduação em Engenharia Civil da casa, o tem em seu Laboratório de Hidráulica, Hidrologia e Saneamento, o qual está em pleno funcionamento e disponível ao uso. A bancada (modelo XL52.1, da empresa Labtrix Indústria de Bancadas Técnicas LTDA) na Figura 33 que segue, é apta a ensaiar a Lei de Darcy⁶⁵ e também os maciços de solos, que serão no estudo apresentado, as

⁶⁵ Vide o item **2.5.3. Permeabilidade, Percolação e Redes de Fluxo.**

margens afetadas pelas Terras Caídas, observadas por uma ótica qualitativa⁶⁶ apenas.



Figura 33: Bancada de Ensaios de Permeabilidade.
Fonte: Labtrix (2016).

3.5. Modelagem Computacional (Aplicação do softwares GEO5[®] e Geostudio[®])

O cálculo da estabilidade de taludes não é obtido por um modelo matemático uno, uma vez que há o Método de Fellenius, de Bishop, de Janbu, de Morgenstern-Price, entre outros, como bem demonstra o trabalho de Freitas (2011)⁶⁷. Apesar de bastante difundidos, mostram-se demasiadamente extensos, morosos e repetitivos. Assim, por uma questão de melhor avaliação dos fatores de segurança inerentes aos maciços, otimização dos modelos e possibilidade de visualização de uma gama mais ampla de dados, aplicaram-se os *softwares* citados anteriormente ao modelo padronizado, sendo o GEO5[®] obtido e utilizado por licença-teste, no *site*⁶⁸ do próprio fornecedor no Brasil e o Geostudio[®] (subprogramas *Slope-W* e *Seep*) fora obtido por

⁶⁶ A avaliação quantitativa buscará os aspectos subjetivos das Terras Caídas, suas particularidades, como a forma de ruptura. Para uma pesquisa em termos quantitativos seriam necessários outros instrumentos (inalcançáveis no momento) para verificação experimental da mecânica de ruptura, variação dos níveis de água no maciço, adensamento, entre outros aspectos.

⁶⁷ FREITAS, Marco Antônio Coelho. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Porto (POR): Universidade do Porto – U.Porto. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Geotecnia), 2011.

⁶⁸ <https://www.finesoftware.com.br/>. Acessado em 27 de dezembro de 2018.

meio da licença-teste por 30 (trinta) dias junto ao *site*⁶⁹ da empresa canadense Geoslope®.

3.6. Outras normas aplicáveis

Após a reunião de todos os dados e sua devida sistematização *pari passu* a cada uma das etapas anteriores, principalmente daquelas que dependem de ensaios laboratoriais (grande parte deste estudo), além dos dados provenientes de outras fontes como por exemplo o IBGE, CPRM e das próprias revisões bibliográficas poderá se iniciar, ou, para otimização de tempo, dar prosseguimento à redação da dissertação. Dentre as normas citadas, temos:

- 3.6.1. Para os princípios gerais de elaboração de trabalhos científicos a NBR 14.724 (ABNT, 2011);
- 3.6.2. Para realização de citações em trabalhos científicos a NBR 10.520 (ABNT, 2002);
- 3.6.3. Inserção de referências do trabalho acadêmico (dissertação, *in casu*), a NBR 6.023 (ABNT, 2002);
- 3.6.4. Apresentação do sumário, a NBR 6.027 (ABNT, 2012);
- 3.6.5. Redação e formatação do resumo e abstract por meio da NBR 6.028 (ABNT, 2003);
- 3.6.6. Sistematização numérica progressiva no trabalho científico através da NBR 6.024 (ABNT, 2012);
- 3.6.7. Apresentação de critérios básicos para montagem do índice de trabalhos científicos com auxílio da NBR 6.034 (ABNT, 2004);
- 3.6.8. Atualização das normas, normas fixadas pelo próprio programa de pós-graduação, ou, normas apresentadas por congressos e simpósios os quais as pesquisas possam ser apresentadas.

⁶⁹ <http://secure.geo-slope.com/store/catalog.aspx>. Acessado em 18 de janeiro de 2019.

4. DESCRIÇÃO DO LOCAL DA PESQUISA *IN SITU*

4.1. Da descrição geral

A região de estudo escolhida está situada no estado do Amazonas, mais propriamente na circunscrição do município de Careiro da Várzea (com coordenadas geográficas são 3°11'51" S e 59°49'32" W), cuja a sede dista é de aproximadamente 17 km da capital Manaus. Apesar da área de estudo ser no referendado município, o local designado fica ainda mais próximo da capital, cerca de 7 km do Porto da Ceasa (Zona Leste da capital), às margens do rio Amazonas, mas pelo lado direito, das águas barrentas, tal como se depreende das Figura 34 e Figura 35 a seguir:



Figura 34: Área de estudo (inscrita ao retângulo).
Fonte: Google Earth, 2018.



Figura 35: Aproximação da imagem da área de estudo.
Fonte: Google Earth, 2018.

A escolha dessa área advém basicamente da pesquisa bibliográfica realizada sobre os trabalhos regionais, *exempli gratia*, Lopes & Rodrigues (2014)⁷⁰-Tabatinga, Magalhães & Albuquerque (2010)⁷¹-Iranduba, Torres de Freitas & Albuquerque (2010)⁷²-Coari e Carvalho (2006)⁷³-Itacoatiara, que no âmbito da pesquisa *in loco*, buscaram concentrar seus bons ofícios nas regiões banhadas pelos rios de águas

⁷⁰ LOPES, I.R.; RODRIGUES, F.G.S. **Análise das Terras Caídas nas Margens do Rio Solimões em Tabatinga, AM.** *Revista Geonorte*. Manaus: Edição Especial 4, V. 10, p. 55-59. 2014.

⁷¹ MAGALHÃES, Regiane Campos; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha. **Análise do Risco nas Terras Caídas: Consequências Socioambientais na Comunidade do Divino Espírito Santo, Município de Iranduba (AM) – Brasil;** 2010, Porto Alegre. Porto Alegre: XVI Encontro Nacional dos Geógrafos, 2010.

⁷² TORRES DE FREITAS, Francimara; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha. **Análise Temporal sobre as “Terras Caídas” no médio Solimões/Coari – AM.** *Mercator – Revista de Geografia da Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza: V. 11, N. 25, maio-agosto, p. 129-140, 2012.

⁷³ CARVALHO, José Alberto Lima de. **Terras Caídas e consequências sociais: Costa do Miracauera – Paraná Trindade, Município de Itacoatiara – AM, Brasil.** Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia), 2006.

“barrentas”⁷⁴. Há de se fazer também a ponderação que uma área não tão distante do centro de pesquisa (laboratórios desta instituição) facilitando assim, o deslocamento do discente para visitação (barateando os custos com traslado), acompanhamento do fenômeno/observação de campo (que se desenrola durante as vazantes anuais) e das coletas de amostras, que a depender da situação, precisam ser o mais rápido possível caracterizadas e mensuradas pós-coleta (amostras indeformadas).

Do ponto de vista do relevo e vegetação, maiores informações podem ser obtidas no item **2.6 Fatores Extrínsecos do Fenômeno**, no entanto, faz-se um breve relato que em relação ao primeiro, a área se encontra na cota 41m (relativamente baixa, se observamos a cota de Manaus⁷⁵, que é 92m) em relação ao nível do mar. A predominância é a planície (terras de baixa variação de altitude), sendo o destaque dado às aluviões – as deposições de material (a partir da remoção de material inconsolidado) nas margens dos principais tributários que compõem o complexo de rios amazônicos – Matos & Nogueira (2014)⁷⁶. A vegetação clássica de várzea marginal, que ao receber, nas palavras de Sioli (1964) *apud* Suçuarana (2015)⁷⁷, a maior quantidade de sedimentos (e também aqueles de maior dimensão), apresenta as espécies arbóreas como a sumaúma, assacu, andiroba e copaíba, além de palmeiras. Abaixo, na Figura 36, um breve esquema da vegetação e os sedimentos que nela atuam.

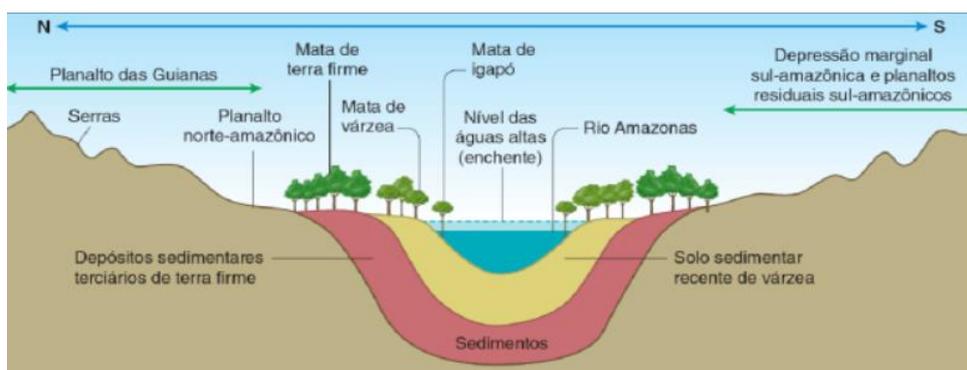


Figura 36: Perfil esquemático (genérico) da Bacia Amazônica.
Fonte: Ferreira, 2016.

⁷⁴ Designação local aplicada aos rios que transportam grande quantidade de sedimentos, ricos em nutrientes.

⁷⁵ Apesar de que na cidade de Manaus/AM podem ser observadas cotas abaixo de 30m.

⁷⁶ MATOS, J.; NOGUEIRA, Regina. **As Terras-Caídas no Careiro de Várzea e as implicações para os moradores da comunidade Miracauera no Paraná do Careiro (Careiro da Várzea-AM)**. *Revista Geonorte*. Manaus: Edição Especial 4, V. 10, p. 128-134. 2014.

⁷⁷ SUÇUARANA, Monik da Silveira. **Várzea**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/biomas/varzea/>>. Acesso em: 12 de abril de 2018.

Sobre a questão climática regional, a área é contemplada predominantemente pelo clima quente e úmido, com temperaturas médias anuais, avaliadas por Ferreira (2016)⁷⁸, na casa de 26,6°C, com a taxa de umidade relativa do ar alta durante todo o ano, com variações de 75,6% a 86,7%. A precipitação, originada no Atlântico (no estado do Pará), encontra-se uma faixa de 2.460 mm/ano, um tanto quanto mais baixa que aquela expressa por Torres de Freitas & Albuquerque (2012).

4.2. Da descrição específica

4.2.1. Visita 1 – 03.11.2017

No dia 3 de novembro de 2017, uma pequena equipe formada pelo mestrando, o seu orientador, Dr. Nilton de Souza Campelo e o Engenheiro Civil e Geólogo José Lucinaldo, realizou a primeira visita de reconhecimento ao local preestabelecido para a pesquisa. Durante uma viagem de 35 (trinta) minutos pelo rio Amazonas, em linha reta a partir do Porto da Ceasa, chegou-se ao extremo do segmento apresentando na Figura 37, que é demarcado como as seguintes coordenadas geográficas 3°06'55" S e 59°51'58" W. Desse ponto em diante, registrou-se por filmagens e fotos, o estado em que se encontrava a margem e como estavam se processando as terras caídas, sendo algumas delas (Figura 37 a Figura 46) apresentadas a seguir (com breves comentários).



Figura 37: Margem afetada pelo fenômeno. Conforme notícia, a mesma sofreu o desmoronamento na noite anterior à visita técnica.

Fonte: Autor, 2018.

⁷⁸ FERREIRA, Álvaro Xavier. **Distribuição e Propriedade Hidráulica dos Solos da Várzea de Curuai, Pará.** Brasília: Universidade de Brasília – UNB. (Dissertação de Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente), 2013.



Figura 38: Observação do fenômeno e das variações de camadas. Apesar da vegetação de porte considerável, as margens parecem desabar à 90° em relação à água. O horizonte de estratificação já apresenta simbólica mudança em relação à imagem anterior.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 39: Desmoronamento recente (cont.). Observa-se as variações de camadas de solo, porém ainda sem clara distinção. Basicamente se trata de sobreposição de aluviões transportados no tempo.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 40: Estratificação em iminente desabamento (circulada em vermelho). É perceptível a distinção entre as cores (e saturação) das camadas da margem da área de estudo.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 41: Estratificação finamente distribuída. Observa-se que as camadas apresentam diferentes tipos de umidade e sua deposição (assentamento). O desprendimento do solo se dá neste local em grandes blocos.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 42: *Variação de camadas e umidades ao longo da margem. Observa-se a formação de fendas no topo da margem e a distribuição de camada de forma aleatória, fruto da aleatoriedade dos sedimentos transportados ao longo do tempo, se comparada as imagens anterior e posterior.*
Fonte: Autor, 2018.



Figura 43: *Reaparecimento das camadas distribuídas de modo organizado e desmoronamento em blocos. Este é um dos possíveis pontos de extração, caracterização e recriação do talude em laboratório.*
Fonte: Autor, 2018.



Figura 44: Variação do horizonte estratigráfico, com destaque à camada mais clara, que em relação as anteriores, apresenta espessura bastante representativa e com umidade aparente mais baixa que as camadas subjacente e sobrejacente.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 45: Outro possível talude representativo, haja vista a distribuição de ao menos três tipos de solo, com destaque a argila vermelha que se propaga de maneira contínua nesta parte da margem.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 46: Imagem das camadas que serão modeladas na reconstrução do fenômeno em laboratório. Novamente há destaque à argila vermelha e as variações perceptíveis da umidade.
Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado nas imagens anteriores (Figura 37 a Figura 46), a distribuição das camadas de solo em muito variam ao longo da margem do campo de estudo. Esse fator se mostra determinante na maneira que os blocos se desprendem e retornam ao rio, para noutro lugar, naturalmente, serem reconstruídos (depositados). Em função disso, a reconstrução do modelo de laboratório, observará rigorosamente como estes tipos de solos se comportam antes, durante e após a cheia do rio, quais as camadas mais suscetíveis às terras caídas, seja pelo viés da percolação, do acréscimo de tensões, das características geométricas, ou da ação conjunta desses efeitos e de outros.

A visita, prosseguiu por cerca de mais de 135 (cento e trinta e cinco) minutos, até as coordenadas 3°07'45" S e 59°53'11" W (fim do perímetro preestabelecido). Com esta vistoria, aliada ao período hidrológico-fluvial do término da vazante e início da cheia (janela de ocorrência) foi possível visualizar com bastante clareza o fenômeno em si e principalmente como deveriam prosseguir os trabalhos da pesquisa: a forma da coleta, onde coletar, o quê coletar e a já compreender (preliminarmente) o enlace entre as teorias explicativas existentes, as referências (pontos de vista dos autores) consultadas e o fenômeno ocorrendo ao vivo. Sem sombra de dúvida uma visita paradigmática às demais que se realizarão.

4.2.2. Visita 2 – 05.10.2018

Em nova visita em caráter de reconhecimento ao local de ocorrência do fenômeno, no dia 5 de outubro de 2018, uma nova equipe foi formada para que se definisse de maneira mais exata (com a assistência de profissionais da Geologia) os possíveis pontos de extrações das amostras para caracterização e simulação. Assim, a equipe formada pelo mestrando, seu orientador e o professor do departamento de Geociências, Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima e mais dois alunos de iniciação científica do curso de Geologia, deslocou-se até as coordenadas 3°07'37,10" S e 59°53'2,40" W, como assinalado na Figura 47 a seguir.

Uma vez nas coordenadas (entrada de uma pequena vila de pescadores do Careiro da Várzea), a equipe desembarcou para caminhar pelas margens no intuito de melhor observar o comportamento “no maciço” para assim marcar por GPS os pontos interessantes às coletas, inclusive com a identificação dos solos que compõem majoritariamente as margens afetadas, sendo os mesmos “batizados” como “Mosqueado” (solo do topo), “Areia” (solo central) e “Cinza” (solo de base).

Conforme pode ser observado nas Figura 47 a Figura 54, o desmoronamento tem sido o subtipo do fenômeno mais recorrente. As camadas de solo (topo, centro e base) puderam ser observadas, porém ainda não-coletáveis, pelo fato do rio ainda estar em processo de descida.

Na visita seguinte como logo mais será apresentado, o rio descera algo em torno de 4m (da cota 21m para 17m, em pouco mais de 52 dias), o que permitiu a observação e coleta de amostras indeformadas e amolgadas para ensaios laboratoriais dos solos previamente definidos (“areia”, “mosqueado” e “cinza”).



Figura 47: Ponto de interesse da coleta, entrada da vila de pescadores no Careiro da Várzea-AM, nas coordenadas 3°07'37,10" S e 59°53'2,40" W.
Fonte: Google Maps, 2018.



Figura 48: Entrada da vila de pescadores, onde se observa com abundância depósitos do solo denominado "Areia" na pesquisa.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 49: Blocos fruto de desmoronamento dos solos “Mosqueado” e “Areia”. Nestes já se observa a ocorrência dos desmoronamentos, com a formação dos blocos de aspecto irregular.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 50: Observação do início do desmoronamento pela fratura do topo do maciço. A camada mais externa (ou do topo), possui característica textural argilo-siltosa. Os espaços vazios representam o desmonte do maciço em vários blocos menores, prestes a serem levados pelo rio.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 51: Movimento vertical do bloco desmoronado. Nesta já é possível constatar a presença de dois dos três solos a serem estudados. Esta descida se mostrou importante para reconhecimento de como se desenvolve a movimentação do maciço.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 52: Visão do bloco desmoronado por dentro. Observa-se a presença marcante do solo dito “Mosqueado” (levemente avermelhado) com bolsões arenosos.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 53: Ocorrência do desabamento. Uma parte do maciço se mantém em balanço pela ação da vegetação e da coesão do solo constituinte. Alguns traços do solo “Cinza” já são notados, porém o nível do rio não permite ainda alcançá-lo.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 54: Camadas do maciço prestes a desabar. Nota-se a presença do solo “cinza”, no entanto ainda inalcançável.
Fonte: Autor, 2018.

4.2.3. Visita 3 – 26.11.2018

Nesta visita foi feita a coleta das amostras indeformadas (em seções de tubos de PVC de 75mm e 100mm, para realização da compressão simples e do cisalhamento direto), amolgadas (material ensacado) e a sondagem à percussão. O ponto inicial foi nas coordenadas 3°07'37,10" S e 59°53'2,40" W (Figura 47), sendo que a parte da equipe ainda se deslocou até o ponto 3°07'42,5" S e 59°53'11,2" W (Figura 55) a fim de recolher as amostras mais representativas ao estudo (solo

“mosqueado” e solo “cinza”). A seguir, algumas imagens (Figura 55 a Figura 65) dos trabalhos realizados nessa visita.

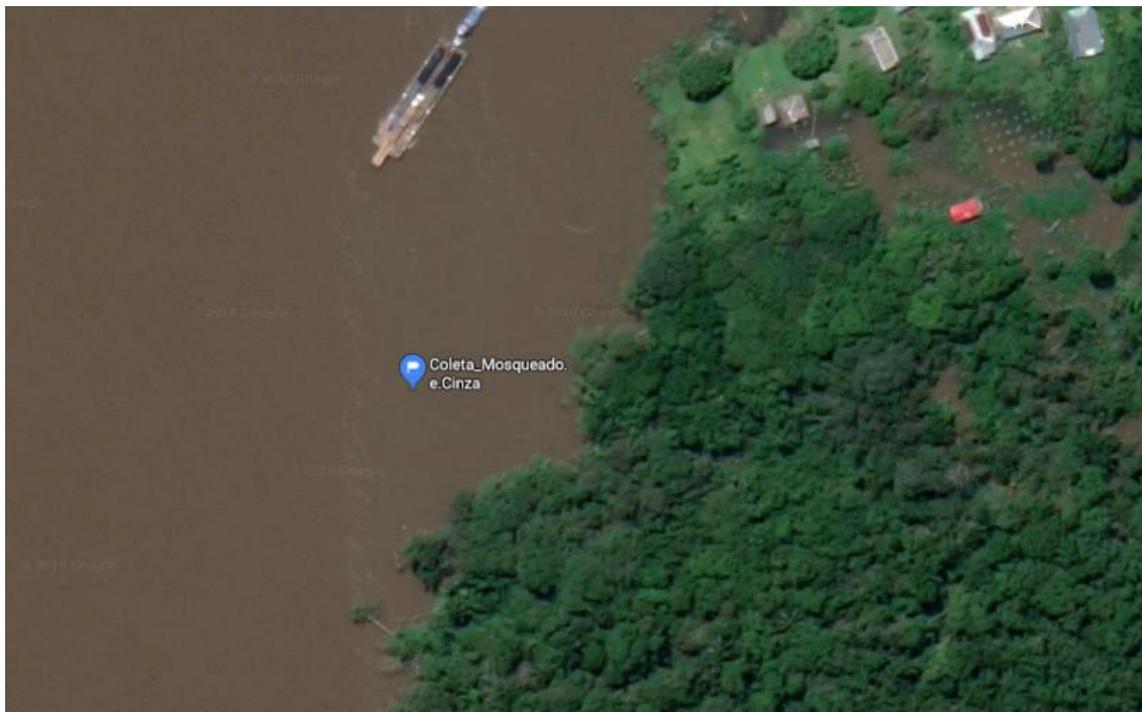


Figura 55: Ponto de coleta dos solos “Mosqueado” e “Cinza”, tidos como mais representativos, nas coordenadas 3°07’42,5” S e 59°53’11,2” W.

Fonte: Google Maps, 2018.



Figura 56: Margem com desmoronamento em blocos. Adiante, observar-se-á a composição dessa parte do maciço em estudo é majoritariamente do solo “Mosqueado” com alguns bolsões arenosos.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 57: Margem em processo simultâneo de desmoronamento e desabamento em destaque.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 58: Observação do maciço representativo. Neste, há a presença das três camadas que este estudo se propõe caracterizar, sendo vermelho para o solo “Mosqueado”, amarelo para o solo “Areia” e verde para o solo “Cinza”.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 59: Ponto de coleta do solo "Areia". Este fica na entrada do vilarejo, nas coordenadas da figura 46.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 61: Abertura da cava para coleta do solo "Cinza".

Fonte: Autor, 2018.



Figura 60: Coleta de amostras indeformadas em tubos de 75mm e 100mm na razão de 1 para 2 (d/h). Similar procedimento foi replicado às demais amostras coletadas.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 62: Amostra do solo "Areia". Destaca-se a bela deposição natural das camadas numa disposição lamelar. Nestes, há a presença do solo "mosqueado", em algumas lentes que proporcionam certa coesão ao bloco.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 63: Amostra "mosqueado". Nota-se os traços de argila avermelhada presentes e da coesividade do solo em destaque.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 65: Equipe de sondagem à percussão para investigação da disposição e resistência dos solos componentes do maciço.

Fonte: Autor, 2018.



Figura 64: Amostras coletadas pela equipe de sondagem à percussão. Vale notar a presença dos solos “mosqueado” e “cinza”, tidos como mais coesivos.

Fonte: Autor, 2018.

Finalmente, de posse de todo o material recolhido em campo (amostras e relatório de sondagem, fotos e filmagens), será possível o trabalho de caracterização dos componentes do maciço (solos) e extração dos dados necessários à realização dos modelos computacionais de estabilidade de taludes e do modelo em escala reduzida na bancada de permeabilidade. De antemão, destaca-se importância dessas (ainda que curtas) visitas de campo para compreensão real da magnitude do objeto da pesquisa, sem estas, o trabalho não passaria de mero expediente de laboratório, o que foge da ideia de pesquisa e da interação entre homem, natureza e ciência.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vencidas as etapas anteriores, apresentam-se neste capítulo, os resultados obtidos por meio dos ensaios laboratoriais atinentes à disciplina, além das discussões que se fazem necessárias à melhor compreensão do assunto. Para tanto, os resultados foram organizados conforme os as áreas de obtenção, tal como realizado no capítulo anterior acerca dos materiais e métodos. Com isso, espera-se que raciocínio se desenvolva sobre o fenômeno das Terras Caídas inicialmente pelo “básico” até as análises mais refinadas (computacionais).

Seguem adiante os resultados obtidos em cada um dos eixos investigativos sobre o fenômeno e as discussões que se mostram pertinentes ao entendimento e desenvolvimento.

5.1. Da investigação *in loco*

A avaliação *in loco* se deu por meio da análise da paisagem, com a descrição dos afloramentos, além do ensaio de sondagem à percussão e coleta de amostras indeformadas e amolgadas. Sobre estas últimas, infere-se que os resultados serão mostrados adiante (uma vez que passam por rigoroso tratamento experimental).

O resultado da sondagem à percussão consta em sua completude no Anexo A (boletim de sondagem). Visto isso, destaca-se a baixa resistência à penetração e consequentemente ao suporte, com N_{spt} variando entre 2 e 3. Dadas as características das amostras observadas (Argilas, Siltes e Areias), temos basicamente a presença de solos moles (àqueles que possuem consistência) e fofos (areias), questão que propõe que solos da localidade estão numa condição ainda de adensamento (o que se comprovará em seguida, em especial observação ao número de vazios - "e").

Os solos encontrados e analisados por meio do ensaio de *SPT*, estão aliados à observação (inicial) estritamente empírica das superfícies das margens (vide a Figura 58 e Figura 65, subitem 4.2.3. Visita 3 – 26.11.2018), onde temos o solo “Mosqueado” mais ao topo e o solo “Cinza” nas camadas mais profundas (a partir de 14m).

Finalmente, o nível de água, o qual se apresentou na profundidade 5m, que aliado às texturas propostas auxiliadas pelo técnico de sondagem e os elevados graus

de saturação (obtidos experimentalmente adiante) para os solos a seguir desta profundidade (uma parte do solo “Mosqueado” e os solos “Areia” e “Cinza”) temos solos distantes de uma configuração de consolidação seja pela água presente, seja pela configuração (disposição) natural das camadas, onde há uma camada de solo arenoso enclausurada (bolsões) entre duas camadas de solos de textura fina, como permeabilidade bastante inferior. A tendência natural é que se mantenha a água no maciço, gerando assim um tempo de consolidação elevado, além do maciço sempre esteja trabalhando com as tensões normais mais elevadas (devido ao coeficiente de permeabilidade baixo) durante o período de rebaixamento do nível de água do rio e, quando submerso, surja a condição de resistência mais desfavorável em razão ao baixo contato grão a grão de solo (também em função da água no solo), em termos de tensões efetivas ($\sigma' = \gamma_{sub} * z$), sendo o γ_{sub} o menor entre $\gamma_{sub} < \gamma_d < \gamma_{nat} < \gamma_{sat} < \gamma_{grãos}$. Destaca-se que a sondagem foi realizada em local abaixo do ponto das principais coletas, como demonstrado na Figura 66 abaixo.



Figura 66: Perfil de elevação do terreno entre o ponto de sondagem (a) e o ponto de coleta (b).
Fonte: Google Earth, 2018.

5.2. Da avaliação por imagens de satélite (Google Earth®)

A avaliação do local de estudo é completa quando é inserimos a avaliação espacial das áreas que presenciam as Terras Caídas. Para tanto, com base as imagens e no potencial da ferramenta em produzir um *Story Telling* da região, escolheram-se 2 (dois) pontos de referência, que naturalmente recaíram no ponto de coleta (coordenadas 3°07'42,5" S e 59°53'11,2" W) e no ponto de sondagem (coordenadas 3°07'37,10" S e 59°53'2,40" W), ambos em relação à margem, que muda conforme o nível do rio e da ocorrência do fenômeno. O resultado disso são os Gráfico 1 e Gráfico 2, fruto da observação de 31 pares de dados presentes na plataforma *online* do Google Earth®, a seguir:

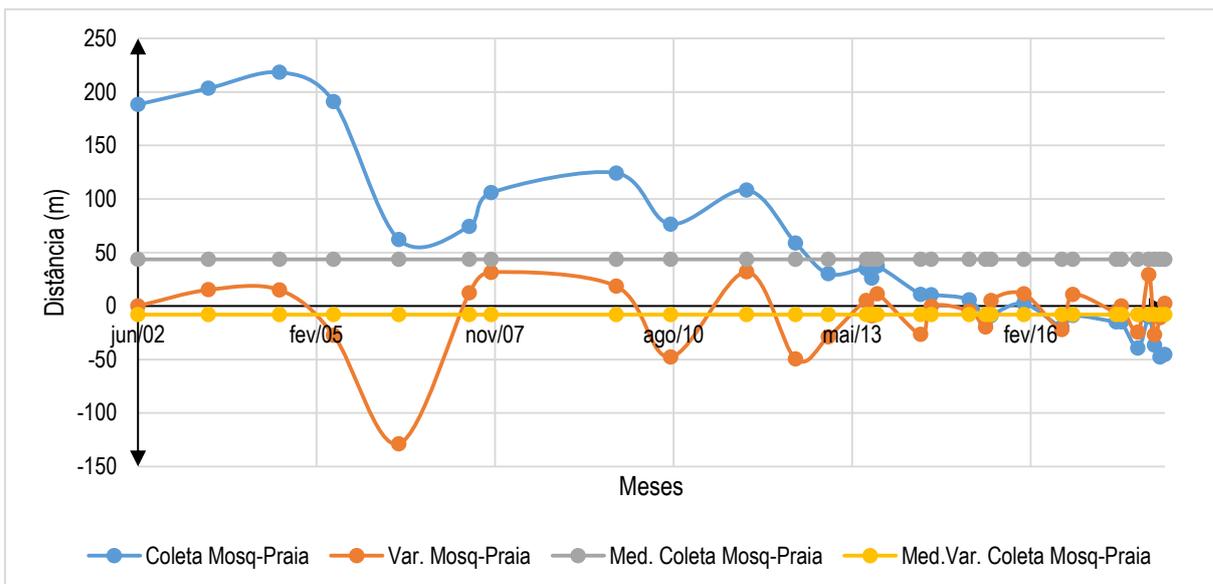


Gráfico 1: Distâncias observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (1969 a 2018).
Fonte: Autor, 2018.

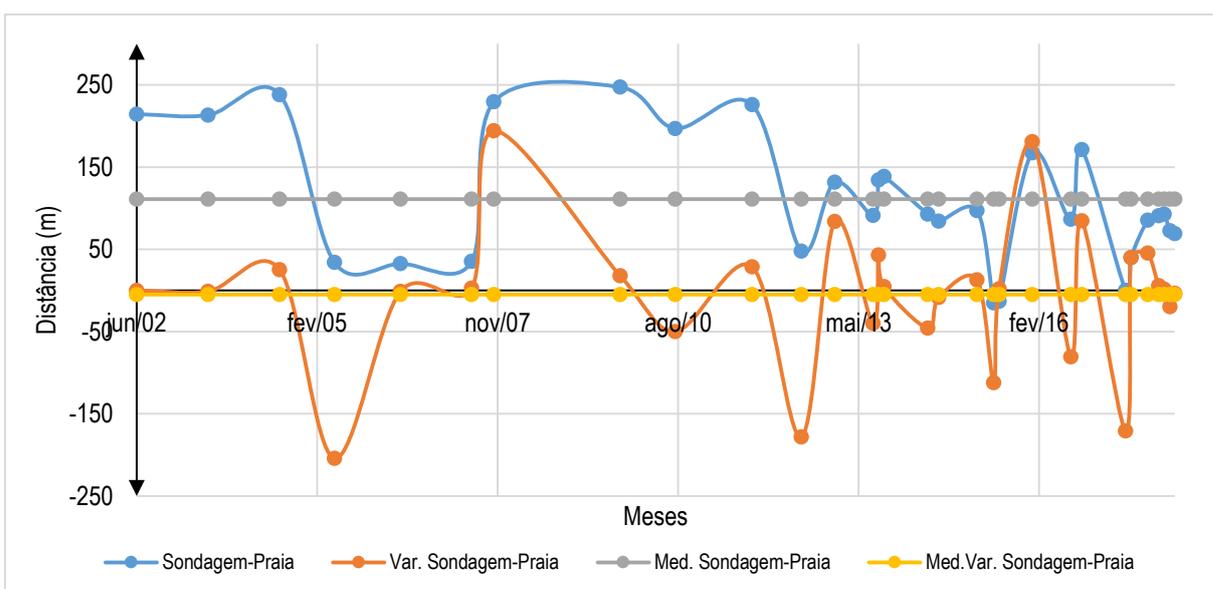


Gráfico 2: Distâncias observadas entre o ponto de sondagem e sua respectiva margem, no tempo (1969 a 2018).
Fonte: Autor, 2018.

Sobre os gráficos cabem alguns apontamentos preliminares à sua interpretação:

- a) As medidas foram tomadas a partir do ponto de interesse, com angulações de aproximadamente 90 graus;

- b) A série de dados que contém o termo “Var.” é a diferença entre o valor posterior e o valor anterior, por exemplo, medida observada em julho de 2018 subtraída da medida de janeiro de 2017 (mais próxima coletada);
- c) As séries de dados que possuem o termo “Med.” são a média dos valores das observações e das variações.

Cumprе registrar, que esta é uma apresentação do todo, sem que se façam as devidas considerações sobre o efeito do nível do rio que margeia os pontos escolhidos, logo, para uma melhor avaliação, isolaram-se alguns meses de interesse para que reste demonstrada a modificação da paisagem (Gráfico 3 e Gráfico 4), seja com a deposição de novas camadas, seja com o transporte das camadas antigas.

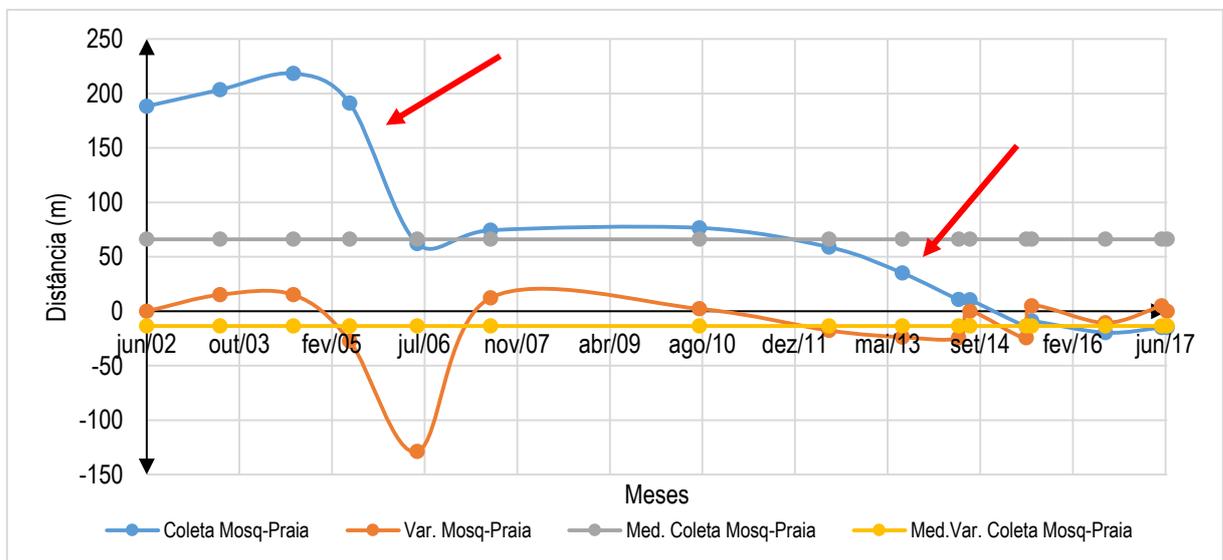


Gráfico 3: Distância observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (apenas nos meses de junho, julho e agosto).

Fonte: Autor, 2018.

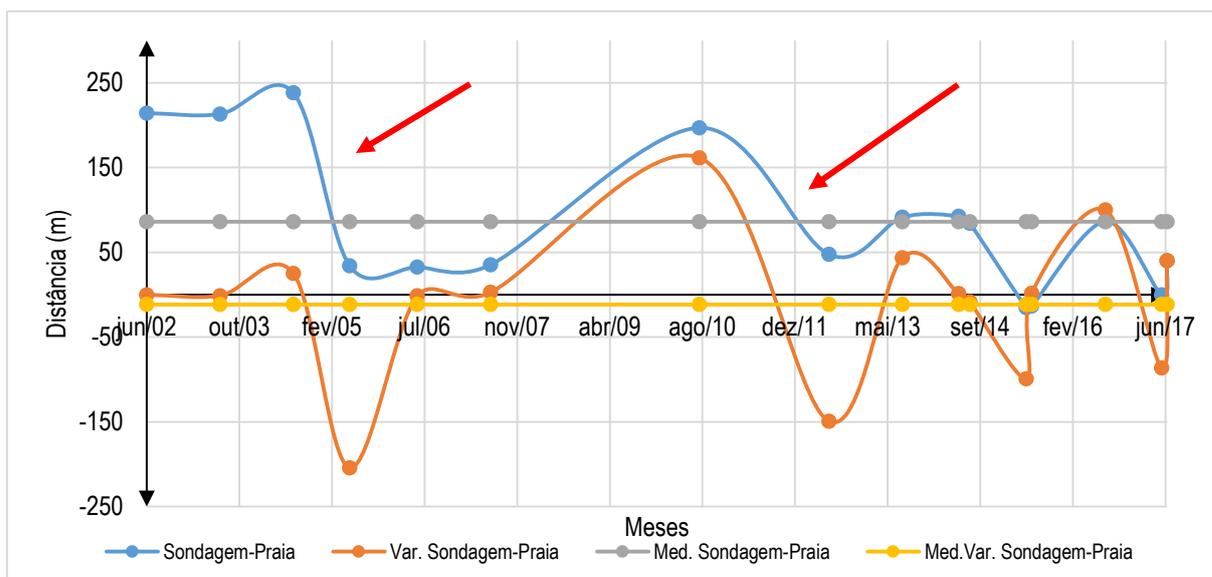


Gráfico 4: Distância observadas entre o ponto de sondagem e sua respectiva margem, no tempo (apenas nos meses de junho, julho e agosto). Com alguns destaques sobre os decaimentos.
Fonte: Autor, 2018.

Estes dois gráficos (Gráfico 3 e Gráfico 4), possuem os dados dos meses de junho, julho e agosto agrupados. Estes meses foram escolhidos por duas razões: a) são os meses que o rio está em processo de descida de nível e b) possuem em nossa pesquisa, a maior quantidade de dados (dezesseis observações registradas). Os gráficos apresentam a sensíveis decaimentos ao longo dos anos (como destacado), no entanto ainda não é possível só por eles inferir se está, ou não ocorrendo a modificação da paisagem, uma vez que pela teoria coletada sobre a mecânica de ruptura, o maciço tende a romper no regresso das águas (meses de estiagem).

Imbuídos desta ideia, reagruparam-se mais alguns dados, só que de um mês tido como mais seco (outubro) para que se observe a modificação da paisagem, o resultado segue nos gráficos (Gráfico 5 e Gráfico 6) a seguir:

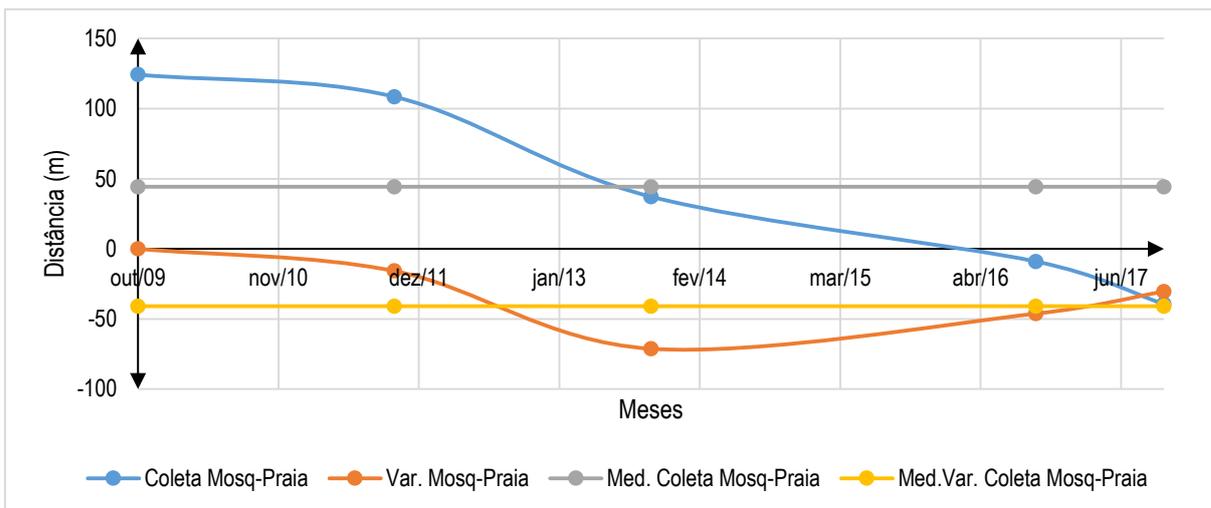


Gráfico 5: Distância observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (apenas no mês de outubro).
Fonte: Autor, 2018.

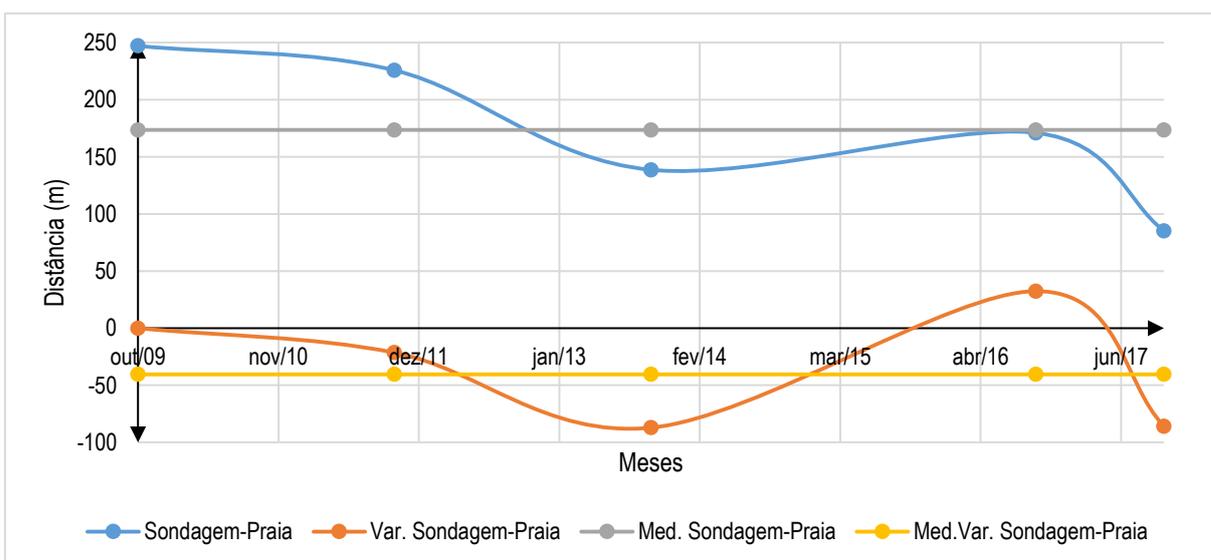


Gráfico 6: Distância observadas entre o ponto de coleta e sua respectiva margem, no tempo (apenas no mês de outubro).
Fonte: Autor, 2018.

A redução das distâncias se mostrou marcante nesta época do ano, principalmente quando se observa a média das variações que restou um número negativo (em torno de 50m). A seguir as Figura 67 a Figura 72, que podem dar uma pequena amostra do que ocorreu em 1969 (primeiro registro de imagem) e algumas imagem dos meses de outubro:



Figura 67: Imagem de satélite de dezembro de 1969, da área de pesquisa. Esta servirá de parâmetro qualitativo às demais imagens que seguem.
Fonte: Google Earth®, 2018.



Figura 68: Imagem de satélite de outubro de 2009. Já é possível observar certa alteração na paisagem na diferença entre o perímetro em vermelho e o perímetro da margem. Esta mudança se figura de maneira negativa (ausência de certa porção da área anterior).
Fonte: Google Earth®, 2018.



Figura 69: Imagem de satélite de outubro de 2011. Registra-se certa modificação na paisagem tanto de ordem positiva, com o surgimento de praias ao norte do ponto de sondagem e do ponto de coleta também e de ordem negativa, uma vez que a distância entre o perímetro-base e a margem continua a aumentar.

Fonte: Google Earth®, 2018.

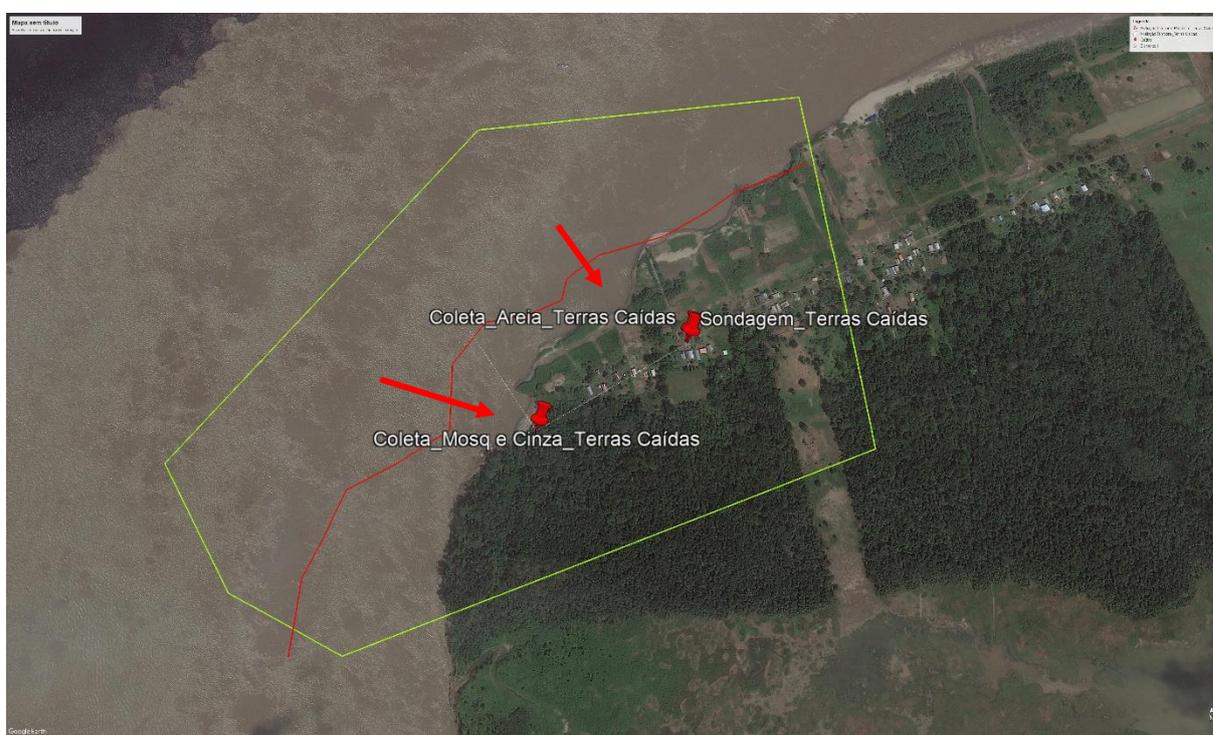


Figura 70: Imagem de satélite de outubro de 2013. Ressaltam-se modificações de ordem negativa, como o desaparecimento de algumas porções de praias em relação ao ponto de coleta e de sondagem.

Fonte: Google Earth®, 2018.

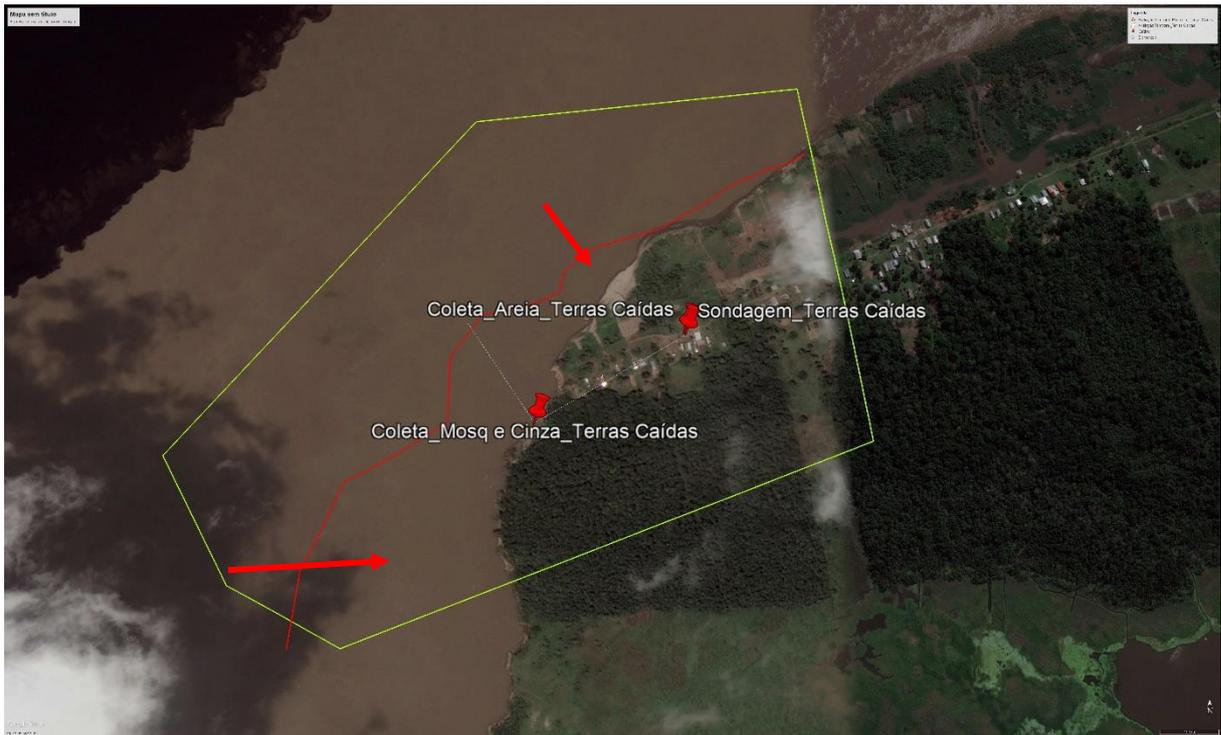


Figura 71: Imagem de satélite de outubro de 2016. Desaparecimento por completo de grandes porções de praias e grande distanciamento do perímetro-base (vermelho) em relação as margens estudadas.

Fonte: Google Earth®, 2018.



Figura 72: Imagem de satélite de outubro de 2017. Modificação sensível da praia ao norte do ponto de sondagem, além do ponto de coleta estar dentro da água. Nesta imagem (data) que foi alcançado o minimum minimorum das observações das distâncias.

Fonte: Google Earth®, 2018.

Apesar da análise aqui posta ser de preponderantemente qualitativa, é possível por alguns dados numéricos simplificados (distâncias), compreender que a natureza e principalmente a força modificativa que ele impõe à paisagem, modificou-a ao longo de pouco menos que cinquenta anos e alterando as vidas que lá se assentam. Fazendo uso dos dados numéricos é possível afirmar que para os meses de outubro observados, houve variação dentre o máximo e mínimo no valor de 164m, ou seja, a grosso modo, em relação ao ponto de coleta havia 124m até a margem, hoje, a margem está a 40m atrás do ponto de coleta. E ainda, a modificação em 160m em relação ao ponto de sondagem e a margem. Esses são dados que chamam muita atenção.

Como dito anteriormente, está é uma avaliação expedita, apenas para pautar a alteração do meio de estudo e dar os devidos encaminhamentos (orientação inicial) a estudos mais avançados, como a coleta e interpretação por meio de sistemas de sensoriamento remoto (SIG), entre outros.

5.3. Da avaliação geológica (geomorfologia e geopedologia)

Como desenvolvido por Rodrigues (2014)⁷⁹, “a bacia amazônica está sujeita aos efeitos da neotectônica relacionada à estrutura do seu arcabouço geológico”.

Conforme a localização dos pontos de coleta, para uma avaliação mais cuidadosa do relevo e da origem aproximada dos solos daquela região, procedeu-se com a busca de dados via sistema de sensoriamento remoto, principalmente nas bases de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Uma vez munido destes dados, lançaram-se os mesmos em *software* de geoprocessamento, para que se montassem os mapas necessários (morfologia e pedologia), sendo estes concentrados na área definida pela Figura 73.

⁷⁹ RODRIGUES, Francisco Gleison de S. **O Conceito de ‘Terras Caídas’ e a Caracterização Morfodinâmica fluvial do Alto Solimões.** *Revista Geonordeste.* São Cristóvão: Ano XXV, n. 3, p. 04-23, 2014. p. 16.

A localização dos pontos de coleta é bastante influenciada pela atuação da dinâmica fluvial, sendo aquilo citado por Tricart (1977) *apud* Pacheco *et al* (2012)⁸⁰:

A dinâmica do rio Solimões/Amazonas, na Amazônia brasileira apresenta variações de descargas que transportam fragmentos de sedimentos móveis, constituídos entre outros, de depósitos argilo-areno-limoso, tendo em algumas áreas de seus tributários (rio Madeira) lentes de seixos, raramente, horizontes de arenito ferruginoso, material resultante da sua formação estrutural.

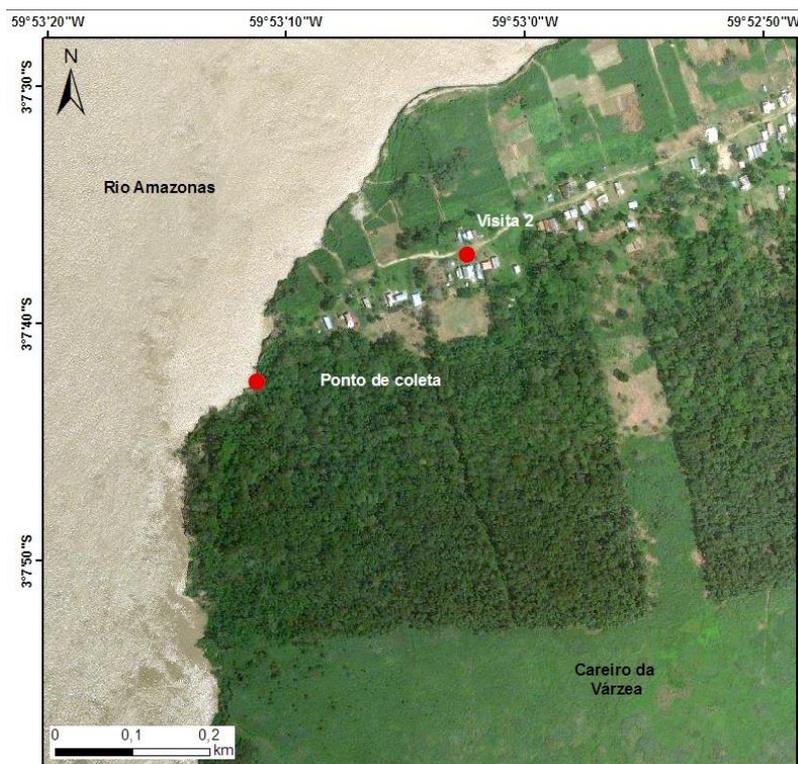


Figura 73: Imagem por satélite em alta resolução do local de pesquisa (coletas e sondagem).
Fonte: Autor, 2018.

Posteriormente a definição do local, o primeiro mapa a ser definido foi de geomorfologia, que diz respeito ao relevo, que foi identificado como planície fluvialacustre, que segundo Pinto (2016)⁸¹ são:

A área de planície de inundação representa **a porção mais plana e baixa do relevo, com cotas que não ultrapassam os valores de 20 metros**, e de declividade muito baixa (0 a 2%), configurada como uma área plana

⁸⁰ PACHECO, Jesuete Brandão; BRANDÃO, José Carlos Martins; CARVALHO, José Alberto Lima de. **Geomorfologia fluvial do Rio Solimões/Amazonas: Estratégias do Povo Vazeano do sudoeste do Careiro da Várzea.** *Revista Geonorte*. Manaus: Edição Especial 4, V. 2, p. 542-554. 2012.

⁸¹ PINTO, Mônica Cortêz. **Correlações entre as Dinâmicas Geomorfológicas e Pecuárias na margem esquerda do Rio Madeira, município de Autazes (AM).** Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Geociências), 2016. p. 77-79.

sujeita as inundações periódicas (...). A planície fluvial **é resultante dos processos de acumulação de sedimentos** e comportam lagos, cordões arenosos, barras de sedimentos e diques marginais, associada aos grandes sistemas fluviais da área de estudo, o rio Amazonas. (Grifei).

Isso posto, a área de estudo é uma formação sucessiva de depósitos de sedimentos, o que explica a grande partição arenosa que consta nas diversas amostras retiradas do campo, as quais também se mostram alinhadas a classificação de origem da próxima parte.

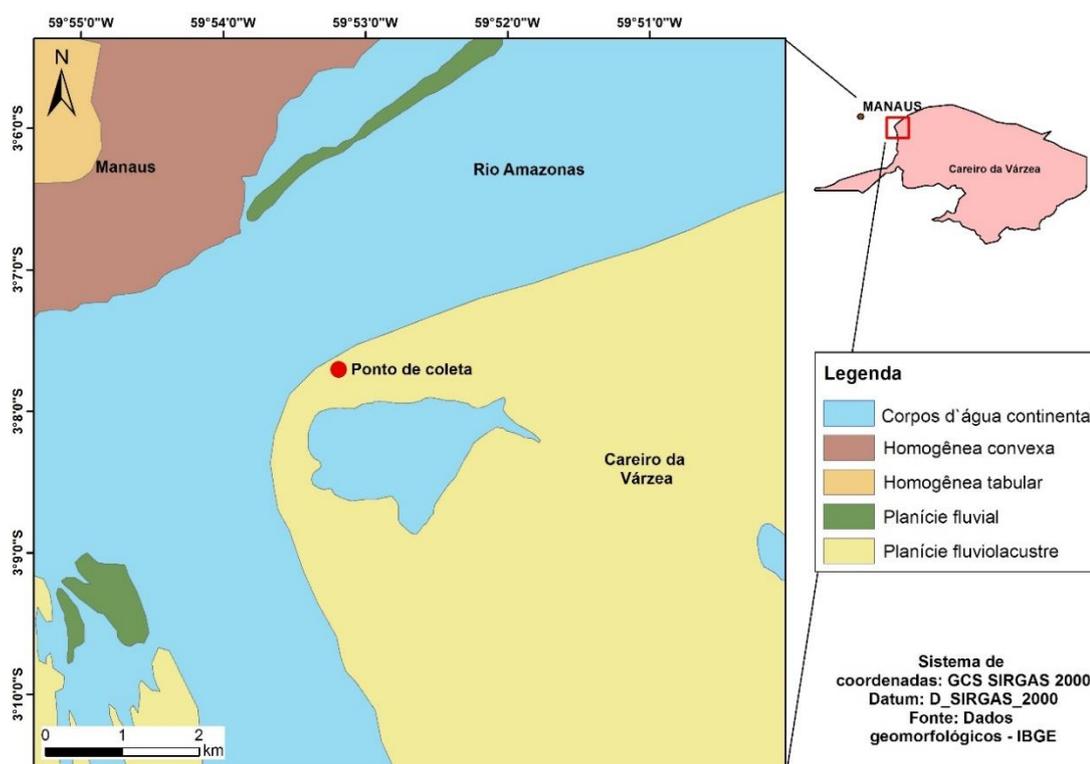


Figura 74: Mapa geomorfológico da área de estudo.

Fonte: IBGE, 2018.

Sobre a origem dos solos, temos conforme o Mapa Geológico do Estado do Amazonas, aquela área é classificada da seguinte forma: Éon Fanerozóico (42 milhões de anos atrás), Era Cenozóica (65 milhões de anos atrás), Período Neógeno (23 milhões e 30 mil anos, até o pleistoceno), época do Holoceno (10.000 anos), sendo a unidade litoestratigráfica de depósito aluvionares: areia, silte, argila e cascalho inconsolidado.

Ainda, no tocante aos aspectos pedológicos, a área de estudo é dominada pela classificação de **Gleissolo Háplico Tb Eutrófico** (Figura 75), que pelo IBGE (2007)⁸², temos uma argila de baixa atividade e alta fertilidade (Tb Eutrófico), sendo do russo *gley*, que significa uma massa de solo pastosa, ou seja, com grande presença de água, sendo o mesmo háplico, significando que o solo é hidromórfico, cinzento, sem mudança textural abrupta, podendo se encaixar ainda no neofluvissólicos, que são os sedimentos aluviais oriundos de várzeas de rios.

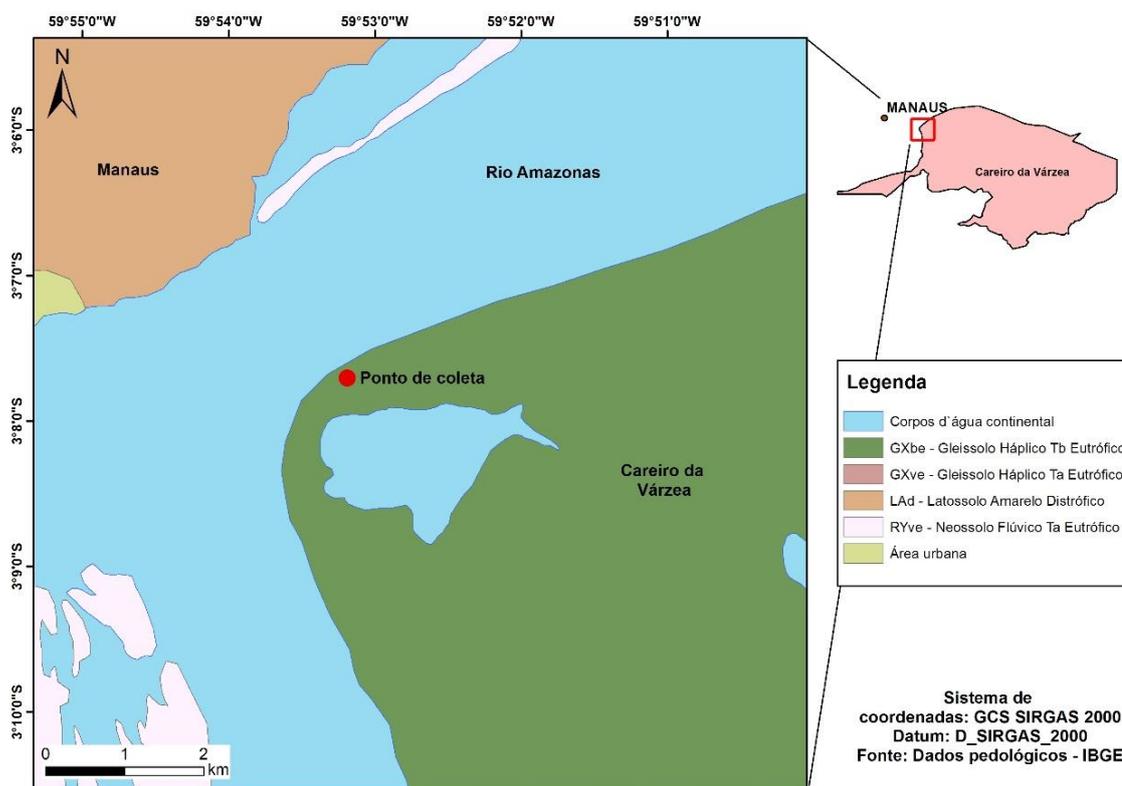


Figura 75: Mapa pedológico da área de estudo.
Fonte: IBGE, 2018.

Complementando as informações do mapa anterior, segue a seguir (Figura 76) um perfil pedológico constituído com as amostras coletadas e suas granulometrias mais representativas, nos referidos pontos, conforme a disposição natural observada tanto no perfil de sondagem (Anexo A) quanto nas visitas (Figura 58).

⁸² IBGE. *Manual Técnico de Pedologia*. Rio de Janeiro: 2ª Edição, 2007.

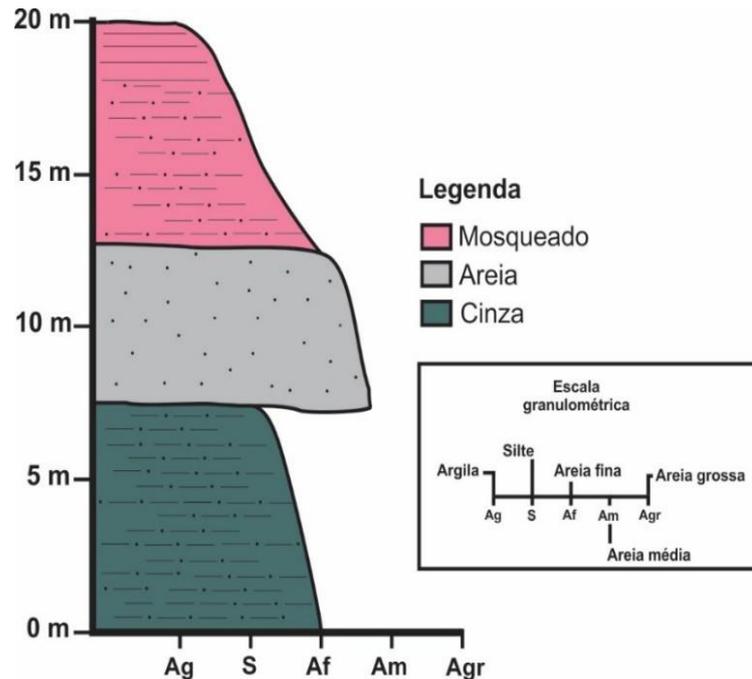


Figura 76: Perfil pedológico do maciço-padrão para análises e simulações.
Fonte: Autor, 2018.

5.4. Dos materiais (caracterização física e mecânica)

5.4.1. Condições iniciais e Índices Físicos

Trazidos os materiais do campo, passou-se a etapa de realização dos ensaios conforme preconizado no capítulo anterior. Em campo, recolheram-se 12 (doze) amostras indeformadas, sendo que foram identificados 3 (três) solos básicos (intitulados no capítulo 3 como “Mosqueado”, “Areia” e “Cinza”) ao estudo, assim se prestaram aos ensaios sobre a estrutura indeformada, 2 (duas) amostras cilíndricas de $\varnothing = 100\text{mm}$ e $h = 20\text{cm}$ e 2 (duas) amostras cilíndricas de $\varnothing = 75\text{mm}$ e $h = 15\text{cm}$. Estas amostras indeformadas basicamente serviram para toda a caracterização básica dos solos (índices físicos) e aos ensaios de compressão simples e cisalhamento direto.

Para os demais ensaios, tais como os limites de liquidez, plasticidade, contração, granulometrias (com e sem a presença de defloculante), permeabilidade à carga variável e recriação do fenômeno em escala reduzida, recolheram-se 2 (dois) sacos de 30kg a 50kg de material já amolgado (solto) de cada solo, pois para estes ensaios, o conhecimento dos índices físicos dos materiais mais próximos da realidade vista em campo (indeformados) podem ser importados com relativa segurança aos

solos amolgados, como por exemplo a correção de umidade para conformação do modelo em escala reduzida, a umidade de saturação completa, entre outros. A seguir, segue a Tabela 5, a qual traz os índices físicos iniciais aos estudos:

Tabela 5: Propriedades Físicas das amostras indeformadas de solos.
Fonte: Autor, 2018.

Solo	γ_{nat} kN/m ³	w_{nat} %	γ_d kN/m ³	γ_g kN/m ³	e adim.	n %	S %
Mosqueado	16	28,72%	12,43	26,26	1,11262	52,67%	67,78%
Areia	15	16,88%	12,83	26,14	1,03683	50,90%	42,56%
Cinza	16,5	38,13%	11,95	26,24	1,19669	54,48%	83,61%

Em vistas à Tabela 5 já é possível inferir que estes valores estão um tanto quanto fora daqueles que geralmente são descritos na literatura (Vargas, Pinto, Aysen, entre outros), principalmente os pesos específicos aparentes secos, por estes estarem baixos em comparação à faixa de 13kN/m³ a 19kN/m³ proposta por Pinto (2002)⁸³. No entanto, pode-se enxergar certa referência destes valores na obra de Das (2010)⁸⁴, onde se apresentam alguns valores nesta faixa para solos de características argilosas, além dos elevados valores de saturação presentes de maneira natural, já se mostram um forte indicativo da tendência da permeabilidade dos solos a serem estudados. O solo “cinza” que é a camada mais próxima da água apresenta o menor valor amostral de peso específico aparente seco em relação aos solos estudados e elevado número de vazios até então, fato este que adiante, terá importância ao estudo da resistência ao cisalhamento, onde a interação entre os grãos (contato grão a grão, o embricamento) é um fator decisivo para definição da resistência efetiva do material.

Fazendo certa correlação à profundidade, é possível notar que o peso específico natural começa de 16kN/m³, passando a 15 e voltando a 16,5kN/m³, com isso há uma camada mais pesada (“mosqueado”) sobre uma mais leve (solo “areia”) e ambas se apoiam sobre outra mais pesada (“cinza”). Entretanto, há também de se considerar a presença relevante da água no preenchimento dos vazios, que faz com que esse peso se torne variável à estação (nível que o rio se encontra conforme a

⁸³ PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. p. 37.

⁸⁴ DAS, Braja M. **Principles of Geotechnical Engineering**. Stamford (USA): Cengage Learning, 2010. p. 60.

época do ano). O aumento do número de vazios conforme a profundidade é um claro anúncio do menor peso específico aparente do solo seco e da menor interação grão a grão.

5.4.2. Análise Granulométrica

Prosseguindo na análise, é imperativo que se tragam maiores informações sobre as características dos solos em observação, apesar de que na Tabela 5, parte significativa dos problemas em Mecânica dos Solos podem ser dado algum direcionamento. Não em nosso caso, pois as Terras Caídas ultrapassam esse tipo de situação do corriqueiro. Assim, segue abaixo o Gráfico 1 que traz as curvas granulométricas dos solos (com e sem deflocação).

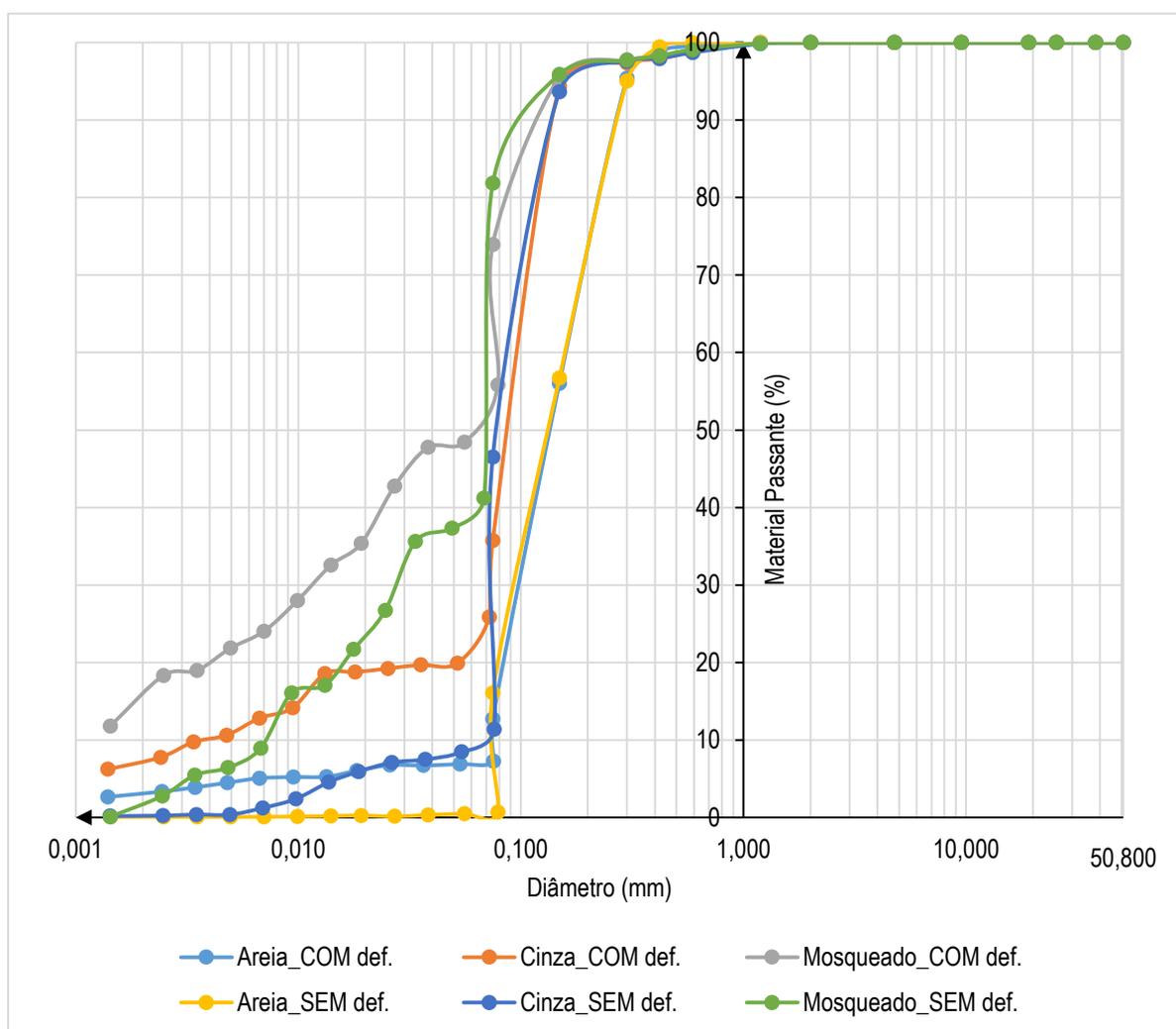


Gráfico 7: Curvas granulométricas dos solos em estudo.
Fonte: Autor, 2018.

Sobre estas, já é possível inferir que:

- a. O solo “mosqueado” apresenta elevada fração de finos em relação aos demais, chegando inclusive a mais 60% em referência a quantidade total de solo ensaiado, sendo que dentro destes a fração de argila se mostra inferior à de silte. Isso proporcionou uma correção da visão empírica sobre este solo, que se acreditava ser composto por uma parcela mais alta de argila (vide as imagens da 1ª e 3ª visitas). No entanto, apesar de menor esta parcela argilosa está bastante ativa, o que será apresentado e comprovado com a realização dos (ensaios) limites de Attenberg;
- b. O solo “areia” e o solo “cinza” foram classificados como solos preponderantemente grossos, sendo que este último por pouco não foi considerado fino (dado que nos ensaios realizados, a porcentagem de finos foi de 35% a 45%), com isso não de se afastar por completo o comportamento de um solo plástico. Vide o Gráfico 2;
- c. O solo “areia” também apresenta certa partição de finos na avaliação com defloculante, e isso se mostrará importante mais adiante quando for feita a avaliação de compressão simples e resistência ao cisalhamento pela possível coesão presente;
- d. O silte tem ganhado certo destaque neste trabalho, principalmente por sua presença em todos os solos e sua capacidade de influenciar o comportamento dos solos (em termos de plasticidade e resistência), como logo mais será visto;
- e. As variações observadas (abertura) entre os ensaios com e sem defloculante para os solos “cinza” e “mosqueado” são indícios do percentual de argila presente nestes solos, que aumenta de 10% a 15% quando utilizado o defloculante, mantendo de certa forma estável o percentual de silte;
- f. Os solos grossos, ou, arenosos apresentam boas medidas de uniformidade e no tocante às medidas de continuidade, a areia tem apresentado valores mais descontínuos e o solo “cinza” se mostrou bem mais contínuo, fato este que influencia seriamente a permeabilidade do solo e em última *ratio* a resistência ao corte.

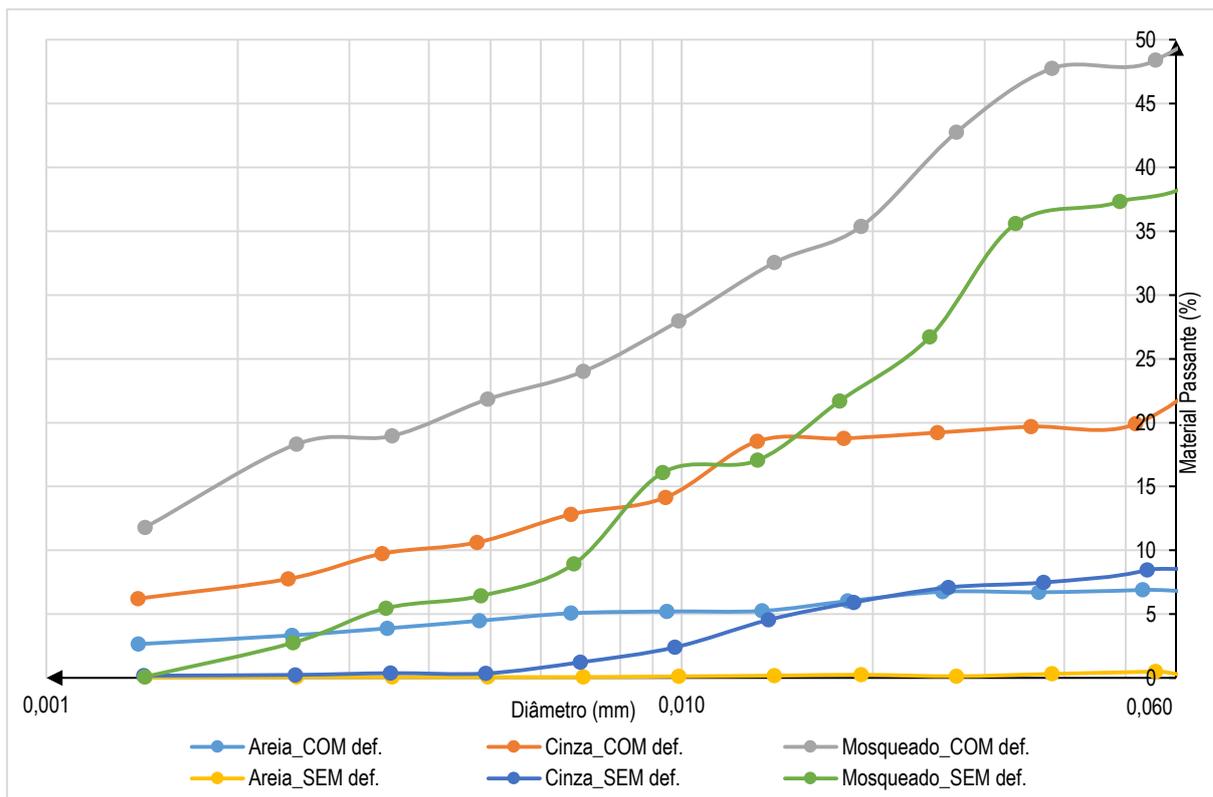


Gráfico 8: Curvas granulométricas em especial atenção à partição fina.
Fonte: Autor, 2018.

No tocante à erodibilidade, conforme a definição trazida por Lima (1999)⁸⁵, é a propriedade de um determinado solo ter maior ou menor capacidade de resistir aos agentes erosivos. Esta susceptibilidade é uma medida avaliável por meio da granulometria (dentre outros parâmetros), que para aqueles solos que apresentam predominância das frações siltosas e arenosas finas, aliadas ao baixo teor de argila (solos finos com tendência comportamental granular) a ocorrência de erosão é maior.

Lima (1999)⁸⁶ cita Poesen (1981) *apud* Guerra (1998) ao tratar da erodibilidade em razão do teor de silte presente nos solos:

(...) as areias apresentam maiores índices de erodibilidade e que o teor de silte também afeta a erodibilidade dos solos. Ainda segundo o mesmo autor (Poesen), **alguns pesquisadores demonstram que, quanto maior o teor de silte, maior a susceptibilidade dos solos em serem erodidos.** (Grifei).

⁸⁵ LIMA, Marisaides Cruz. **Contribuição ao Estudo do Processo Evolutivo de Boçorocas na Área Urbana de Manaus.** Brasília: Universidade de Brasília – UNB. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia), 1999. p. 20.

⁸⁶ *Ibidem*, p. 61.

5.4.3. Limites de Consistência

Sobre os limites de consistência, os quais representam passo fundamenta ao uso dos sistemas de classificação de solos, apresentam na Tabela 6, os resultados dos ensaios feitos, a saber:

Tabela 6: Resultados dos Limites de Consistência.

Fonte: Autor, 2018.

Amostra	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)
Mosqueado	37,78	26,86	23,52%	10,92
Cinza	31,75	29,94	29,77%	1,81
Areia	SOLO NÃO PLÁSTICO			

Como dito em passagem anterior (Gráfico 2), os solos que apresentam relevante fração de finos (“mosqueado” e “cinza”) foram aqueles que permitiram a análise por meio dos limites de consistência. Os limites de liquidez, plasticidade e contração do solo “cinza” é algo que desperta certa atenção, uma vez que uma pouca variação de umidade depois de atingido o limite de consistência, logo o estado passa de uma fase a outra. Em campo, este solo foi encontrado com umidade natural de 38,13% e saturação de quase 85%, assim, o mesmo subsistia já na fase líquida quando extraído. Ao mineral que pode gerar o comportamento de contração do solo, cita-se a caulinita, uma vez observado os limites estabelecidos por Mitchell (1976) *apud* Das (2010) de 25% a 29% para aquele mineral.

Já o solo “mosqueado” ainda se encontrava plástico quando coletado (avaliação visual e tátil), o que depois foi comprovado em laboratório, pois a umidade natural estava em 28,72%, cerca de 2% acima do Limite de Plasticidade obtido. Neste, as fases se mostram bem mais definidas, pois o Índice de Plasticidade chega na casa do 10% o que corrobora a saturação naturalmente observada (de quase 70%). Dentro do limite de consistência, cita-se que o mineral mais presente é possivelmente a caulinita (ou de semelhante composição), uma vez observado os limites estabelecidos ao solo analisado anteriormente (por razoável aproximação).

O solo tipo “areia” apesar de sua granulometria expor uma certa quantidade de finos (argila e silte), não foi possível estabelecer para ele os limites como aos demais, logo, o mesmo restou como não plástico.

Para avaliações comparativas, Das (2010)⁸⁷ citando Burmister (1949) traz a seguinte informação que solos com Índice de Plasticidade (IP) entre 1% e 5% são ditos *slightly plastic*, ou, pouco plásticos, características presentes no solo “cinza” o qual possui plasticidade em razão da argila e do silte, sendo esta última partição que contribui para o mesmo se plástico e quebradiço durante a manipulação. Ainda na mesma referência, os solos com índice de plasticidade entre 10% a 20% são classificados com *medium plasticity*, ou, plasticidade mediana, justamente o caso do solo “mosqueado”, em que a presença de argila é bem mais presente e ativa, sendo inclusive visualizável pela carta de plasticidade (*plasticity chart*) este solo como uma “silte inorgânico de média compressibilidade”. Para ambas classificações há a concordância de Caputo (1966)⁸⁸, que apesar dos valores das faixas ligeiramente diferentes, os solos permanecem fracamente e medianamente plásticos.

5.4.4. Classificação de Solos

Apresentadas as curvas granulométricas e os limites de consistência, reúnem-se as variáveis necessárias à apresentação da devida classificação dos solos pelos sistemas anteriormente percorridos neste trabalho (vide capítulo 2, item 2.5., subitem 2.5.1.), o Sistema Unificado e o AASHO. Abaixo, a Tabela 7 (com defloculante) e 8 (sem defloculante) com os dados referentes à classificação internacional:

Tabela 7: Classificação de Solos via SUCS e AASHO, com defloculante.

Fonte: Autor, 2018.

COM defloculante	Amostra	% < 0,075mm	Grupo	Classificação		% < 0,002mm	IP (%)	IA	w.nat (%)	IC
		Unificada		TRB						
	MOSQUEADO	73,9	M, C ou O	<u>ML</u>	<u>A-6</u>	18,08	10,92	0,603	28,72	0,8296
SEM defloculante	Amostra	% < 0,075mm	Grupo	Classificação		D ₁₀ (mm)	CNU	CC	Classificação	
		D ₆₀ (mm)		D ₃₀ (mm)	Unificada				TRB	
	AREIA	12,7	G ou S	0,175	0,1	0,0752	2,327	0,759	<u>SW-SC</u>	<u>A-3</u>
CINZA	35,7	G ou S	0,1	0,075	0,004	25	14,062	<u>SM</u>	<u>A-2-4</u>	

Tabela 8: Classificação de Solos via SUCS e AASHO, sem defloculante.

Fonte: Autor, 2018.

SEM defloculante	Amostra	% < 0,075mm	Grupo	Classificação		% < 0,002mm	IP (%)	IA	w.nat (%)	IC
		Unificada		TRB						
	MOSQUEADO	81,8	M, C ou O	<u>ML</u>	<u>A-6</u>	1,53	10,92	7,137	28,72	0,8296
SEM defloculante	Amostra	% < 0,075mm	Grupo	Classificação		D ₁₀ (mm)	CNU	CC	Classificação	
		D ₆₀ (mm)		D ₃₀ (mm)	Unificada				TRB	
	AREIA	16,1	G ou S	0,17	0,095	0,075	2,267	0,707	<u>SW-SC</u>	<u>A-3</u>
CINZA	46,5	G ou S	0,09	0,075	0,065	1,385	0,961	<u>SM</u>	<u>A-2-4</u>	

⁸⁷ DAS, Braja M. *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford (USA): Cengage Learning, 2010. p. 80.

⁸⁸ CAPUTO, H. P. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. Porto Alegre: Livros Técnicos e Científicos, 1966. 3 volumes.

Com isso, observa-se que para ambos os testes (com e sem defloculação) estamos diante de uma mesma classificação para os solos em estudo que é: ao solo “mosqueado” um silte arenoso de baixa compressibilidade, ao solo “areia” pertence à classe das areias bem graduadas e o solo “cinza” é uma areia siltosa.

Em consulta a literatura, sobre a classificação dos solos, muitos autores procuram trazer a correlação do resultado à aplicação em obras de terra (estradas, fundações direitas e indiretas e barragens), entretanto, para este estudo há um interesse maior de se observar alguns aspectos não vinculados à execução de obra, mas ao comportamento frente algumas situações, sendo assim, com referência em Vargas (1977)⁸⁹, temos para os solos coletados algumas características previsíveis ao grupo que pertencem:

Tabela 9: Solos em estudo em relação as informações já conhecidas, via classificação.

Fonte: Vargas, 1977.

Solo	Divisão Geral	Resistência Seca	Classificação		Grupo e Designações Típicas	Retração e Umedecimento	Drenabilidade
			Unificada	TRB			
Mosqueado	Solo de granulação fina de elevada compressibilidade.	Muito pequena a média.	ML	A-6	Solos siltosos e de areia fina, micáceos ou diatomáceos, siltes elásticos.	Elevada	Regular a Má
Areia	Areia e solos arenosos.	Nula.	SW-SC	A-3	Areias e areia pedregulhosas bem graduadas, pouco ou nenhuma proporção de finos.	Quase nenhuma	Excelente
Cinza	Areia e solos arenosos.	Muito pequena a grande.	SM	A-2-4	areia com finos, areias muito siltosas, misturas areia-argila mal graduadas.	Quase nenhuma a média.	Regular a praticamente impermeável

Visualizando a questão da drenabilidade, temos para as camadas de maior partição arenosa, uma maior possibilidade de saída de água, logo, espera-se que assim que o rio começa a descer de nível, os solos arenosos percam água e reduzam seu grau de saturação, deixando zonas vazias.

O emprego do termo “zonas vazias” tende, com fundamento na granulometria realizada, a ocorrer no solo “cinza”, o solo-base para os maciços em estudo, pois o mesmo está com saturação elevada (acima de 80%, Das (2010), Tsytoich (1976),

⁸⁹ VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977. p. 84-86.

entre outros) e a saída da água deixará diversos pontos a serem preenchidos por partículas de solo, que farão necessariamente irão se deslocar e levar o solo à ruptura.

Aquele é o caso específico do solo “cinza”, já ao solo “areia” perde água de maneira bem mais célere e com perda, também se vai uma grande parte da coesão. A capacidade de suporte das areias confinadas já de muito conhecida, e.g. o experimento citado em Tschebotarioff (1978)⁹⁰, todavia, há de se considerar que o estado da areia observada em campo está um tanto longe de dura ou compacta, na verdade ela é bem fofa e úmida e possivelmente se esvairá antes de atingir grau interessante de consolidação, pois está apoiada em solo sabidamente mole (solo “cinza”), quando não é levada pelas ondas ou atinge a resistência não confinada e se desagrega do maciço.

Ao comportamento do solo “mosqueado”, temos os traços da baixa à péssima capacidade de suporte, além da elevada retração e drenabilidade pífia. A chave do comportamento deste solo é a permeabilidade e coesão, uma vez que ela (permeabilidade) tende a ser baixa e não acompanha o regime hidrofluvial, desta forma, esta camada experimenta desde o estado de completa submersão até o estado de completa saturação, sendo que por muitas vezes a camada de base, o solo “areia” se perde pelas razões retrocitadas e o bloco deste solo, ou se esvai em conjunto com as demais camadas, ou se mantém por algum tempo apenas por meio da coesão. De toda forma, esta camada é a que mais se percebe a movimentação que ocorre nas terras caídas, uma vez que a coesão e plasticidade permitem essa camada refletir aquilo que ocorre dentro e abaixo dela (vide as imagens das visitas *in loco* e mais adiante no modelo em escala reduzida).

Por último, ainda sobre o solo “mosqueado”, cita-se o índice de ativação (IA) da argila presente naquele solo, que conforme os ensaios de granulometria, apontaram o elevado valor de 7,137 o que pela leitura de Skempton (1953) *apud* Vargas (1977) é que a partir de 1,25, a fração de argila já seria considerada ativa e se comunicaria com o restante do solo, fazendo-o se comportar como um solo argiloso, mesmo tendo em vista que outras frações se mostram percentualmente mais

⁹⁰ TSCHEBOTARIOFF, Gregory Porphyriewitch. **Fundações, Estruturas de Arrimo e Obras de Terra: A arte de projetar e construir suas bases científicas na mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. p.78-79.

relevantes, como por exemplo o silte (42%) e a areia (35%). Conforme a leitura de outra obra de Das (2008)⁹¹ é inclusive possível prever qual(is) o argilomineral(is) que está(ão) envolvido(s) em certa atividade, que pode ser a esmectita (alta), ou, a caulinita (baixa).

5.4.5. Permeabilidade dos Solos

Conforme as características granulométricas dos solos, já é possível prever com auxílio das referências utilizadas (vide as Tabela 3 e Tabela 4, do subitem 2.5.3), a permeabilidade do solo, pelo menos a ordem de grandeza (em que base 10 a mesma se encontra), dito isso, segue a Tabela 10, resultante dos ensaios de permeabilidade à carga variável:

Tabela 10: Permeabilidade dos Solos.

Fonte: Autor, 2018.

Solo	CLASSIFICAÇÃO	PERMEABILIDADE (m/s)	Grandeza
AREIA	Areia Fina e Média	2,50411E-07	1
CINZA	Areia Fina Siltosa	6,04664E-08	4,1413325
MOSQUEADO	Silte Arenoso (Fino)	5,20071E-09	48,149456

Na última coluna, foi feito um cálculo comparativo para verificar quantas vezes é menor a permeabilidade em relação à maior permeabilidade obtida, aquela do solo “areia”. Isso permite visualizar que o solo “cinza” é 4 vezes menos permeável que o solo “areia” e o solo “mosqueado” vai além, chega a ser quase 50 vezes menos permeável que o solo arenoso. Ambas informações se correlacionam seguramente aquilo já descrito em itens anteriores, como a drenabilidade e o índice de ativação da argila, modificando o comportamento daquele solo.

No Gráfico 9 a seguir é demonstrado o fator de grandeza entre as permeabilidades “*k*” encontradas. Para auxiliar a visualização, apresenta-se uma situação numérica (Tabela 11): digamos que para uma seção transversal de 1m² e um desnível de 1m e uma distância de 1m, a vazão (em litros por dia) seria pelos dados de ensaio:

⁹¹ DAS, Braja M. **Advanced Soil Mechanics**. New York (USA): Taylor & Francis, 2008. p. 26.

Tabela 11: Vazões exemplificativas.

Fonte: Autor, 2018.

Solo	k - Permeabilidade (m/s)	A (m ²)	i (h/L)	Q (l/dia)
AREIA	2,50411E-07	1	1	21,63554399
CINZA	6,04664E-08	1	1	5,224295318
MOSQUEADO	5,20071E-09	1	1	0,449341402

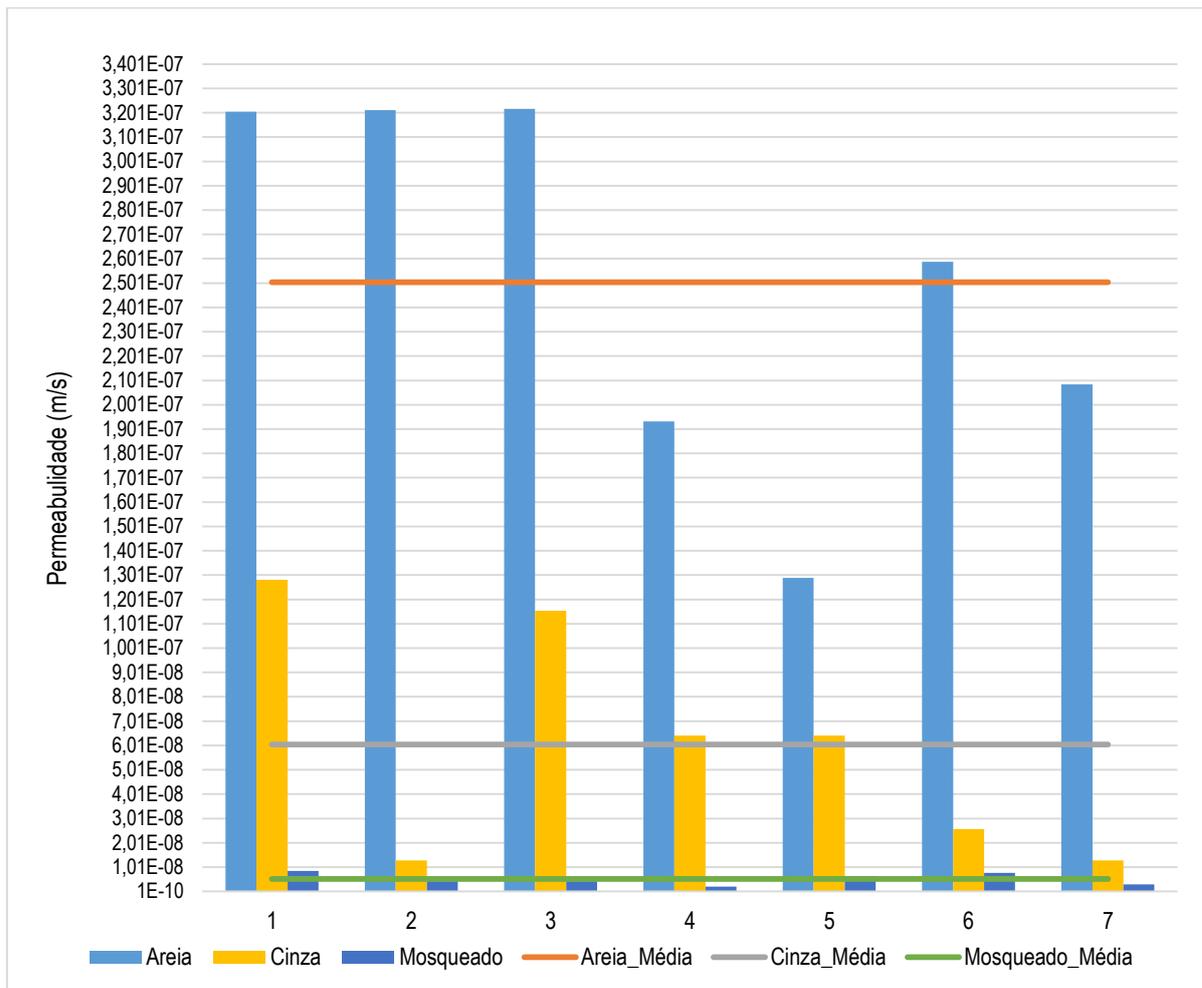


Gráfico 9: Permeabilidade dos Solos.

Fonte: Autor, 2018.

Esse tipo de disposição natural é de suma importância à compreensão da sistemática dos movimentos dos maciços, uma vez que por esta disposição, o solo menos permeável é aquele que tende a reter mais água e ter um peso específico elevado (uma vez que o γ_{sat} é o maior dos pesos específicos) e o mesmo está no topo dos maciços. Já o solo mais ao centro, que por sua natureza arenosa possui a tendência de acompanhar a descida do nível do rio e reduzir a quantidade de água

interna mantendo um peso específico intermediário e um número de vazios menor, pois o peso da camada acima (saturada) e da camada abaixo (solo “cinza”) e suas composições granulométricas forçam a saída da água da camada arenosa e ela se consolida.

5.4.6. Resistência à Compressão Simples

Em consonância à extração das amostras indeformadas, realizou-se os ensaios de compressão simples no intuito de serem observadas a resistência dos solos sem a presença de confinamento. Isso posto, seguem as análises gráficas da questão (Gráfico 10):

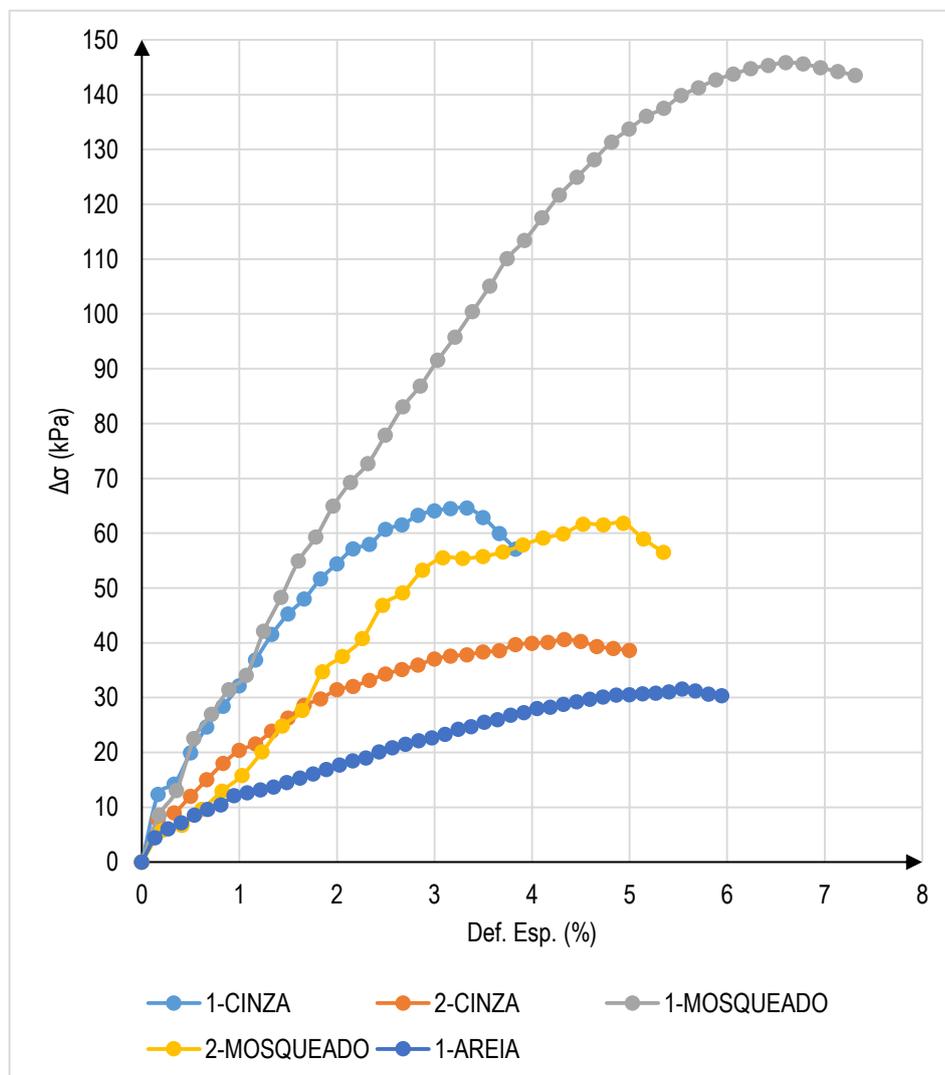


Gráfico 10: Compressão simples de amostras de solos.

Fonte: Autor, 2018.

Apesar da amostra 1 do solo “mosqueado” ter atingido um elevado patamar (140kPa), os demais ensaios se restringiram ao nível de 65kPa, inclusive a 2ª amostra

do solo “mosqueado”. O solo “areia” como já era a expectativa, foi aquele que atingiu a menor resistência (30kPa), de certa forma até mais daquilo que se espera, pois nos solos arenosos a resistência a este tipo de esforço tende a ser nula pela falta de coesão (verdadeira) entre as partículas desta natureza, inclusive esse fenômeno que levou uma das amostras ser perdida durante a extração.

Com a realização deste ensaio, objetiva-se a verificação da consistência de determinado solo com caráter argiloso (plástico) em saturação, não confinado, assim observa-se em Das (2010) assim como em Vargas (1977), algumas faixas de valores que correlacionam a resistência obtida (σ) e a consistência, desta forma, segue a Tabela 12 abaixo exemplifica essa questão:

Tabela 12: Picos de resistência à compressão simples.

Fonte: Autor, 2018.

Solo	Amostra	Def. Esp (%)	σ (kPa)	τ (kPa)	Consistência
Mosqueado	MOS.CS-1	6,60	145,90	72,95	Rígido
Mosqueado	MOS.CS-2	4,94	61,85	30,93	Médio
Cinza	CZ.CS-1	3,33	64,64	32,32	Médio
Cinza	CZ.CS-2	4,33	40,63	20,32	Mole
Areia	AR.CS-1	5,54	31,56	15,78	Fofo

O ensaio também se presta a outra verificação, que é a coesão dos solos. Fazendo uso da teoria de Mohr⁹² para critério de ruptura, temos que a tensão de confinamento (σ_3) é igual a zero, pois inexistente confinamento daquela amostra e a tensão normal principal (σ_1) está variando a fim de ocasionar a ruptura. Assim sendo a tensão tangencial, pode ser definida como a metade da tensão máxima normal, $\tau = \frac{\sigma_1}{2}$, em kPa, como no Gráfico 11 a seguir. Antecipando-se a isso, segue na tabela acima os valores obtidos para as coesões, além das envoltórias individuais apresentadas no Anexo C, ao final deste trabalho.

⁹² Conforme a teoria esplanada no subitem **2.5.5. Resistência ao Cisalhamento**.

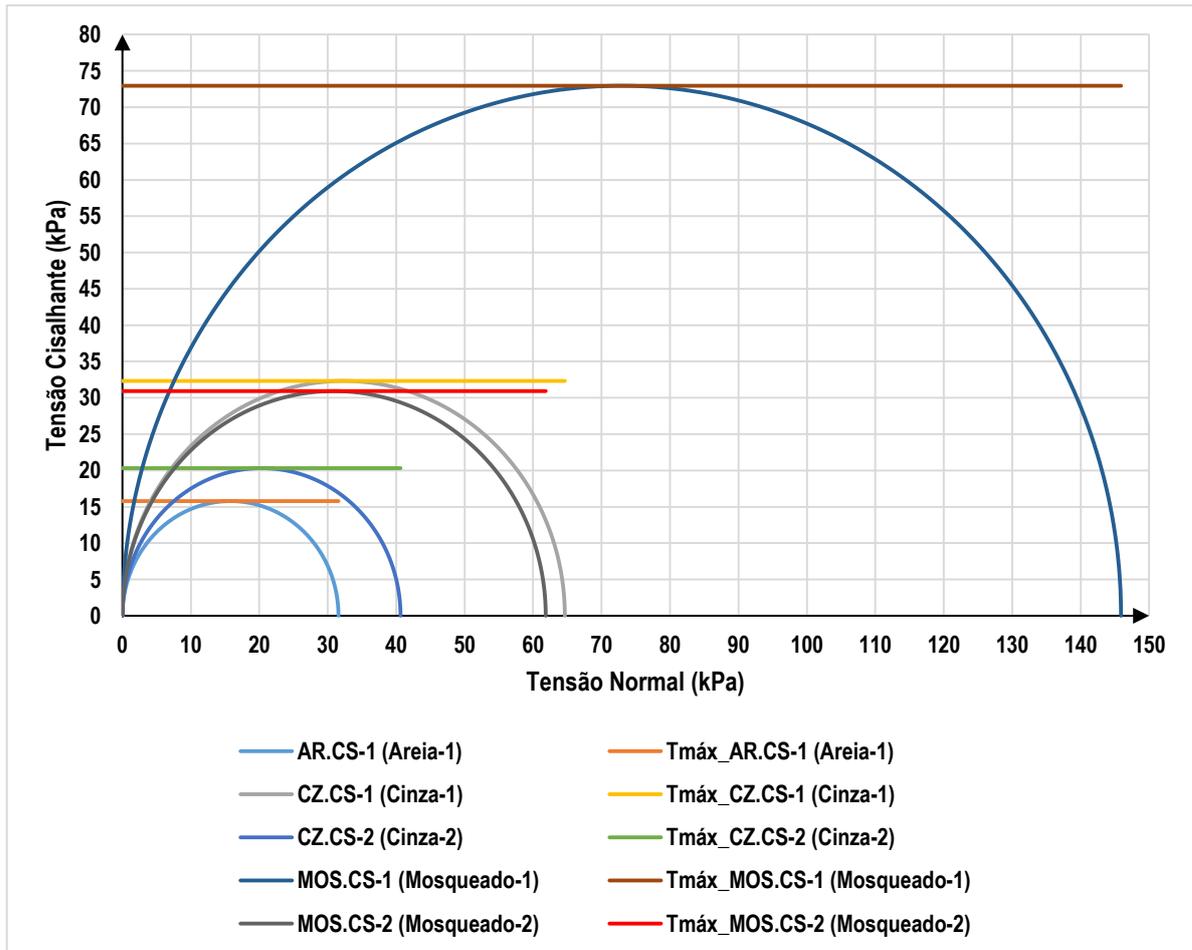


Gráfico 11: Envoltória de Tensões para Resistência à Compressão Simples.
Fonte: Autor, 2018.

Destaca-se nesta avaliação, os altos valores de coesões obtidas pelo solo “mosqueado”, o qual dentre as três amostras coletadas é aquele que possui maior percentual de argila ativa em sua composição. Encontrado na natureza com este elevado patamar de resistência, esta camada de solo é aquela que na ocorrência das terras caídas, tende a ficar em balanço, sendo mantida presa na margem justamente por esta coesão, vindo a romper somente quando esta é excedida (acréscimo de carga sobre o frágil equilíbrio), ou, mitigada (com as águas que nela percolam e a incidência dos “banzeiros”). Abaixo, na Figura 77, um corpo de prova do solo “mosqueado”, rompendo ao longo de um plano de ruptura, na extremidade da amostra.

No tocante ao solo “cinza”, destaca-se que enquanto solo de base do maciço, um solo de baixa coesão. Muito desta baixa coesão é corolário do grau de saturação elevado desta amostra encontrada na natureza. Uma forma encontrada para correlacionar essa saturação e a resistência obtida, é aquela proposta por Vargas

(1977), por meio do ensaio de Limite de Liquidez, o qual para este solo em específico, tem-se o valor de 37,78% (Tabela 6) para que a ranhura se feche a 25 golpes e o solo coletado, possuía 38,13% (Tabela 6), ou seja, menor o número de golpes, menor sua resistência. Esta tendência se explica, novamente, pela falta de interação entre partículas de solo, principalmente por causa dos vazios preenchidos por ar e água, deixando inclusive o solo com aspecto de “borrachudo” quando ensaiado. A seguir, a Figura 78 do corpo de prova do solo “cinza”, cisalhando ao longo de um único plano de ruptura.

Finalmente, o solo “areia” foi ensaiado apenas uma vez, pois uma das amostras se deteriorou. É bem verdade que amostras deste tipo não chegam a ser testadas neste tipo de experimento, pois a coesão das areias puras e pedregulhos é nula. No entanto a coesão não é vista como fenômeno produzido apenas pela presença de finos, mas também pela presença de água nos meniscos capilares de forma temporária. A seguir, com os demais, o corpo de prova deste solo após o ensaio (Figura 79).



Figura 77: Corpo de prova do solo "mosqueado" após ensaio de compressão simples não confinada.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 78: Corpo de prova do solo "cinza" após ensaio de compressão simples não confinada.
Fonte: Autor, 2018



Figura 79: Corpo de prova do solo "areia" após ensaio de compressão simples não confinada.
Fonte: Autor, 2018.

Os resultados do ensaio seguinte (cisalhamento direto), serão diretamente correlacionados aos resultados aqui obtidos, a fim de que melhor se compreenda as resistências que atuam nos maciços que passam pelas terras caídas e inclusive poderão ser aplicados à futuras simulações computacionais.

5.4.7. Resistência ao Cisalhamento

Este ensaio é, em tese, o último realizado no sentido de caracterizar as unidades de solos coletadas no campo, antes das simulações em escala reduzida e computacionais. Neste ensaio, obtêm-se por meio das curvas de tensão cisalhante (τ) por deformação horizontal, com tensão normal constante (σ), os valores de pico para construção da reta de Coulomb (via regressão linear), para assim coletar o intercepto de coesão (c) e o ângulo de atrito (φ) tão necessários às simulações.

Antes da apresentação dos resultados e da sua interpretação sistemática ao caso concreto das Terras Caídas (e aos demais dados já expostos), há de explicitar algumas das condições impostas a realização destes vários ensaios (6 ensaios, com 4 amostras cada):

- a. Os solos aqui testados, foram confeccionados por meio das amostras indeformadas cilíndricas ($\varnothing=100\text{mm}$ e $h=200\text{mm}$);

- b. Não foi possível, por limitação do aparelho, a realização do ensaio inundado, logo este estudo está calcado na avaliação das tensões efetivas sobre as amostras (condição drenada);
- c. As amostras foram ensaiadas conforme as condições de campo, sendo as tensões normais impostas, aquelas normalmente citadas na literatura, de 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa, de maneira a termos um conjunto homogêneo (4 pares) de dados para construção das retas;
- d. Cada tipo de solo foi testado com duas velocidades de deslocamento horizontal, a fim de se observar como cada unidade tende a se comportar em relação à saída de água. Pode se dizer que foi feito para cada um, um ensaio lento e outro rápido;
- e. Nos anexos estão dispostos os ensaios realizados e as saídas gráficas de cada uma das sequências testadas, inclusive com as equações de cada uma das retas de Coulomb.

O desenvolvimento do ensaio gerou a Tabela 13, e mais adiante o Gráfico 12, em que são mostrados cada dos interceptos de coesão (tensão normal $\sigma = 0$) e os respectivos ângulos de atrito.

Tabela 13: Resumo da Resistência ao Cisalhamento dos solos dos maciços estudados.

Fonte: Autor, 2018.

Solo	Ensaio	Velocidade (mm/min)	Coesão (kPa)	ϕ' (°)
Areia	AR.CD-1	0,5	14,234	29,52
Areia	AR.CD-2	1,25	11,563	29,98
Mosqueado	MOS.CD-1	0,5	40,723	24,47
Mosqueado	MOS.CD-2	1,25	54,800	22,10
Cinza	CZ.CD-1	0,6	4,3309	30,82
Cinza	CZ.CD-2	0,12	1,9608	31,22

Como pode ser observado, a velocidade de realização do ensaio não trouxe significativas alterações nas tensões cisalhantes obtidas, sendo inclusive corroborada esta tese quando avaliamos o grau de saturação pós-ensaio. A saída de água em geral para as amostras ensaiadas, não representou mudança relevante ao desenvolvimento da reta de Coulomb. Isso posto, centrar-se-á as análises sob outros pressupostos, tais como a composição granulométrica, os limites de consistência e na resistência à compressão simples não confinada.

Primeiramente, ao solo “mosqueado” que ocupa relevante parcela da altura dos maciços em estudo. Neste solo, a resistência ao cisalhamento tem se apresentado elevada em relação aos demais solos experimentados. Nesse ensaio a tendência criada no subitem anterior (resistência à compressão simples) foi respeitada, sendo que os interceptos de coesão ficaram inclusive na faixa proposta naquele, sendo a consolidação considerada rígida.

Dos solos estudados, o “mosqueado” é aquele com maior porcentagem de argila presente, sendo esta ativa, logo além de subsistir naquele corpo, a mesma influencia bastante seu comportamento, proporcionando-lhe um caráter argiloso. Como é natural de solos deste tipo, a coesão apresentada tem valor significativo, pois a cimentação das partículas de solo argiloso, combinada à presença de água que as revolve, cria uma força aderente impressionante, como proposto por Vargas (1977)⁹³ e o ângulo de atrito mais baixo em relação aos demais solos testados. A diminuição da coesão para este solo é sempre acompanhada do aumento do ângulo de atrito, com isso, extrapolando-se, numa determinada tensão normal ($\sigma \approx 280kPa$), a tensão cisalhante será idêntica ($\tau \approx 160kPa$) para ambos os testes.

No meio de ocorrência das terras caídas, esta alta resistência de camada é que proporciona a ocorrência do movimento de massa conhecido como desabamento, em que a base do maciço é engolida pelas águas, enquanto a camada acima se mantém por mais algum tempo, vindo a desabar de maneira rápida e abrupta quando excedida sua coesão.

O solo “cinza” que é tido como a base dos maciços, possui um caráter preponderantemente arenoso, porém o silte que nele está, confere certa plasticidade ao conjunto. Neste, a saturação se mostrou muito elevada (aproximadamente 85%), fato que muito interessa ao entendimento da resistência ao cisalhamento, uma vez que a quantidade de tensão normal imposta ao solo, aliada a velocidade de deslocamento, podem modificar o grau de saturação, por meio do adensamento e redução de vazios, aumentando o contato entre as partículas e assim a conformação da reta de Coulomb. Como visto, a alteração da velocidade (diferença de 5 vezes entre

⁹³ VARGAS, Milton. *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977. p. 30-31.

os ensaios CZ.CD-1 e CZ.CD-2) não conferiu mudança ao comportamento para aquele solo.

Os solos siltosos (*in casu*, areno-siltoso) não possuem grandes estudos comportamentais, com o ensaio de cisalhamento direto como as areias e as argilas, como aduz Duncan (2014)⁹⁴, porém, continua o autor, este tipo de solo pode pender tanto para as argilas, quanto para as areias. No caso deste estudo (via cisalhamento), o solo em questão se apresentou mormente como areia, com ângulos de atrito altos e baixíssima coesão verdadeira (tendendo a zero). Apesar de tê-lo citado preliminarmente como um solo com certa coesão (até elevada ao tipo de solo), por causa dos resultados da resistência a compressão simples, quando novamente testado, agora no cisalhamento, aquela capacidade inicialmente vista começou a ser mitigada, como relatado por Venkatramaiah (2006)⁹⁵, que cita em sua obra que os solos arenosos (ao menos preponderantemente nesta fração) tendem à coesão nula quando ou próximos da saturação nula ($S=0\%$; $w=0\%$), ou, da saturação máxima ($S=100\%$, $w=máxima$), ou, submerso.

Na natureza, esta camada de solo tende a estar sempre nesta mesma condição de saturação, logo a mesma pela sua baixa capacidade de resistir, pode estar relacionada aos movimentos de escorregamento (mais lento) e desmoronamento (mais rápido). O envolvimento da “fraqueza” da camada se associa a estes movimentos pela razão da independência do nível do corpo hídrico, pois basta que sua capacidade de resistir seja vencida, que um, outro, ou ambos movimentos ocorrerão. Em linhas gerais a(s) camada(s) acima do solo “cinza” que comanda(m) a movimentação, sendo ela(s) mais ou menos resistente(s) ao corte.

Por fim, o solo “areia” que dos três é o mais bem definido em termos de granulometria, é solo com resistência ao cisalhamento mediana, em oposição ao solo à resistência à compressão simples, onde apresentou a menor das resistências. Entretanto, tanto naquela situação quanto nesta, a coesão esperada era nula, dado que a fração de areia passa de 90% e os finos argilosos são apenas 3%, sendo

⁹⁴ DUNCAN, James M. **Soil strength and slope stability**. New Jersey (USA): John Wiley and Sons, 2014. p. 52.

⁹⁵ VENKATRAMAIAH, C. **Geotechnical Engineering**. New Delhi (IND): New Age International, 2006. p. 289.

impossível precisar a atividade destes 3%, pois o solo é não plástico e por consequência não é possível extrair Índice de Plasticidade.

Mas a realidade é que este solo possui sim coesão e esta é invulgar e atuante, no maciço, no entanto a falta de confinamento é a condição de campo que se observa como a mais problemática a este solo, pois durante a descida das águas, as mesmas tendem a carrear estas partículas granulares, retirando-as do maciço e modificando as condições de equilíbrio do talude marginal. Apesar da permeabilidade mais elevada do grupo, a modificação da condição de saturação não parece gerar grandes diferenças à resistência ao cisalhamento, a resistência para este caso é regida pela tensão normal atuante sobre a camada.

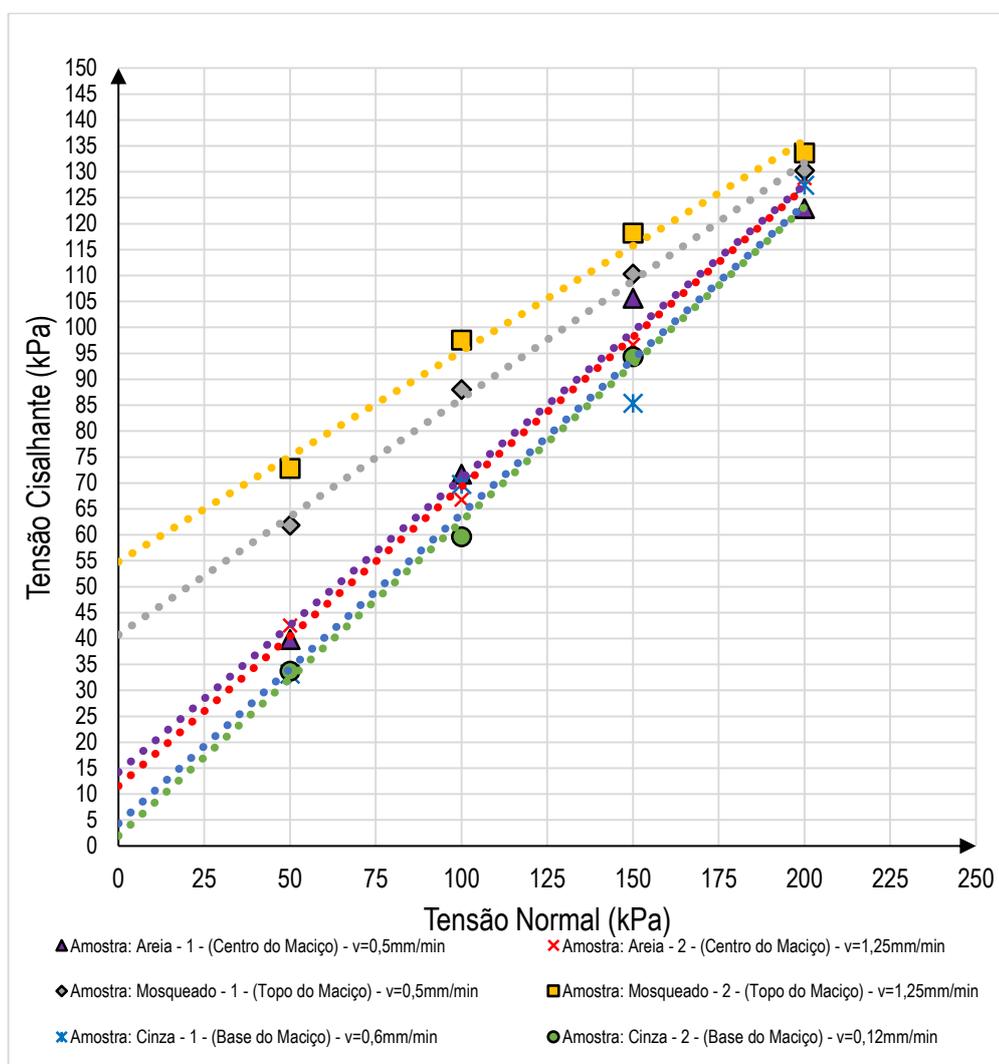


Gráfico 12: Resistência ao Cisalhamento.
Fonte: Autor, 2018.

Por fim, menciona-se que o cisalhamento direto é bem mais simplificado que o ensaio triaxial, as condições de drenagem de fato possuem muitas restrições, porém, por meio dele é possível explorar e conhecer bastante das condições de resistência do solo, principalmente quando se idealiza que a condição de cisalhamento direto é a situação que mais se aproxima da realidade em campo.

5.5. Da análise mineralógica e química (*FRX* e *DRX*)

Para uma avaliação consistente dos minerais presentes nas amostras, utilizou-se a técnica de fluorescência de raios-X (*FRX*) para que se visualizasse as porções de elementos e compostos químicos presentes nas amostras. Esta seria considerada a avaliação química no trabalho, tal como Arenare (2007)⁹⁶ desenvolve:

Identificar a quantidade relativa de elementos maiores no solo (Si; Ti; Al; Fe; Mn; Mg; Ca; Na; K e P), **possibilitando o levantamento de hipóteses sobre a evolução geoquímica da cobertura pedológica e comparação da composição química** entre vários pontos dessa cobertura. (Grifei).

Para a mineralogia, recorreu-se a difração de raios-X (*DRX*) para que se visualizassem os argilominerais presentes, uma vez que se parte do seguro pressuposto que cada estrutura cristalina possui um arranjo ordenado de átomos no espaço, sobre os quais os raios-X são difratados de uma certa maneira.

Fundamentado nisso, seguem as análises (gráficos 13 a 18) feitas via *DRX* e *FRX*, correlacionadas por meio do *software High Score* e plotado via *Microsoft Excel*[®], a fim de que se descobrissem quais os principais minerais que se faziam presentes e de certa forma observar algo relacionado ao comportamento destes solos, quando estruturados (maciços).

Após a apresentação dos gráficos, far-se-ão as considerações necessárias sobre cada um dos difratogramas em relação aos compostos químicos localizados.

⁹⁶ ARENARE, Bruna de Souza. ***Estudo da Estrutura, Morfologia e Mineralogia de um Sistema de Solos Laterítico-Podzolizado na bacia do Alto Rio Negro – AM.*** Rio Claro (SP): Universidade Estadual de São Paulo – UNESP. (Dissertação de Mestrado em Geografia), 2007. p. 40.

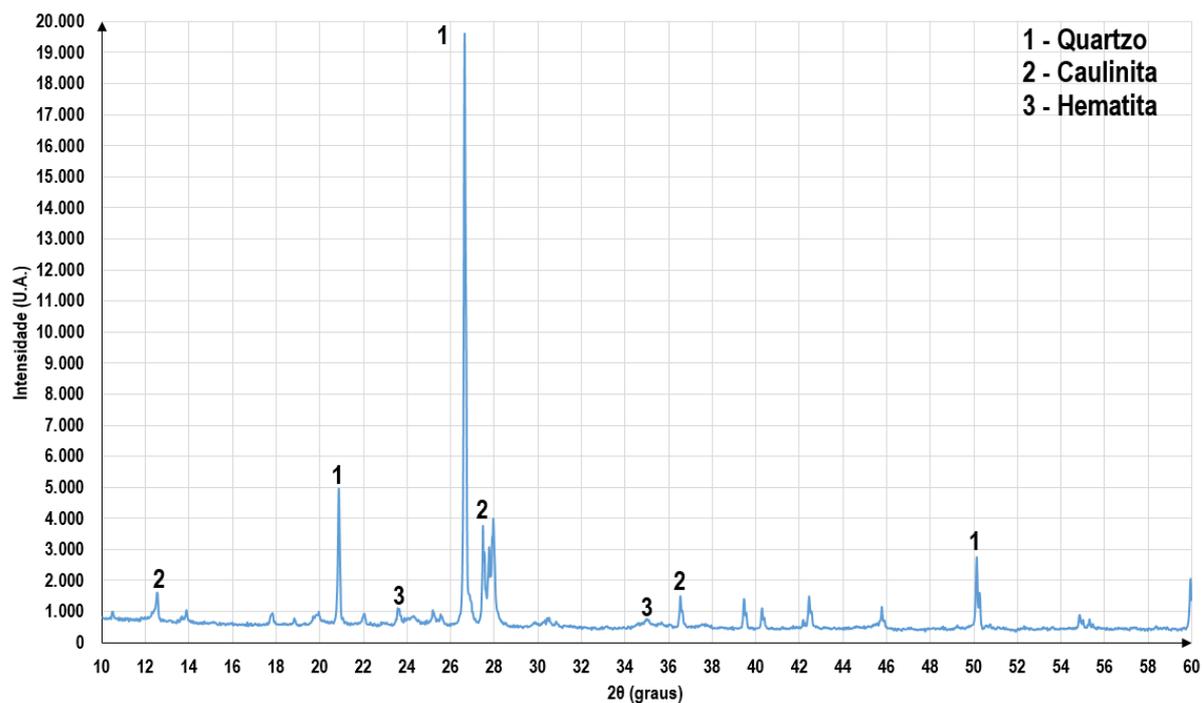


Gráfico 13: Análise mineralógica do solo "Mosqueado", via DRX.
Fonte: Autor, 2018.

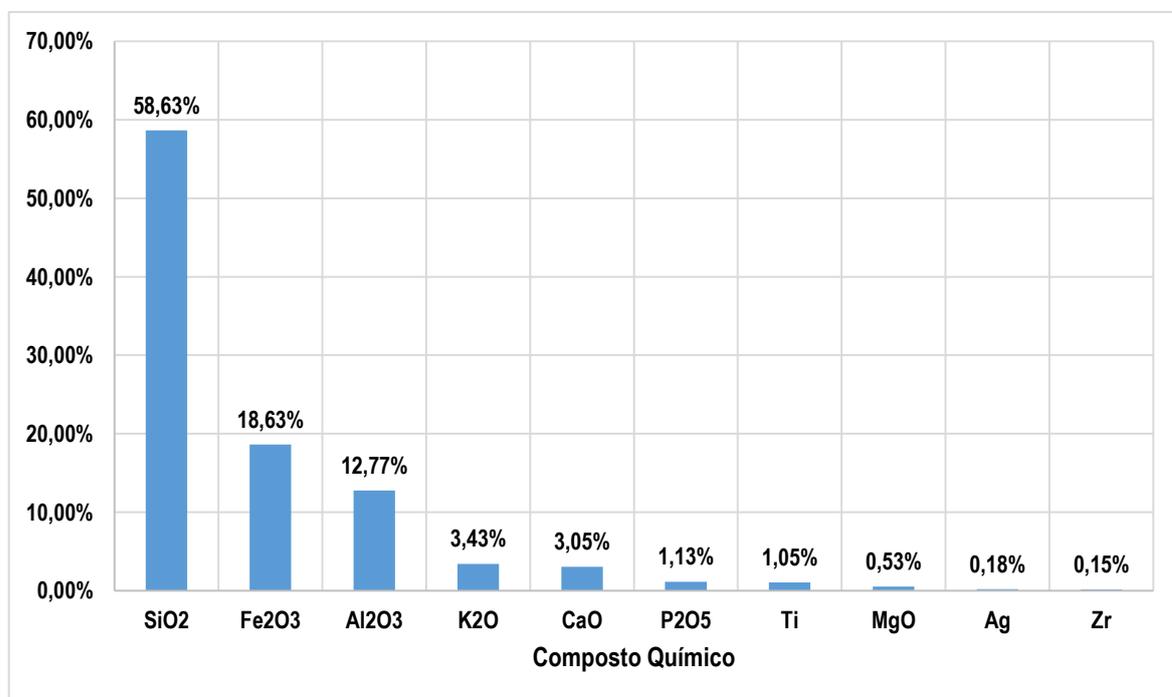


Gráfico 14: Compostos químicos presentes no solo "Mosqueado", via ensaio de FRX.
Fonte: Autor, 2018.

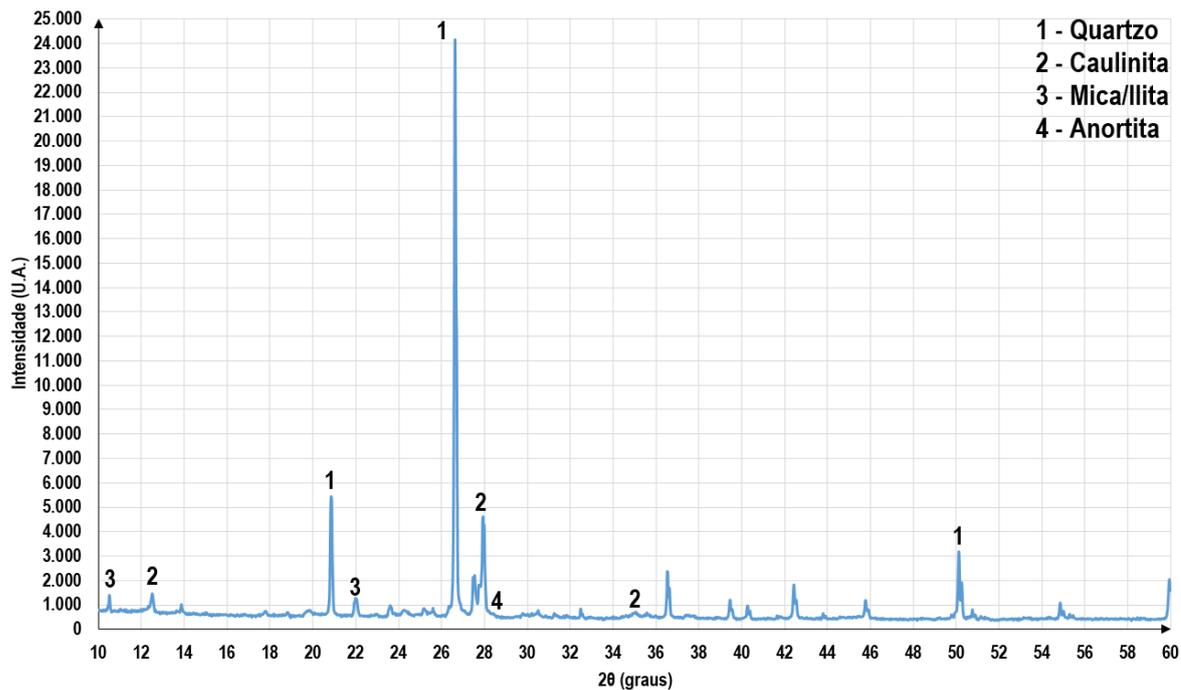


Gráfico 15: Análise mineralógica do solo "Areia", via DRX.
Fonte: Autor, 2018.

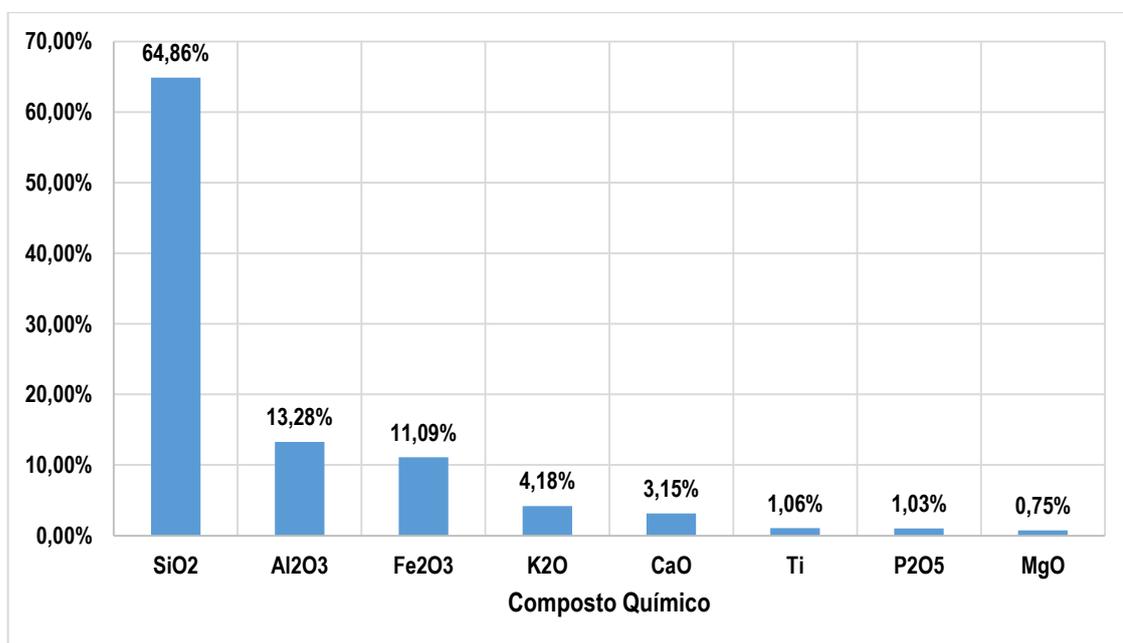


Gráfico 16: Compostos químicos presentes no solo "Areia", via ensaio de FRX.
Fonte: Autor, 2018.

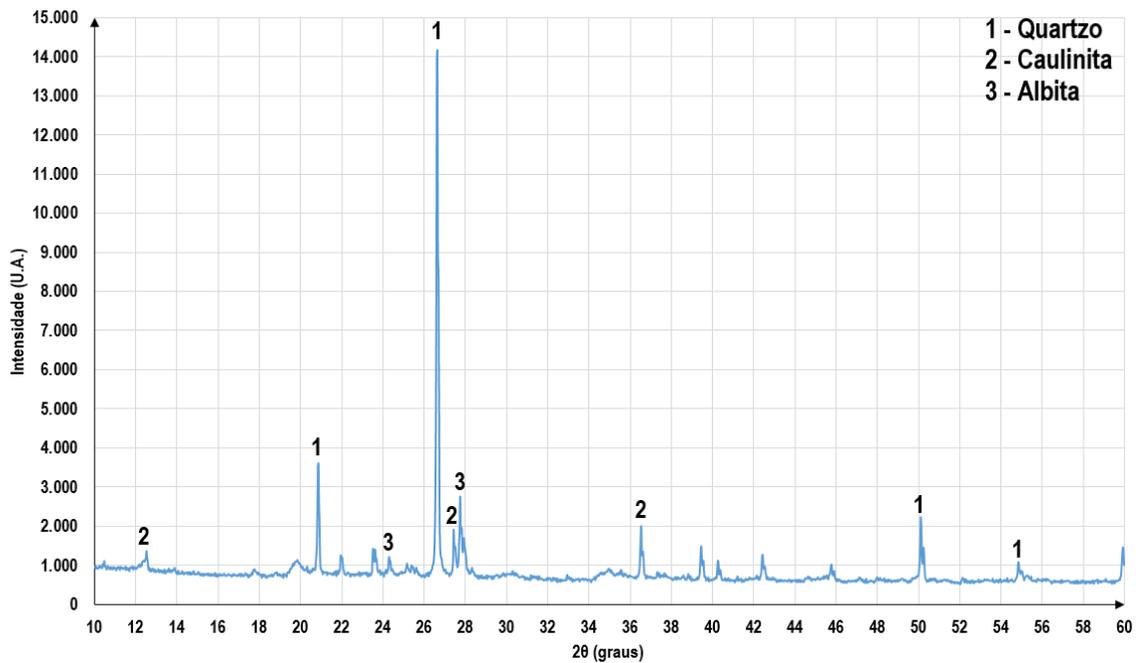


Gráfico 17: Análise mineralógica do solo "Cinza", via DRX.
Fonte: Autor, 2018.

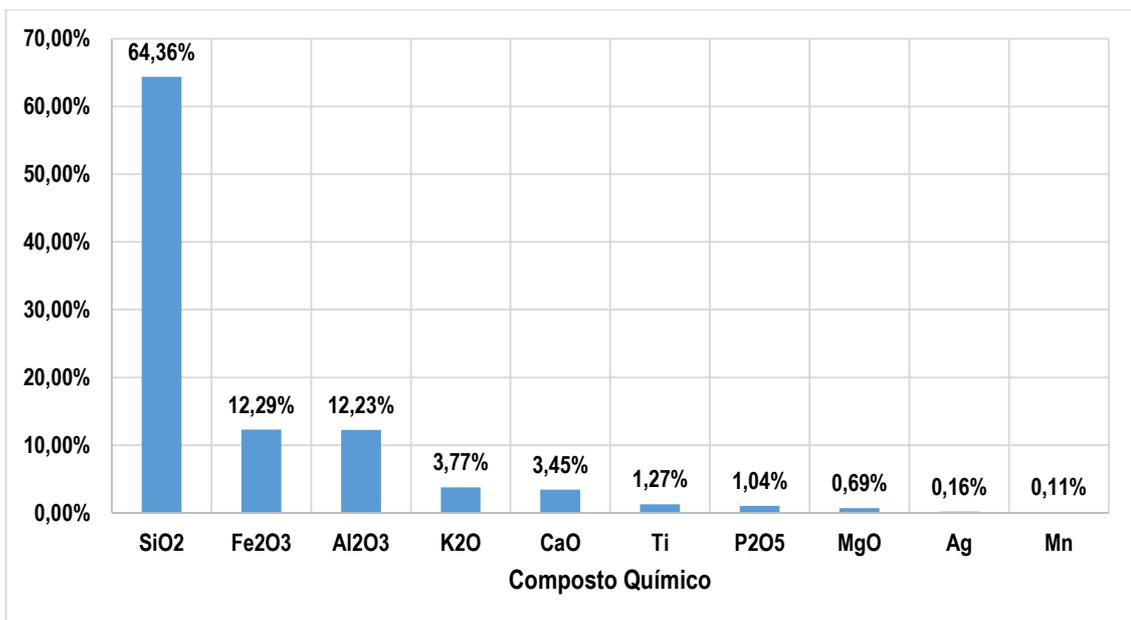


Gráfico 18: Compostos químicos presentes no solo "Cinza", via ensaio de FRX.
Fonte: Autor, 2018.

Para a amostra de solo “mosqueado”, obtiveram-se as seguintes fases, de Quartzo, de formulação SiO₂, Caulinita, de formulação Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O e Hematita, de formulação Fe₂O₃.

Para a amostra de solo “areia”, obtiveram-se as seguintes fases, de Quartzo, de formulação SiO_2 , Caulinita, de formulação $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Mica/Ilita de formulação $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ e Anortita, de formulação $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

Finalmente, para a amostra de solo “cinza”, obtiveram-se as seguintes fases, de Quartzo, de formulação SiO_2 , Caulinita, de formulação $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e a Albita, de formulação $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.

Vencida esta etapa, apresentam-se os minerais de relevante participação seja quantitativa (maior proporção em massa/volume), seja qualitativa (comportamento mecânico), nota-se, *a priori*, que a mineralogia de forma geral tem se comportado no mesmo sentido de possuir relevante quantidade de quartzo (grupo dos silicatos) e de caulinita, fruto basicamente da formação em comum daqueles solos (natureza sedimentar, intemperismo físico pelo transporte do material). A presença do quartzo define bem a partição arenosa daqueles solos e lhes confere resistência do corte elevada quando devidamente confinados (considerado o alto valor de atrito) por solos de menor granulometria (contidos ou misturados com siltes e argilas). O quartzo devido a sua dimensão também em muito contribui para permeabilidade dos solos, uma vez que o espaçamento entre as partículas permite a maior passagem de água. O quartzo também é notado nas partições tidas como “mais grosseiras” do silte.

Normalmente, o silte está relacionado a possibilidade de desequilíbrio de maciços, uma vez que seu comportamento intermediário (entre areia e argila), pois a baixa plasticidade ocasiona a fissuração e posterior ruptura das massas sólidas justamente pelo fluxo de água que carrega o material siltoso.

Já o outro mineral que se apresentou de maneira majoritária (tal como o quartzo) foi justamente a caulinita (grupo dos aluminossilicatos), argilomineral que proporciona elevada resistência ao corte dada a atração em nível molecular (coesão verdadeira, elevada capacidade de troca catiônica – CTC), com solos bem estruturados e de difícil circulação de água. Durante a avaliação da granulometria (subitem 5.4.2.) e da própria classificação (subitem 5.4.4.), notou-se que a participação da caulinita é extremamente relevante ao solo “mosqueado”, pois a sua pequena quantidade, tende a rearranjar toda a maior partição arenosa (com grande

quantidade de quartzo presente). A capacidade superior de resistência ao corte deste tipo de solo é como definido por Silva & Carvalho (2007):

Segundo Ferreira *et al.* (1999), o ajuste face a face das placas da caulinita favorece o desenvolvimento de estrutura em blocos, podendo aumentar a coesão do solo em relação a solos oxidicos, que apresentam predomínio de estrutura granular. (Sem grifos no original).

A hematita (do grupo dos óxidos), entra na composição mineral como elemento que proporciona a coloração mosqueada ao solo de mesmo nome, além de incremento na resistência dos solos, tal como observado por Ajayi *et al.* (2009a) *apud* Pértile (2015), em sua avaliação de latossolos com presença de hematita, tendem a formar estruturas com conseqüente capacidade de suportar tensões externas.

5.6. Do modelo em escala reduzida

Conforme desenvolvido no subitem **3.4. Construção e teste de modelo em escala reduzida do fenômeno**, por meio das observações de campo (sondagem e coleta de amostras), das imagens por satélite e dos testes de caracterização dos solos presentes nestes maciços, tornou-se possível a construção de um modelo em escala reduzida de um “maciço-padrão” a fim de que se testasse seu comportamento frente a ação das águas numa única direção.

Antes de que iniciasse os testes, foram necessários cálculos para que fosse avaliada a quantidade de solo necessária ao experimento. Assim sendo, tomaram-se algumas medidas do equipamento e com auxílio de algumas informações dos solos caracterizados (subitem **5.4.1 Condições Iniciais e Índices Físicos**), formou-se a Tabela 14, com os dados de construção do modelo:

Tabela 14: Dados para construção do modelo em escala reduzida.

Fonte: Autor, 2018.

Camada	ρ_{nat} (campo) (g/cm ³)	W_{nat} (campo) (%)	ρ_d (campo) (g/cm ³)	Dimensões no equipamento			V (cm ³)	M_{seca} (modelo) (g)	W_{solto} (%)	$M_{nat(solto)}$ (g)	ΔM_w (g)	$M_{nat.modelo}$ (g)	ρ_{nat} (modelo) (g/cm ³)
				H (cm)	L (cm)	b (cm)							
Mosqueado	1,60	28,72%	1,24	8,00	40,00	20,50	6.560,00	8.154,13	6,07%	8.649,09	1.846,91	10.496,00	1,60
Areia	1,50	17,00%	1,28	5,00	40,00	20,50	4.100,00	5.256,41	3,76%	5.454,05	695,95	6.150,00	1,50
Cinza	1,65	38,13%	1,19	7,00	40,00	20,50	5.740,00	6.856,58	6,37%	7.293,35	2.177,65	9.471,00	1,65
h total (cm)				20,00	V total (cm³)		16.400,00				M_{nat} total (g)	26.117,00	

A ideia de montagem do maciço foi de ser concebido na escala 1:100, sendo a altura (h) do “maciço-padrão” de 20cm, sendo a base (comprimento) L = 2H (40cm de

base). A altura foi distribuída para os 3 solos coletados, cada um na devida proporção observada em campo e na sondagem, além de ser na ordem daquilo que foi observado em campo (fator importante ao mecanismo de ruptura). A Figura 80 e Figura 81, exemplificam o modelo finalizado.



Figura 80: Modelo em escala reduzida montado.
Fonte: Autor, 2018.

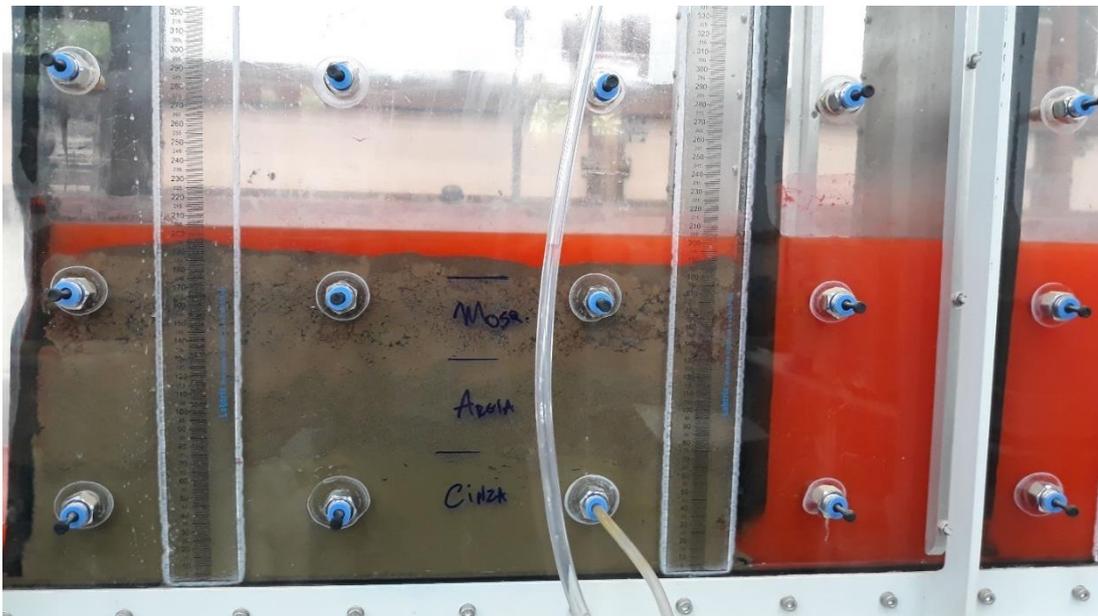


Figura 81: Modelo montado em vista aproximada de suas camadas.
Fonte: Autor, 2018.

Construído o modelo, fazem-se algumas breves considerações, sobre o funcionamento do sistema:

- a) A compactação foi feita manualmente, por meio do controle da altura de cada camada. Como algumas massas atingiram o patamar de 10kg (o dobro de massa de um corpo de prova para o ensaio de *CBR*), optou-se por dividir em até 4 (quatro) porções de solo, para melhor homogeneização e compactação;
- b) Além das camadas de solo coletadas, foi acrescentada mais uma camada de espessura de 1,5cm do solo tipo “areia”, para que se simulasse a praia, tal como nas imagens 49 e 50, na descrição da visita 2;
- c) Foi colocada uma placa impermeável do lado esquerdo e duas placas permeáveis na direita;
- d) A segunda placa permeável, ligeiramente mais afastada é única e exclusivamente para conter os solos após a ruptura, para que o mesmo não entre em contato com a parte mecânica (conjunto motor-bomba) do sistema, danificando-a;
- e) Acrescentou-se água com um pigmento vermelho, apenas do lado direito, para que o líquido percolasse apenas por este lado. A cota final de água foi a aproximadamente 2cm acima do topo do maciço, uma vez que se objetivava a saturação completa do modelo;
- f) Deixou-se o maciço submerso por 7 dias, para que no último dia, fosse removida a placa permeável e se observasse como o maciço se comportaria;
- g) No decorrer do ensaio (após a remoção da placa permeável), tentou-se drenar a água do sistema numa proporção aproximada daqui que se observa em campo (ciclo de cheia/vazante);
- h) Os níveis máximo e mínimo do sistema são respectivamente o topo do maciço experimental e 1cm acima da interface dos solos “cinza” e “areia”, inclusive para fins de modelagem computacional (item seguinte).

Apresentadas essas explicações, seguem algumas imagens (Figura 82 a Figura 92) do 1º ensaio realizado com o modelo e seus comportamentos (respostas às ações):



Figura 82: Modelo pré-ensaio, com fitas adesivas na cor verde para delimitar a forma antes da remoção da placa permeável.
Fonte: Autor, 2018.

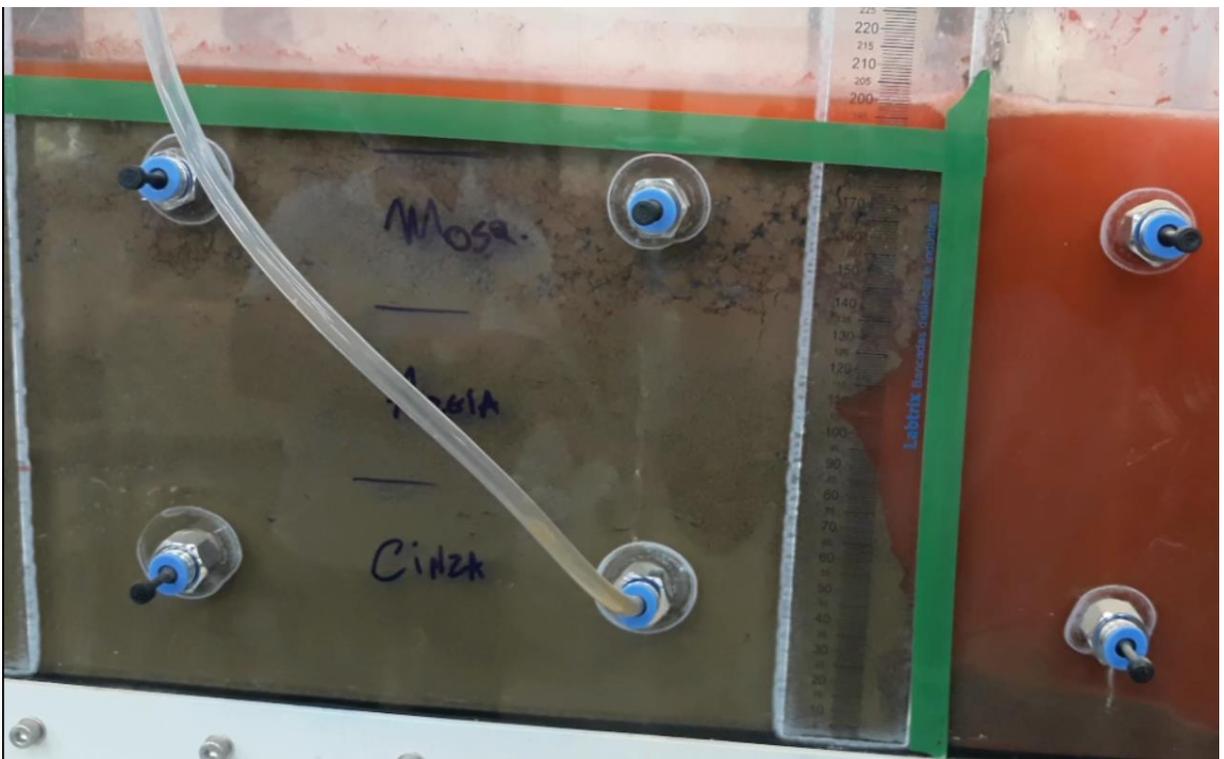


Figura 83: Modelo com ensaio em andamento. Nota-se preliminarmente o desenvolvimento de uma erosão na base do solo "mosqueado" (camada de "areia").
Fonte: Autor, 2018.

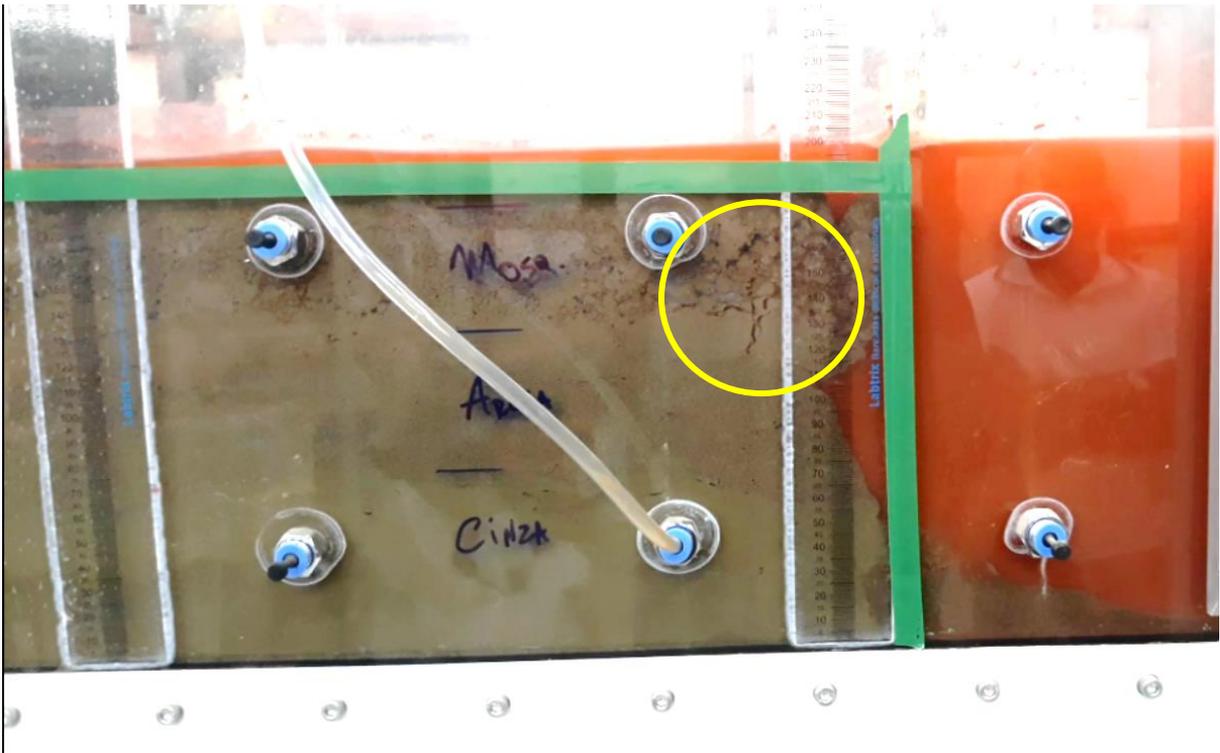


Figura 84: Início da fissuração (trincas destacadas) da camada de solo "mosqueado" com a erosão da base, a exemplo do que ocorre no movimento de desmoronamento.
Fonte: Autor, 2018.

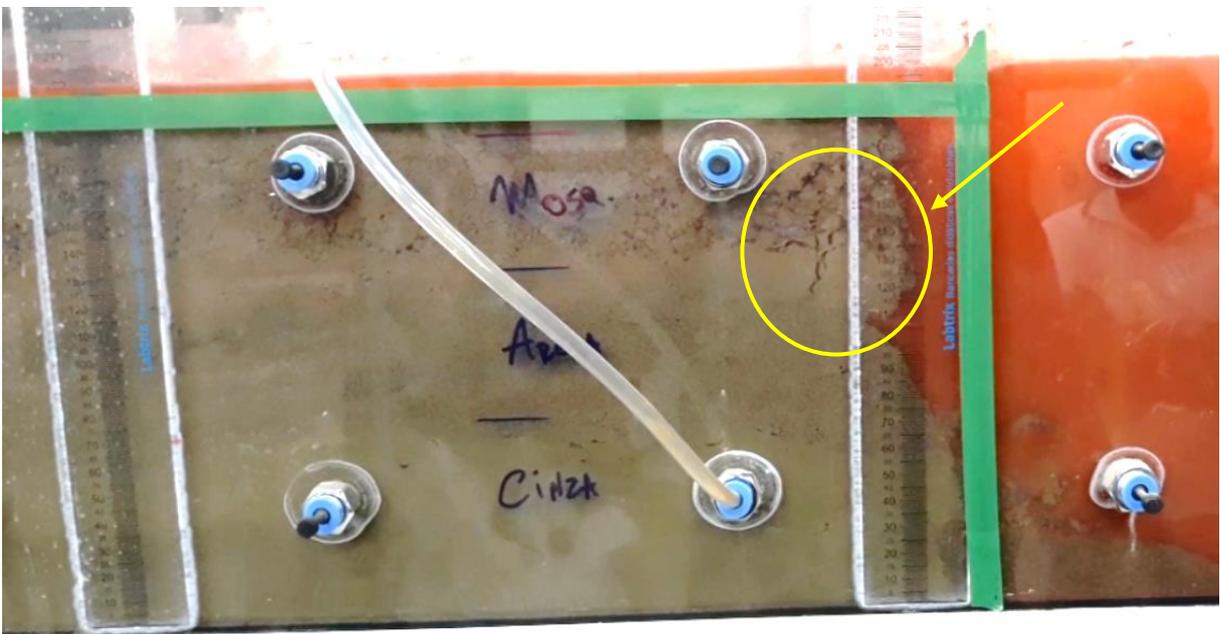


Figura 85: Desmoronamento de uma parte do maciço, em destaque, além do surgimento de novas trincas, possivelmente de tração, uma vez que parte da camada está em balanço.
Fonte: Autor, 2018.

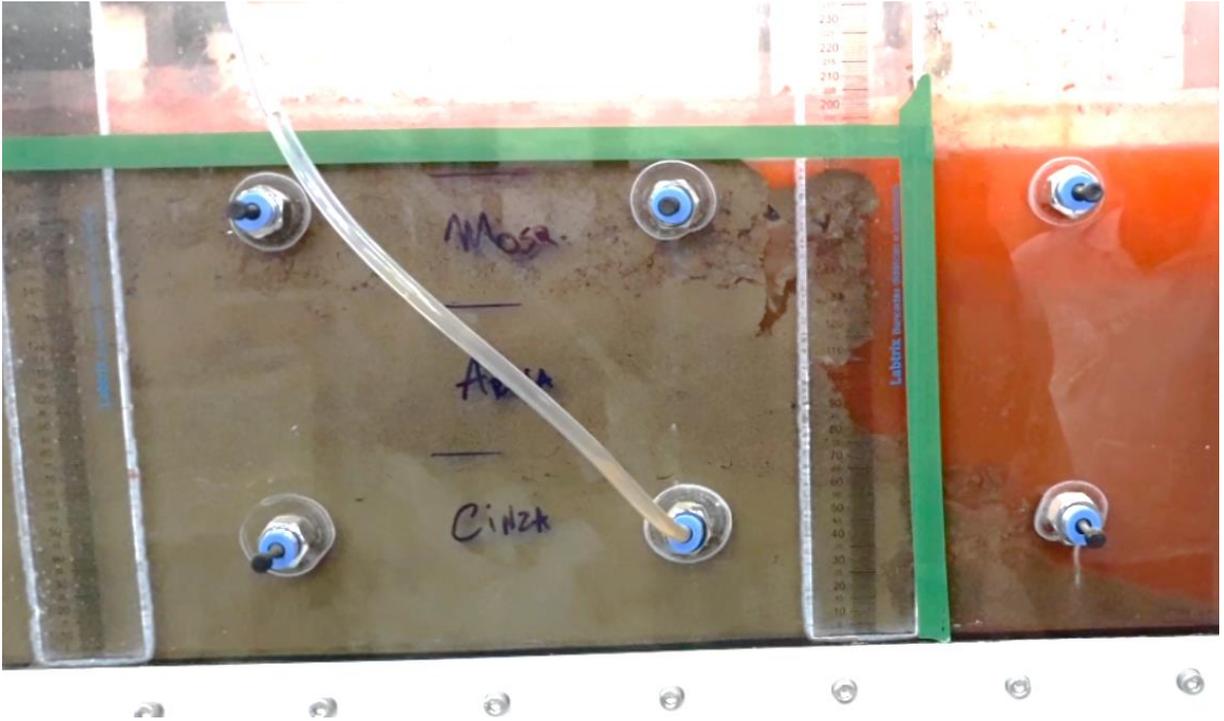


Figura 86: Desmoronamento de mais uma parte da margem do maciço. Cita-se o desmoronamento como o movimento que ocorreu, pois, o nível de água estava estático.
Fonte: Autor, 2018.

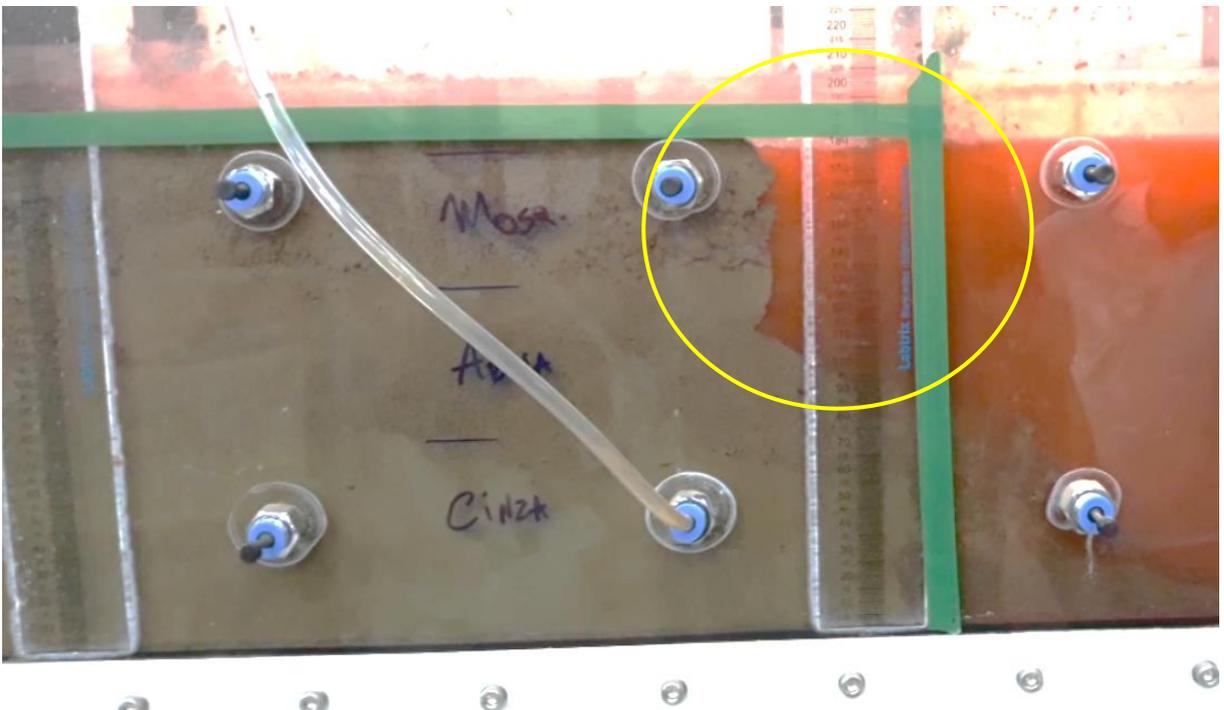


Figura 87: Maciço após o desmoronamento de parte da camada.
Fonte: Autor, 2018.

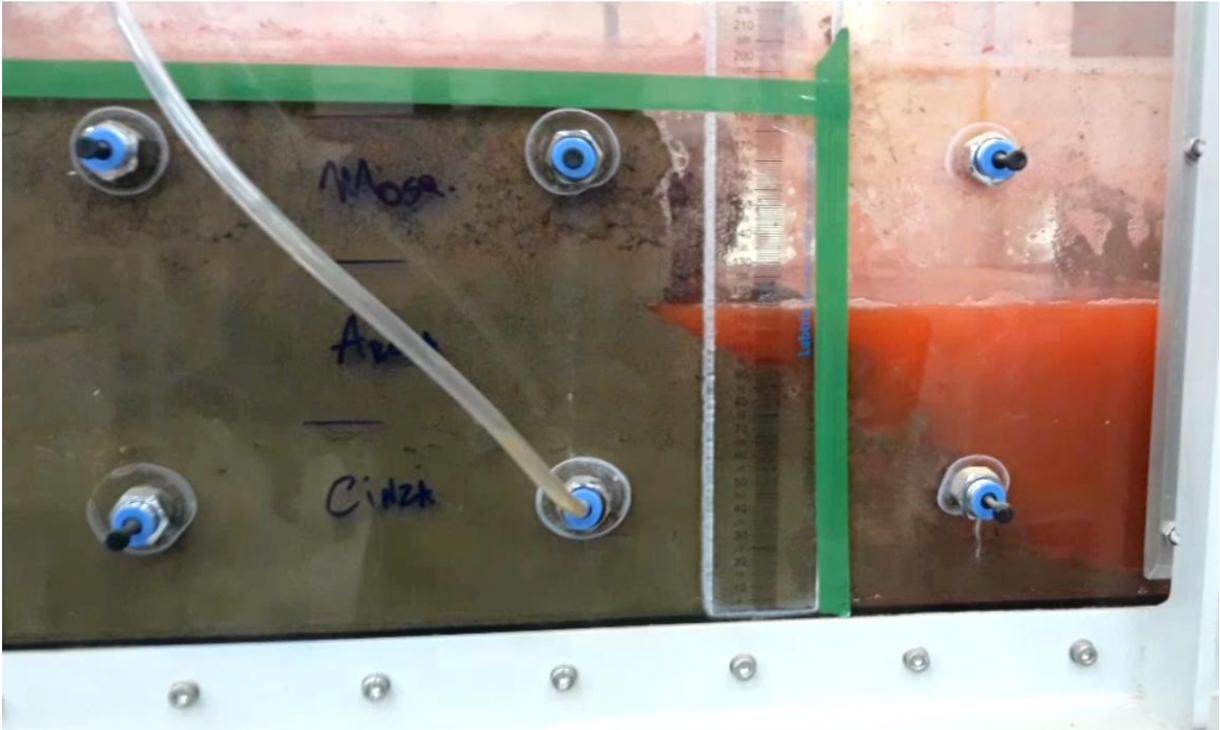


Figura 88: Início da drenagem do sistema, para avaliação do comportamento do maciço após a redução do nível de água.
Fonte: Autor, 2018.

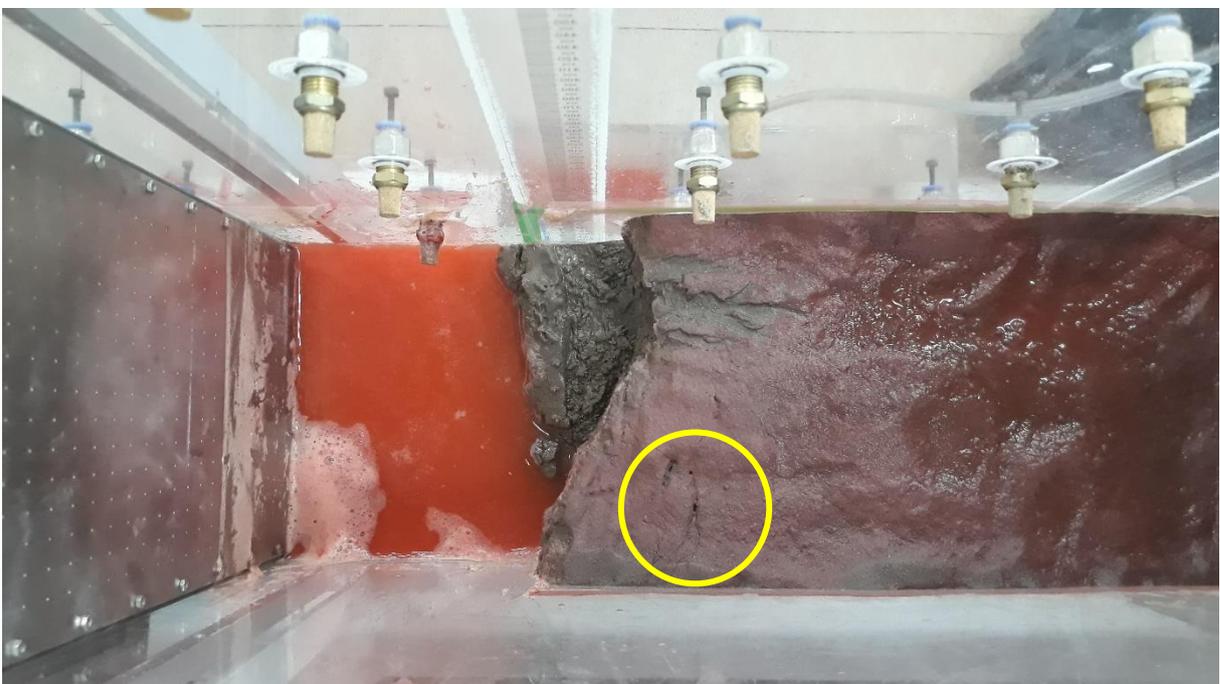


Figura 89: Vista superior do experimento, após a drenagem e início das fissuras na superfície, a exemplo da Figura 50. Reporta-se como o início de escorregamento.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 90: Fissuras de tração no topo do maciço. Indicativo de início do movimento de escorregamento, uma vez que boa parte do maciço se mantém inteiro.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 91: Movimento de escorregamento de parte do maciço.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 92: Movimento de escorregamento. Observa-se que o movimento de fato formou uma cunha (em destaque) na margem remanescente e preservou-se uma parte do maciço, após a descida das águas, a exemplo daquilo que ocorre na figura 3, sobre o escorregamento que ocorre na vazante do rio (perfil esquemático).

Fonte: Autor, 2018.

Finalizado este ensaio, decidiu-se por aproveitar o maciço já construído, uma vez que a avaliação que obstinava era puramente qualitativa da mecânica de ruptura e seccionou-se a parte próxima à cunha de ruptura, reinstalou-se a placa permeável e, novamente, submergiu-se o maciço.

Passados mais 5 dias, removeu-se a placa e iniciou-se o gradual esvaziamento do sistema. Na Figura 93 a Figura 101, a seguir, temos a forma que o maciço veio a romper.

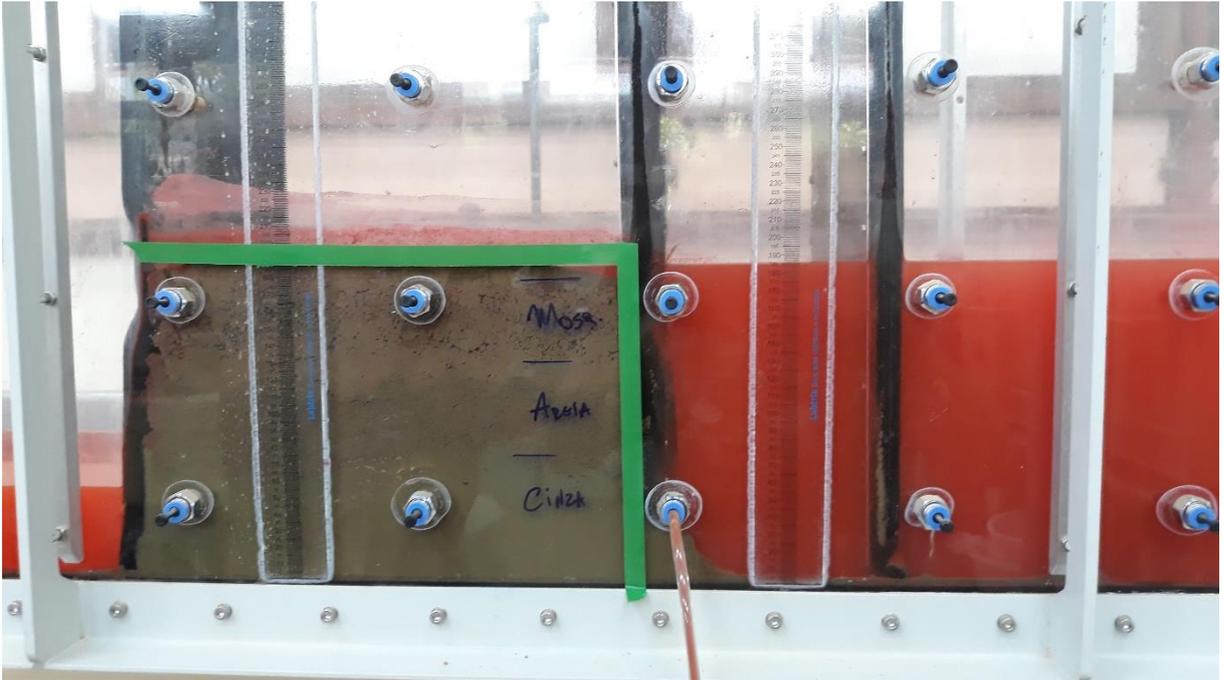


Figura 93: Modelo inicial, como delimitações antes da remoção da placa permeável.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 94: Remoção da placa permeável do modelo e início da erosão da camada arenosa.
Fonte: Autor, 2018.

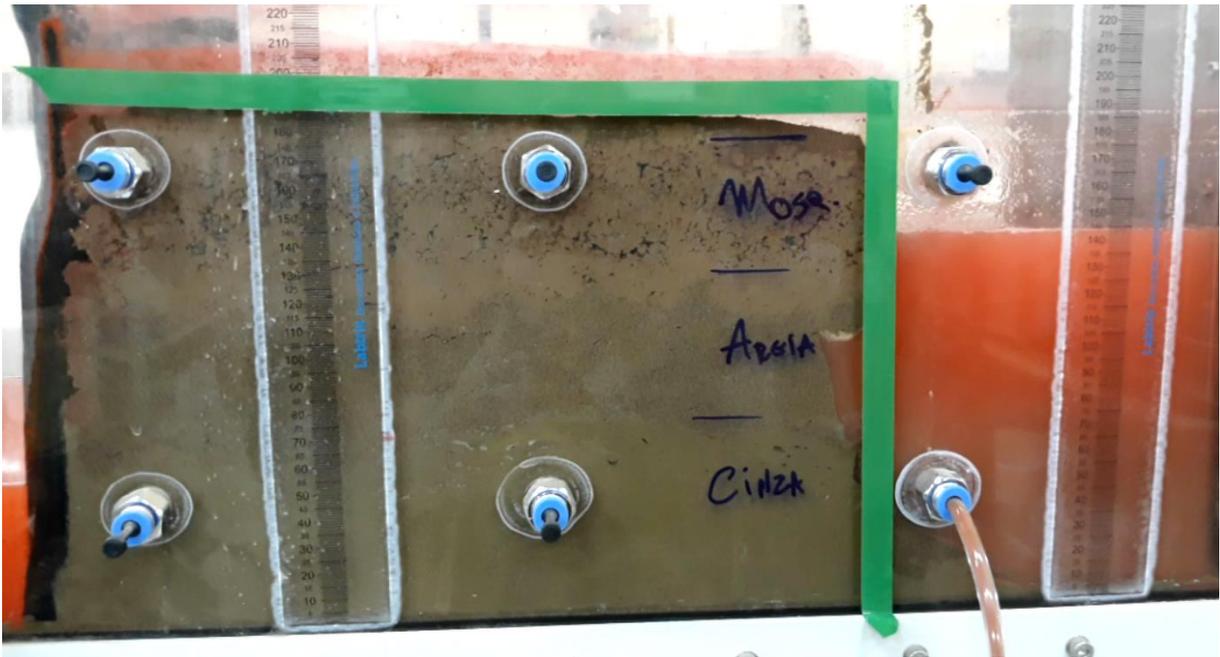


Figura 95: Estabilização da erosão da camada arenosa e início da drenagem da água do sistema.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 96: Aumento da erosão da camada de areia, deixando a camada de solo "mosqueado" em balanço.
Fonte: Autor, 2018.

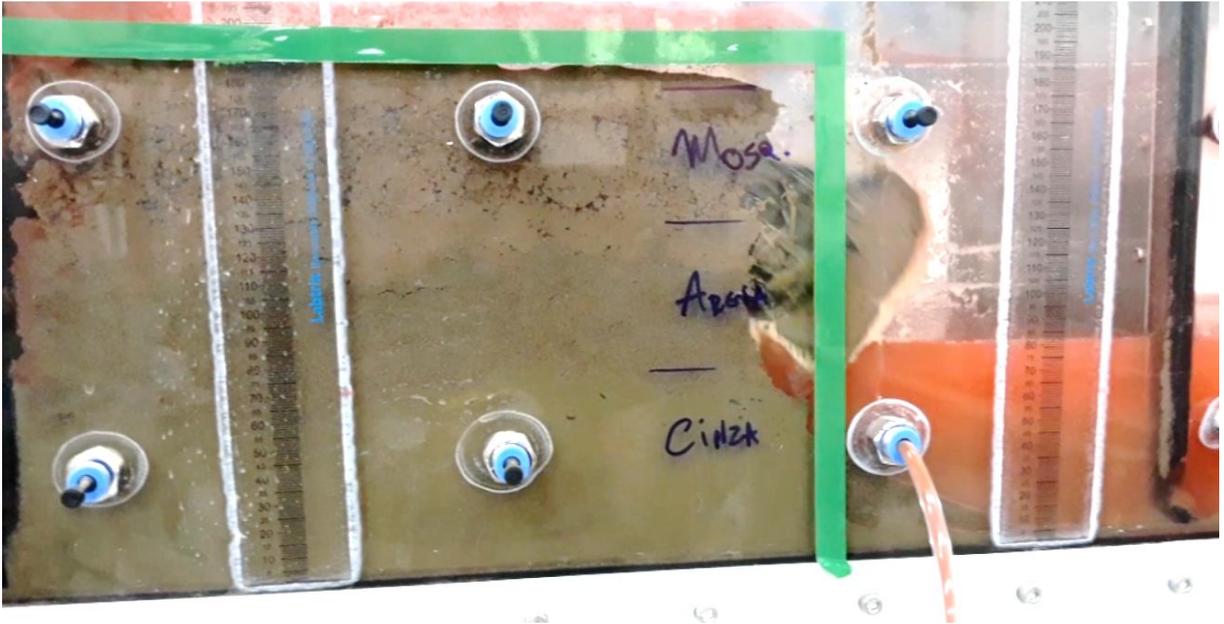


Figura 97: Desabamento abrupto da camada de solo "mosqueado", tal como o perfil esquemático apresentado na figura 7.
Fonte: Autor, 2018.

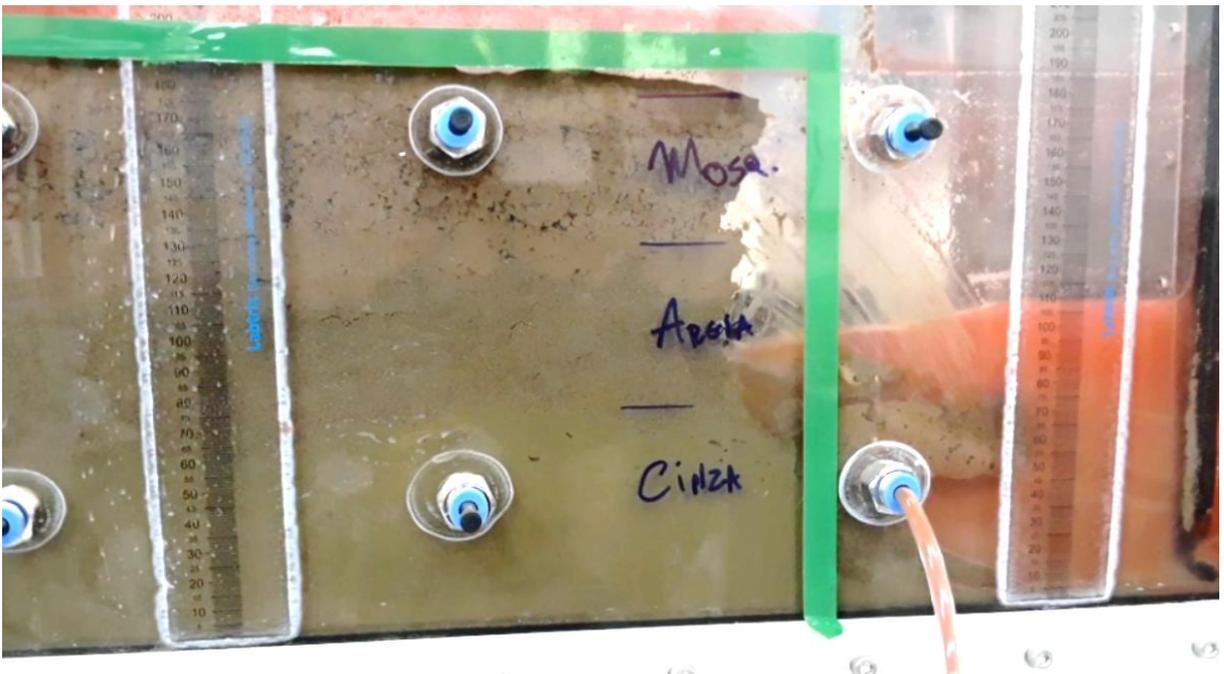


Figura 98: Situação do maciço após o desabamento.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 99: Vista superior do maciço, formação da cunha de deslizamento e drenagem até o centro da camada de solo "cinza".
Fonte: Autor, 2018.



Figura 100: Vista superior do maciço e do desabamento abaixo.
Fonte: Autor, 2018.

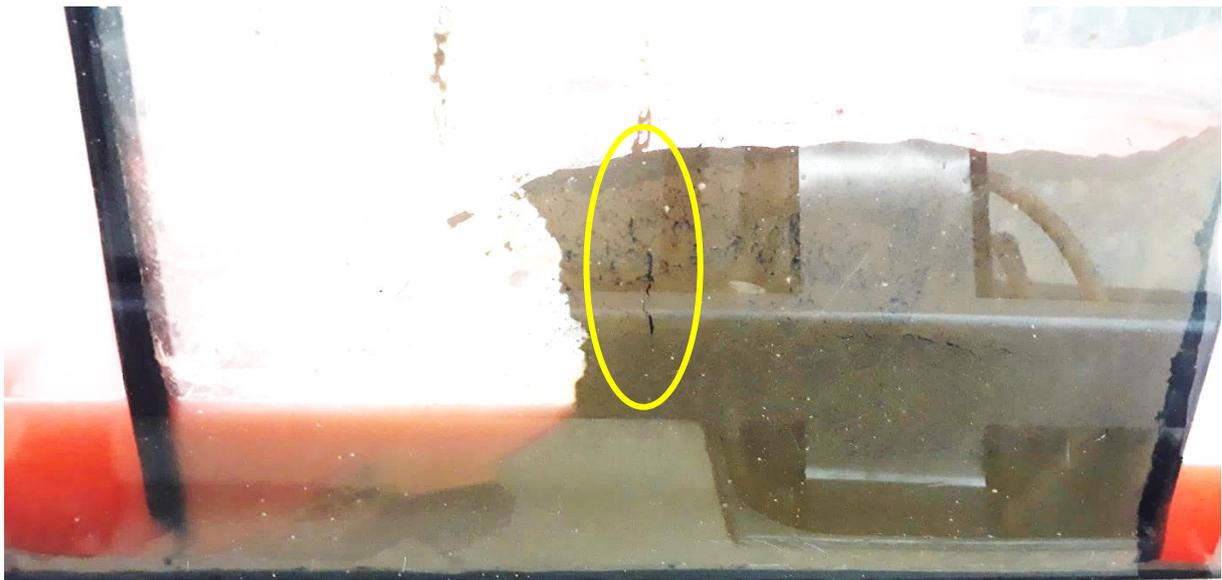


Figura 101: Vista lateral do maciço após o desabamento. Já é possível notar a formação das trincas de tração (em destaque) e novos desabamentos.
Fonte: Autor, 2018.

Observadas as imagens e filmagens, foi possível concluir que os mecanismos de ruptura desenvolvidos, até então, apenas teoricamente ao longo deste trabalho (escorregamento, desmoronamento e desabamento) estão alinhados ao comportamento do maciço em escala reduzida, uma vez que no desenvolvimento dos dois ensaios apresentados, foi possível observar a ocorrência das três formas de movimentação.

Em ambos experimentos, é possível notar a “fragilidade” da camada arenosa do maciço e como a mesma tende a reger o movimento de massa que ocorrerá. A alta permeabilidade desta partição do maciço tende a modificar rapidamente a condição do solo conforme o nível das águas, no entanto, as camadas adjacentes, principalmente aquela de solo “mosqueado” que possui permeabilidade menor (cerca de 50 vezes menor que a do solo “areia”), tende a se saturar e não perder esta quantidade de água de maneira abrupta, logo fica bem mais pesada, que faz colapsar com a erosão de sua base (camada arenosa).

Tal como demonstra a teoria, os movimentos de ruptura são avaliados com auxílio da resistência ao cisalhamento do solo e sua resistência à compressão simples (para registro da coesão) e para os solos que apresentaram movimentação

(“mosqueado” e “areia”) é possível notar grandes diferenças entre suas capacidades de suporte, sendo o solo “mosqueado” aquele que apresenta maiores valores de coesão e resistência ao cisalhamento e isso se observa no 2º ensaio, Figura 96, em que por alguns instantes a camada de topo ficou em balanço, sendo sustentada apenas pela coesão das partículas de solo e depois vem a desabar.

Noutra situação, no 1º experimento, na Figura 91 e Figura 92, que a ruptura (por escorregamento) ocorre pela razão dos esforços terem excedido a resistência ao cisalhamento (inclusive com a formação de uma cunha característica), a camada de solo “mosqueado” naquele lado ainda possuía certa base (a camada de “areia” ainda lá se mantinha), no entanto, o peso excessivo da camada de topo (saturada) fez com que as partículas deslizassem umas sobre as outras e levou a camada se movimentar para baixo, em busca de equilíbrio.

Finalmente, ainda no 1º experimento, na Figura 83 e Figura 84, notamos o desmoronamento da camada submersa, em razão da erosão de uma parte da base, fazendo que parte do maciço se rompa pela superação da resistência efetiva do solo.

Os ensaios desenvolvidos basicamente se prestaram à forma em que os maciços tendem a se romper, logo a sua avaliação se restringe aos aspectos qualitativos da pesquisa, uma vez que pelas limitações do equipamento e do próprio programa, outras variáveis não puderam ser avaliadas e melhor correlacionadas, tais como tensões atuantes no maciço (as dimensões são proporcionais aos esforços), nível de água no interior do maciço, entre outras.

5.7. Dos modelos computacionais

Para finalizar o ciclo de análises que se propôs neste trabalho, inserimos este último tópico que trata da modelagem computacional dos maciços que sofrem com o fenômeno das Terras Caídas, em suas múltiplas facetas. Os sistemas computacionais permitem o estudo mais célere de que maneira o maciço pode vir a romper, além de serem impostas ao sistema, condições de contorno que são bastante ao estudo e tendem a auxiliar na visualização da questão, como a variação das espessuras das camadas, a disposição das camadas vertical e horizontalmente, o transiente de nível de água, para os ciclos de cheias e vazantes, possível cunha de ruptura e o modo de

otimização, que permite pesquisar na biblioteca de possíveis análises de cada programa o método de cálculo e a situação mais desfavorável possível.

Claramente, os sistemas computacionais, sobretudo no campo da geotecnia, possuem ainda um longo caminho a percorrer para trazer mais informações aos seus usuários, entretanto, não pela falta engenhosidade em sua programação (dado que alguns fazem uso de refinadas técnicas de cálculo numérico, o método dos elementos finitos), mas grande parte da incerteza que os cercam é dada pela investigação do subsolo que por vezes é insuficiente, a disposição naturalmente randômica das camadas de solos e rochas (estratigrafia) e pelas condições de contorno que podem ser impostas de maneira incorreta, gerando falsas respostas e interpretações enganosas.

Para este trabalho, a modelagem computacional é visualizada como algo mais sucinto, amostral e paramétrico, pois, a pesquisa se centrou em basicamente remontar um único ponto de ocorrência das Terras Caídas, por meio da caracterização dos solos coletados, análise da sondagem e observações de campo para que na reunião destas informações, fosse elaborado um modelo padronizado, a exemplo daquilo que fora realizado nos experimentos de maciços em miniatura.

Assim, seguem os extratos de 2 (dois) *softwares* com alguns comentários sobre as informações necessárias a criação do modelo, as respostas obtidas e a sua correlação com o fenômeno miniaturizado e o fenômeno real.

5.7.1. GEO5[®]

Este *software* da empresa *Fine Civil Engineering Software*, o qual permite a análise de diversos tipos de estruturas que envolvem solos e rochas, tais como fundações rasas, profundas, *radiers*, muros de arrimo, estabilidade de taludes, de rochas, empuxos, aterros, entre outros. Sua interface simplificada, permite ao usuário que tenha os dados da geometria do maciço, os dados relativos à resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) e o peso específico natural (campo) e grau de saturação.

Para que o modelo fosse o mais próximo da realidade de campo e daquele modelo em miniatura (item anterior), buscou-se representar as camadas de solo

dentro de uma certa proporção, novamente alinhando as observações de campo, a sondagem realizada e a idealização de um modelo representativo. Conforme essas informações, temos o modelo computacional a seguir (Figura 102), sendo o solo da primeira camada (de cima para baixo), uma areia de praia, com $h = 2\text{m}$, o segundo, o solo “mosqueado” com $h=8\text{m}$, a terceira, o solo “areia” com $h = 4\text{m}$ e a última camada de solo “cinza” com $h = 18,05\text{m}$, sendo a altura total do maciço de $32,05\text{m}$. Esta última camada foi ampliada de maneira a compreender a meia seção de rio, formando assim uma margem tipicamente observável em campo.

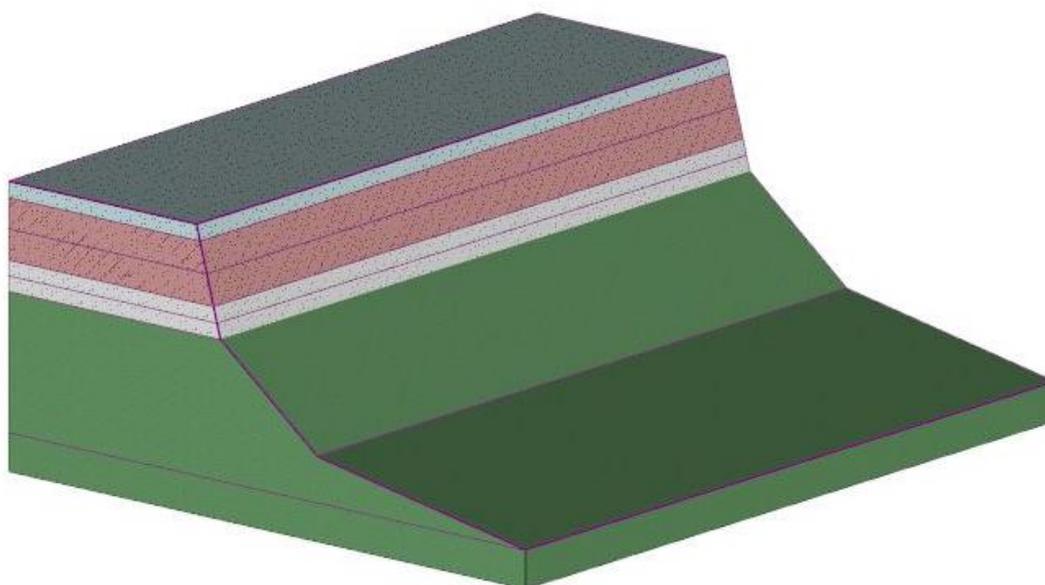


Figura 102: Modelo computacional tridimensional do maciço-padrão para avaliação de deslizamento.
Fonte: Autor, 2018.

Ainda sobre as camadas de solos, reporta-se que para as camadas de solo “mosqueado” e “areia”, foi feita uma subdivisão na metade da altura de cada uma dessas, a fim de fosse refinada a análise, uma vez que a depender da posição do nível de água, o maciço experimentalá tensões totais (quando acima do N.A.) ou efetivas, quando submerso.

Inseridos os dados necessários, posicionou-se o nível de água para 1ª simulação no topo do maciço (cota $32,05\text{m}$), ajustou-se o modelo para que utilizasse a metodologia de Morgenstern-Price, que segundo Freitas (2011)⁹⁷:

⁹⁷ FREITAS, Marco Antônio Coelho. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Porto (POR): Universidade do Porto – U.Porto. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Geotecnia), 2011. p. 15.

Apresentado em 1965, consiste num método de análise de estabilidade de taludes no qual todas as condições de equilíbrio e de fronteira são satisfeitas e a superfície de rotura (*sic*) poderá tomar qualquer forma. **É também uma aplicação do método das fatias, e exige cálculo computacional derivado do complexo processo iterativo.** (Grifei).

Basicamente, este método considera que não existem forças nulas entre blocos (fatias). A resultante das forças normal e de cisalhamento atuantes entre blocos têm inclinações diferentes para cada um. O método é rigoroso no que toca à verificação das três equações de equilíbrio – equações de equilíbrio das forças horizontais, verticais e de momentos. O fator de segurança é obtido através da iteração da inclinação das forças atuantes entre blocos e do próprio fator de segurança.

Escolhido o método, optou-se pela otimização da análise, que consiste na alteração consecutiva da localização de pontos da superfície de deslizamento, executada automaticamente pelo programa, e na sua verificação, uma vez que a mudança da posição de pontos influencia o valor do fator de segurança da estabilidade do talude. Com isso, é possível obter o ponto com o menor fator de segurança para aquelas configurações (estratigrafia e nível de água), o que se mostra interessante ao trabalho, pois se deseja a visualizar as camadas mais frágeis e que tendem a romper *in loco*.

Finalmente, “rodaram-se” 6 (seis) cenários possíveis no programa (Figura 103 a Figura 108), no intuito de compreender em quais camadas a superfície de ruptura (deslizamento) viria a passar. Os cenários, por óbvio, ficaram em função do nível de água que está presente no maciço a cada época do ano, por exemplo, o 1º cenário se inicia no topo do maciço, situação da cheia do rio e para o 6º cenário, o nível de água estaria em torno de 12m abaixo daquele do primeiro cenário, representado a vazante. Isso posto, seguem as respostas dadas pelo *software* para cada uma das situações constituídas.

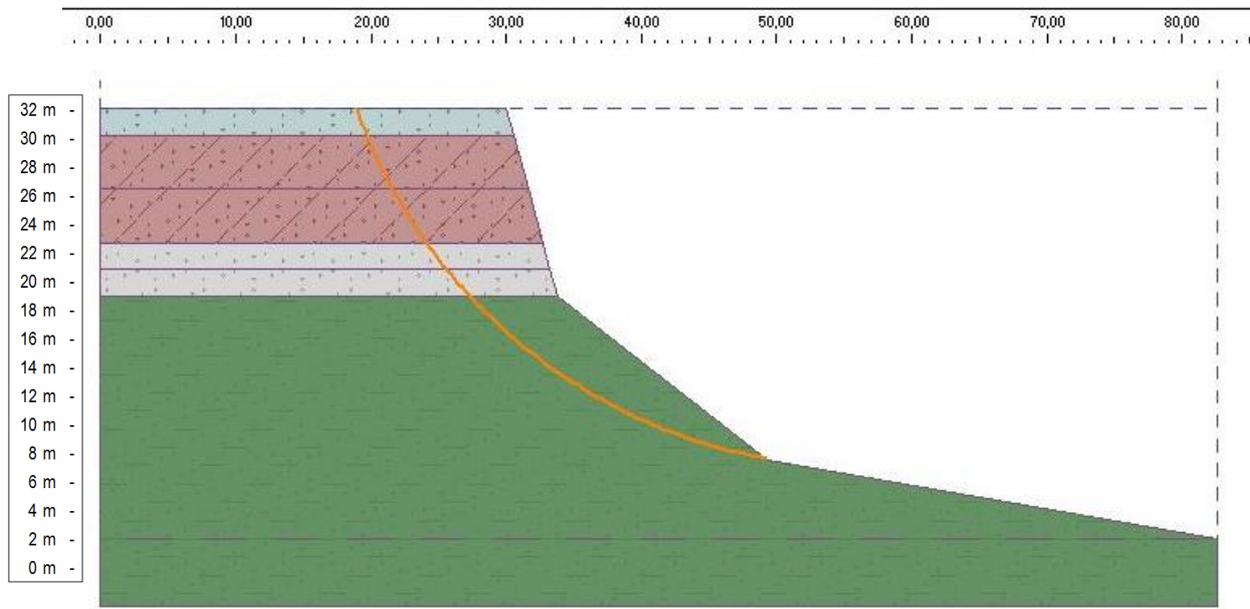


Figura 103: 1ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no topo (cota 32,05m). Este maciço rompe por tensões efetivas apenas. A superfície de ruptura passa por todas as camadas.

Fonte: Autor, 2018.

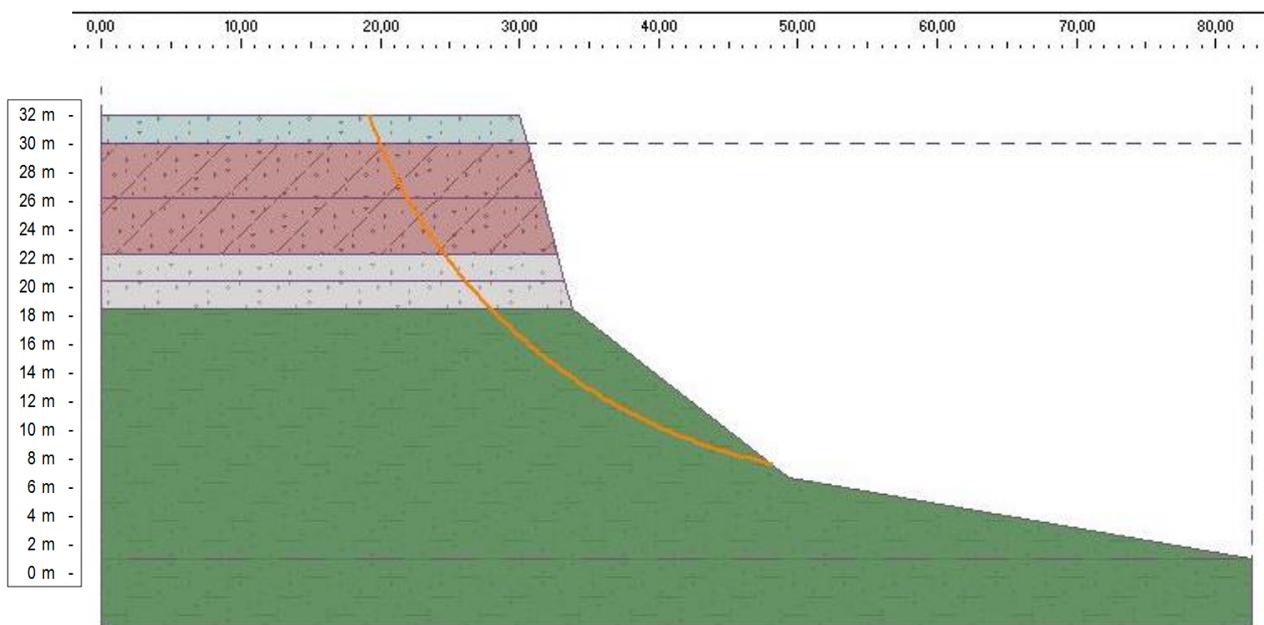


Figura 104: 2ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no topo da camada de solo "mosqueado" (cota 30,05m). Este maciço rompe também por tensões efetivas e totais (solo acima do N.A.). A superfície de ruptura passa por todas as camadas.

Fonte: Autor, 2018.

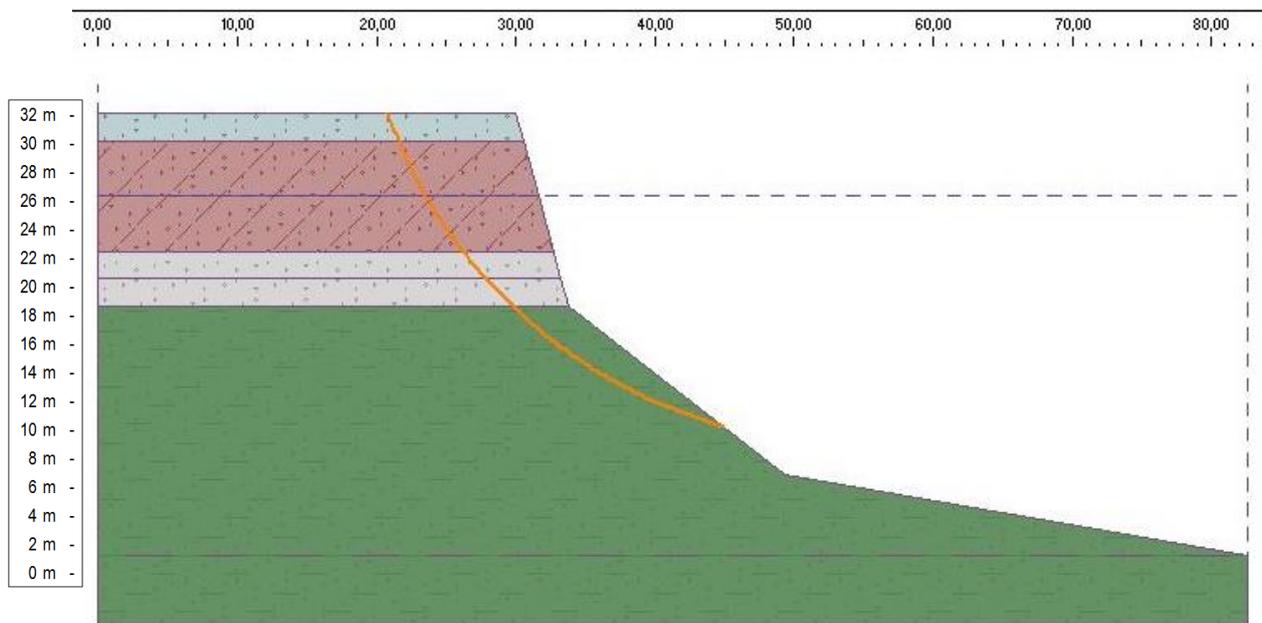


Figura 105: 3ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no centro da camada de solo “mosqueado” (cota 26,05m). Este maciço rompe por tensões efetivas e totais (solos acima do N.A.). A superfície de ruptura passa por todas as camadas.

Fonte: Autor, 2018.

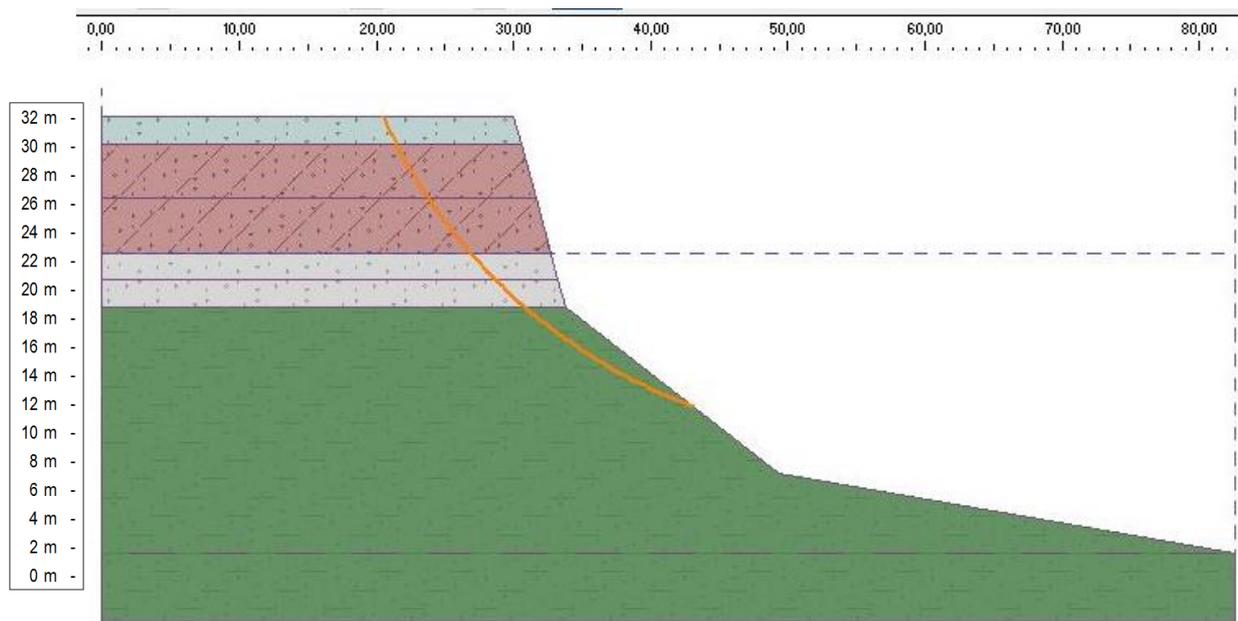


Figura 106: 4ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no topo da camada de solo “areia” (cota 22,05m). Este maciço rompe também por tensões efetivas e totais. A superfície de ruptura passa por todas as camadas, porém com menor participação no solo “cinza”.

Fonte: Autor, 2018.

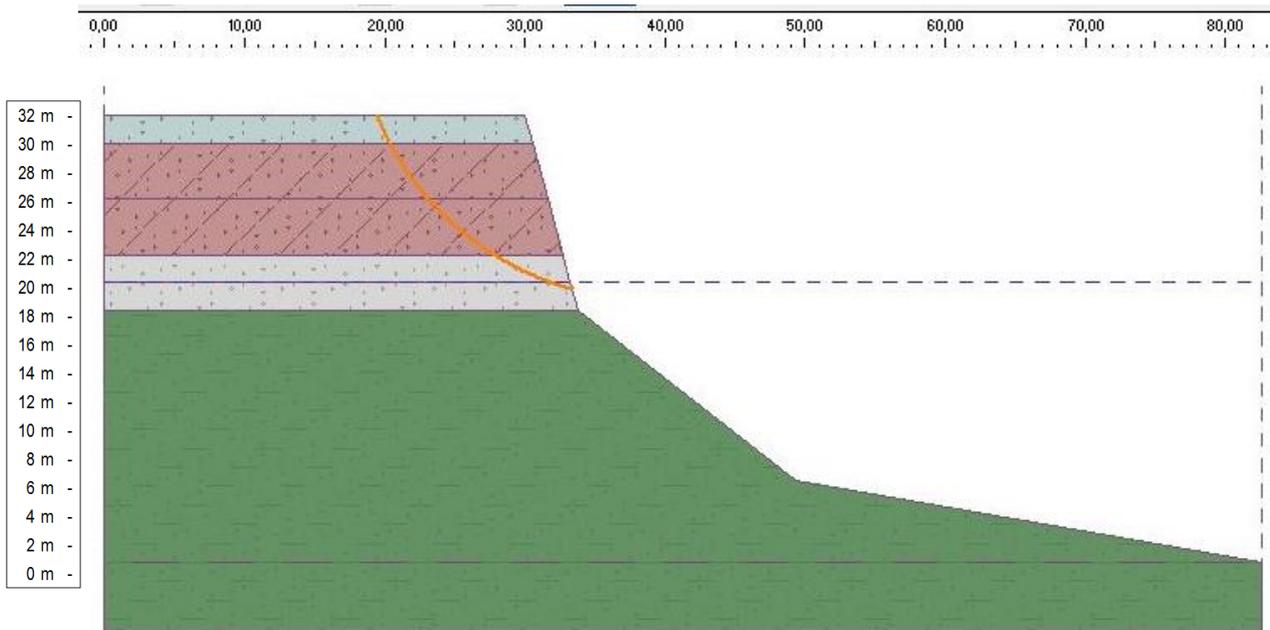


Figura 107: 5ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. no centro da camada de solo “areia” (cota 20,05m). Este maciço rompe por tensões totais apenas. A superfície de ruptura passa apenas pelas camadas de solo “mosqueado” e “areia”.
Fonte: Autor, 2018.

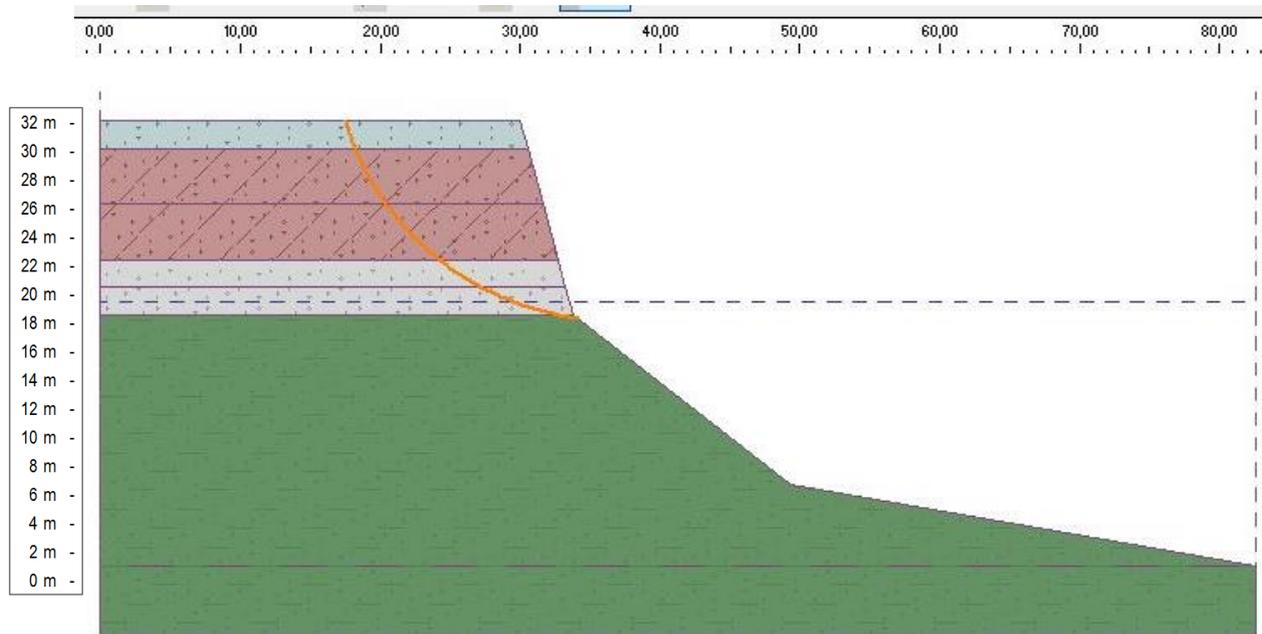


Figura 108: 6ª simulação realizada, pelo método de Morgenstern-Price, com N.A. na cota 19,05m, que em aproximação representa a vazante média no local de estudo. Este maciço rompe por tensões totais e efetivas. A superfície de ruptura passa apenas pelas camadas de solo “mosqueado” e “areia”.
Fonte: Autor, 2018.

Após o lançamento e resposta dos modelos construídos, observa-se que a cada vez que o nível de água desce, há também o decréscimo do fator de segurança (como demonstrado no Gráfico 19, a seguir), ou seja, maior a instabilidade gerada no

maciço quando no mesmo passa para regime de tensões diferentes (submerso as tensões efetivas dominam e saturado, as tensões totais). A perda da força de empuxo (da submersão) traz um forte componente de desequilíbrio, principalmente àquelas camadas em que a coesão é menor (solo “areia” e “cinza”), como coletado na teoria disposta em capítulo anterior.

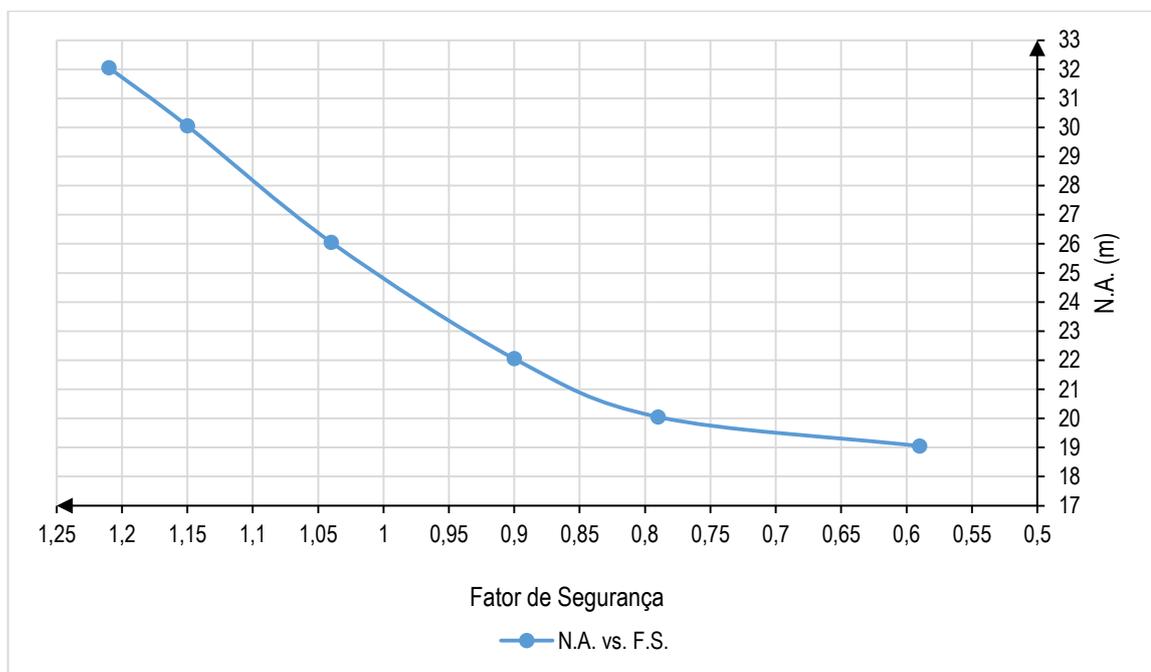


Gráfico 19: Nível de Água e Fator de Segurança do maciço-padrão.
Fonte: Autor, 2018.

As dimensões das superfícies de ruptura também foi algo bastante interessante de ser observado a cada simulação completa. As maiores superfícies de ruptura se mostraram inversamente proporcionais à alteração (descida) do nível de água proposto, corroborado a tese que quanto mais baixo o nível, mais severo o efeito sobre as camadas menos coesa. No caso o solo “areia” que serve geralmente de base ao solo “mosqueado” a redução do nível logo lhe atinge e logo lhe faz escorregar, desestabilizando assim as camadas sobrejacentes.

Cita-se também que o coeficiente de segurança também está aliado à participação das camadas no equilíbrio limite, para aquele coeficiente mais elevados, há uma tendência de participação de todas as camadas (até pela dimensão da superfície de ruptura), para aqueles menores, menos camadas participam.

As simulações realizadas neste programa, ainda que sabidamente limitadas, em muito concordam com as análises feitas dos solos isoladamente (**5.1.4. Dos materiais e sua estrutura**), quanto aos modelos em escala reduzida (**5.1.6**). O Gráfico 20 que segue, é uma importante ilustração daquilo que se apresenta na natureza e no campo experimental.

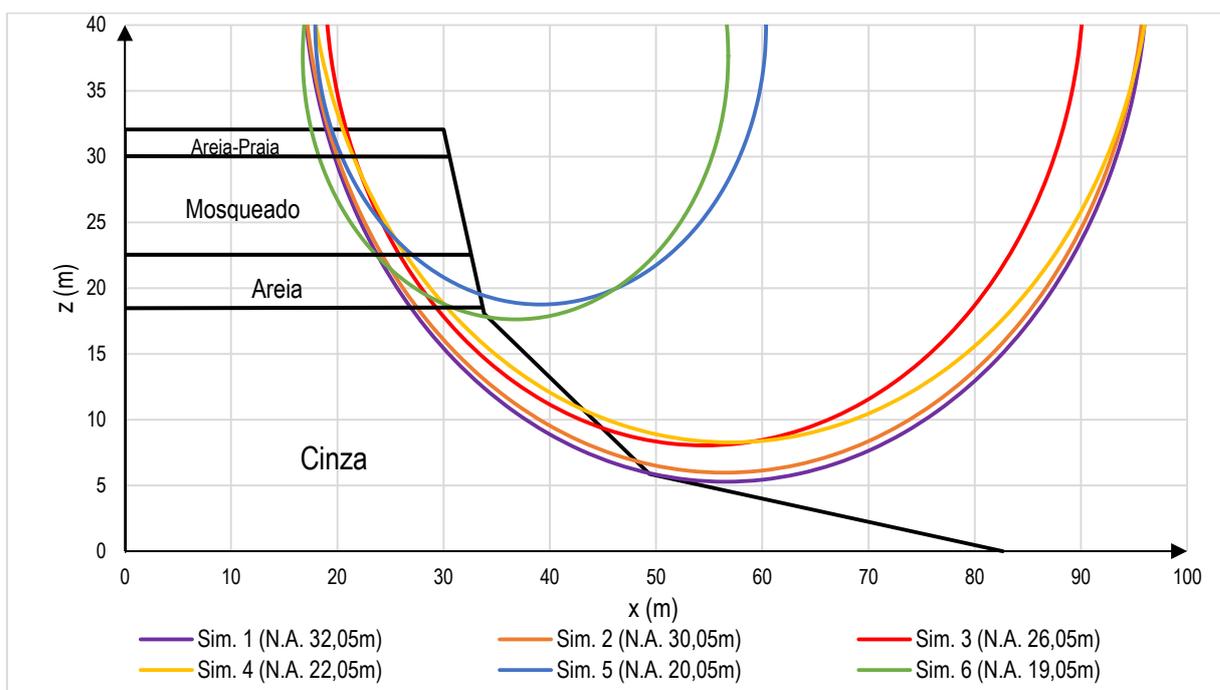


Gráfico 20: Superfícies de ruptura locadas no maciço-padrão, com dados do nível de água aplicados nas simulações.

Fonte: Autor, 2018.

Ao se finalizar esta parte da análise, é de importante (re)mencionar as dificuldades e limitações que a aplicação deste programa computacional trouxe à baila, sobretudo no que tange ao alinhamento da situação imposta no ambiente computacional e aquilo que se observa em campo. O uso do *GEO5*[®] se mostrou extremamente proveitoso e ilustrativo daquilo que pode ser visto em campo, no entanto algumas condições de contorno que se mostram interessantes de serem vistas, infelizmente não puderam ser aplicadas, e.g., uma variação automática do nível do rio ao longo de meses (tal como na realidade), o comportamento da água dentro do maciço, por meio das permeabilidades horizontal e vertical, análise do comportamento das tensões conforme a variação do nível de água em meses, até a própria apresentação dos resultados é bastante simplória, necessitando de

melhoramento (Gráfico 20) para uma avaliação sincrética da realidade, da escala reduzida e do modelo computacional.

Boa parte das condições elencadas são diretamente relacionadas ao refinamento dos cálculos, a possibilidade de geração de vários cenários e a visualização de um demasiado número de dados. Como observado, o *GEO5*® acabar por tolher a experiência do usuário, forçando-o a limitar suas análises a poucos casos, de um modo mais direto, sem a leitura do quadro completo. Suas respostas frente ao caso concreto são interessantes num primeiro momento, mas para a modelagem computacional, é imperativo ir além.

5.7.2. *Geostudio*®

Da mesma forma que no item anterior, realizou-se uma segunda modelagem via *software* geotécnico com intuito de como se procede o fenômeno das terras caídas de acordo a disposição dos materiais e a posição do nível de água.

Para que se atingisse esta análise, recorreu-se ao *Geostudio*®, da empresa canadense Geoslope, uma suíte de 7 (sete) programas que se relacionam a fim de gerar uma série de análises sobre o caráter geotécnico de estruturas naturais (margens de rios, encostas, entre outros) e de estruturas projetadas (muros, contenções, fundações, entre outros). Para análise que aqui se propõe, utilizamos apenas 2 (dois) destes sistemas: o *Seep*, para avaliação do comportamento da água no maciço-padrão, principalmente a configuração interna da água no maciço conforme a mudança do nível dos rios ao longo do ano (*in casu*, durante o desenvolvimento da vazante). Em seguida, para avaliação do equilíbrio do maciço, utilizou-se o *Slope*, programa que permite a avaliação da estabilidade de maciços.

Pela natureza da suíte de avaliação geotécnica, o *Geostudio*® permite a análise das diversas condições de equilíbrio que podem haver no maciço em função do nível que o rio apresenta naquela determinada época, para isso, basta a inserção das informações de permeabilidade e o desenvolvimento de uma função⁹⁸ que traduza a

⁹⁸ Neste caso, a função aplicada foi linear ($f(x) = ax + b$), onde o ponto sobre o eixo das ordenadas é a cota máxima do rio e o ponto seguinte, a cota mínima, no tempo de 120 dias (4 meses). A avaliação nestes termos foi mais direta, o que não exige análise posteriores com maiores critérios sobre a configuração do nível do rio em função do tempo.

mudança do nível do rio em função do tempo. Há também a necessidade de encadeamento lógico das atividades, pois uma vez observados os comportamentos internos do maciço em função do tempo (poropressões, direções dos fluxos, entre outras questões) que se tornará possível o programa seguinte avaliar as condições de equilíbrio.

Isso posto, eis a título de exemplo, o modelo utilizado (Figura 109), semelhante ao testado no item anterior (geometria e disposição de camadas), a seguir, sendo o solo “areia” utilizado tanto no topo quanto na camada intermediária, o solo “mosqueado” aplicado como a camada que oferece certa resistência (por ser mais coesiva) e o solo “cinza” que representa o restante do maciço.

A seguir, tal como utilizado no *GEO5*[®], fez-se uso do modelo de cálculo de Morgenstern-Price pelas mesmas razões lá elencadas, além de fazer uso também das condições de otimização em cada um dos modelos, para encontrar a configuração mais desfavorável.

Feitos os ajustes, seguiu-se com o início das análises, sendo aqui apresentadas (figuras 109 a figura 118), as configurações dos fluxos de água no maciço e os fatores de segurança em relação ao nível de água (o qual se relaciona com o tempo).

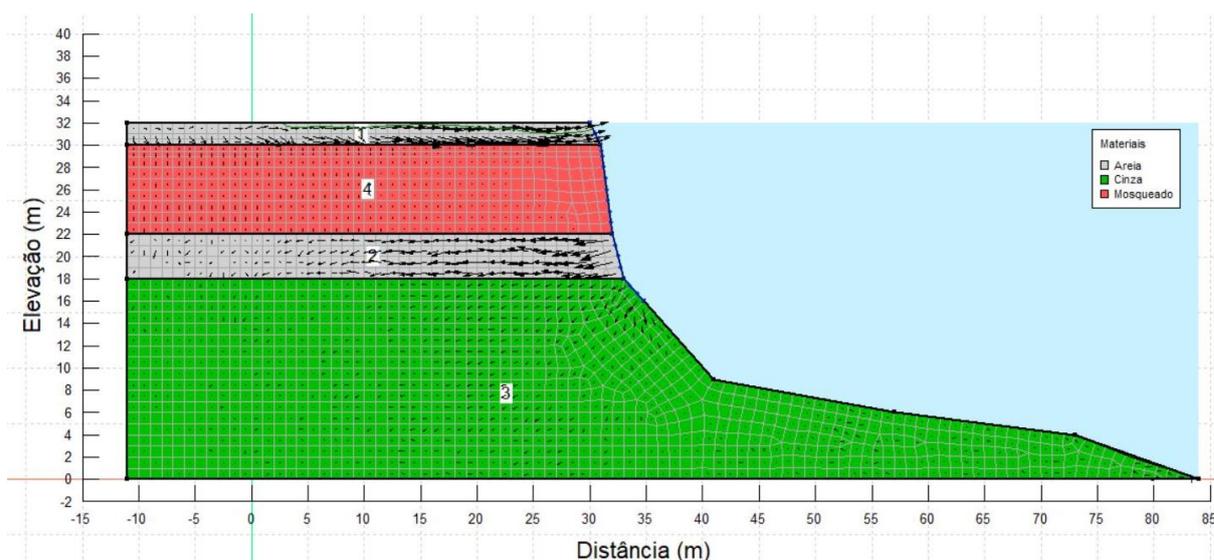


Figura 109: Talude-padrão, com nível de máximo (32m), no tempo igual a 0 mês, com visualização da direção da poropressão (setas).

Fonte: Autor, 2019.

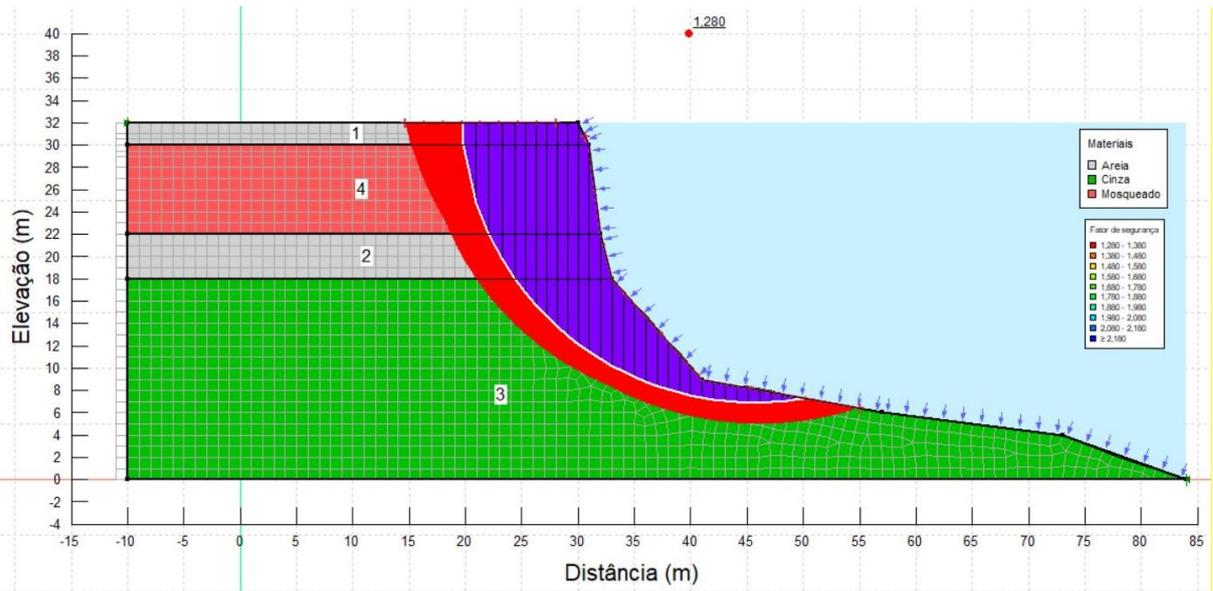


Figura 110: Talude-padrão, com nível de água de 32m, no tempo igual a 0 mês, sendo o FS=1,28, menor que 1,50 (coeficiente aceitável).
Fonte: Autor, 2019.

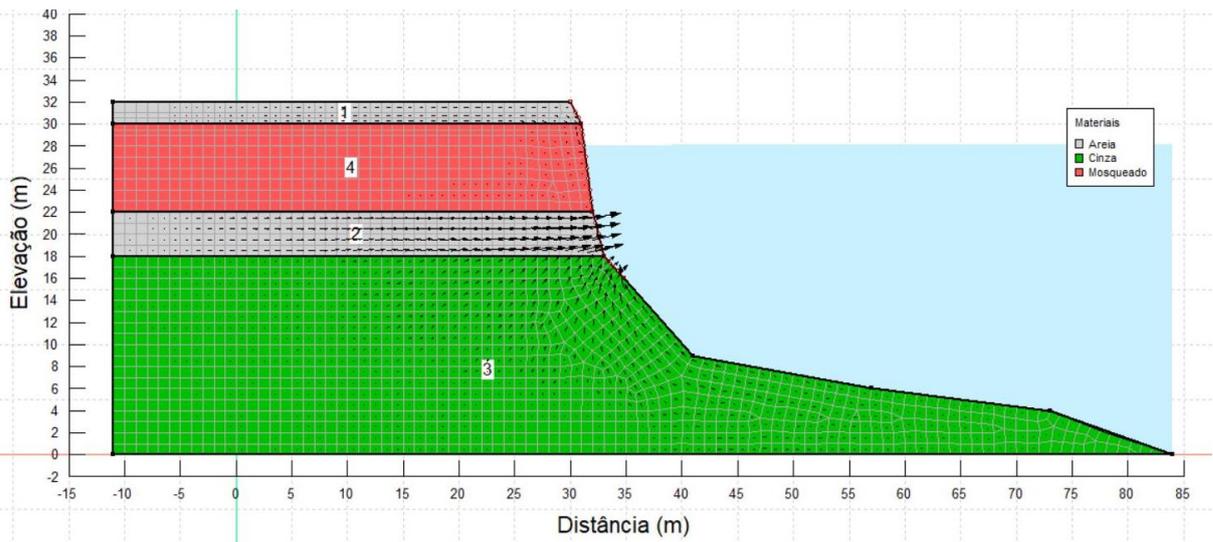


Figura 111: Talude-padrão, no tempo de 1 mês (cota 28m).
Fonte: Autor, 2019.

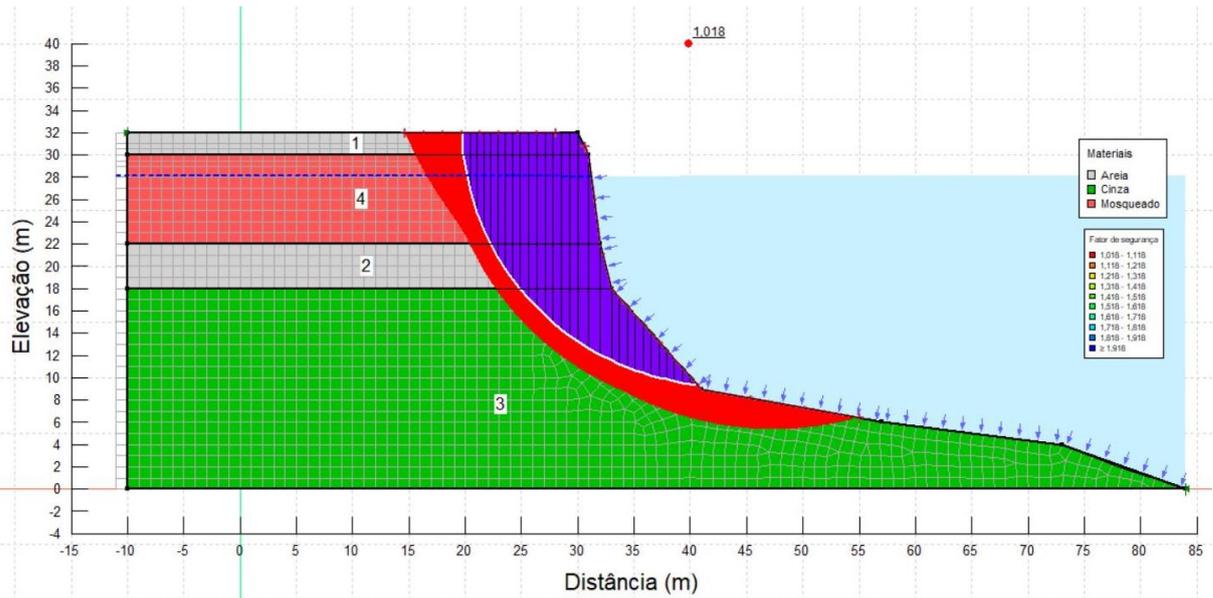


Figura 112: Talude-padrão, no tempo igual a 1 mês (cota 28m), com $FS=1,018 < 1,50$.
Fonte: Autor, 2019.

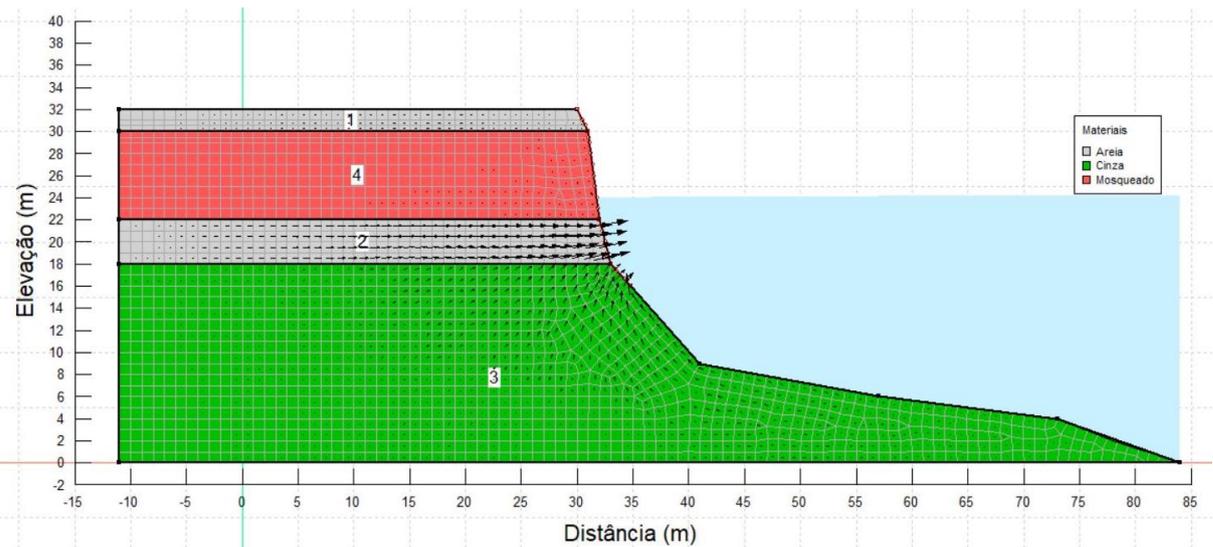


Figura 113: Talude-padrão, no tempo igual a 2 meses (cota 24m).
Fonte: Autor, 2019.

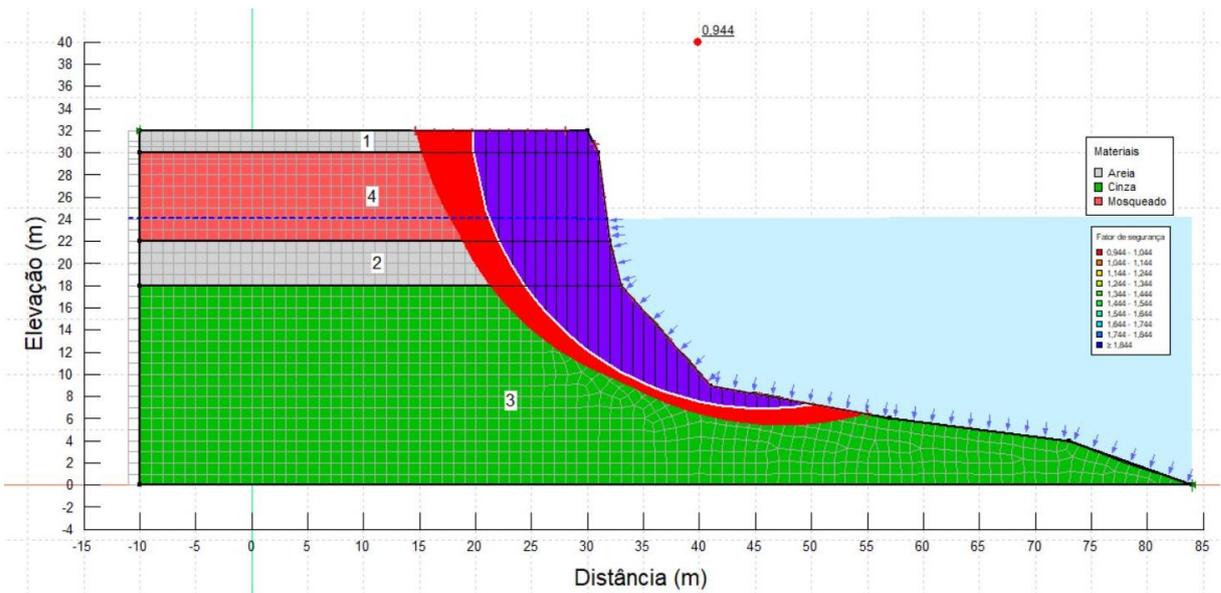


Figura 114: Talude-padrão, no tempo igual a 2 meses (cota 24m), com $FS=0,944 < 1,50$.
Fonte: Autor, 2019.

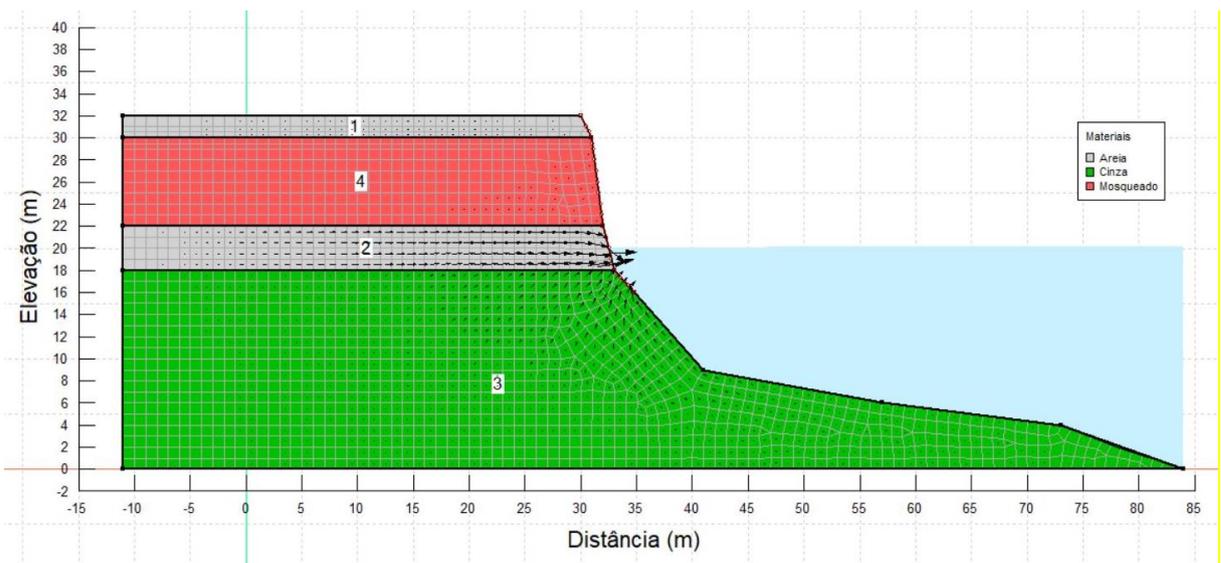


Figura 115: Talude-padrão, no tempo igual a 3 meses (cota 20m).
Fonte: Autor, 2019.

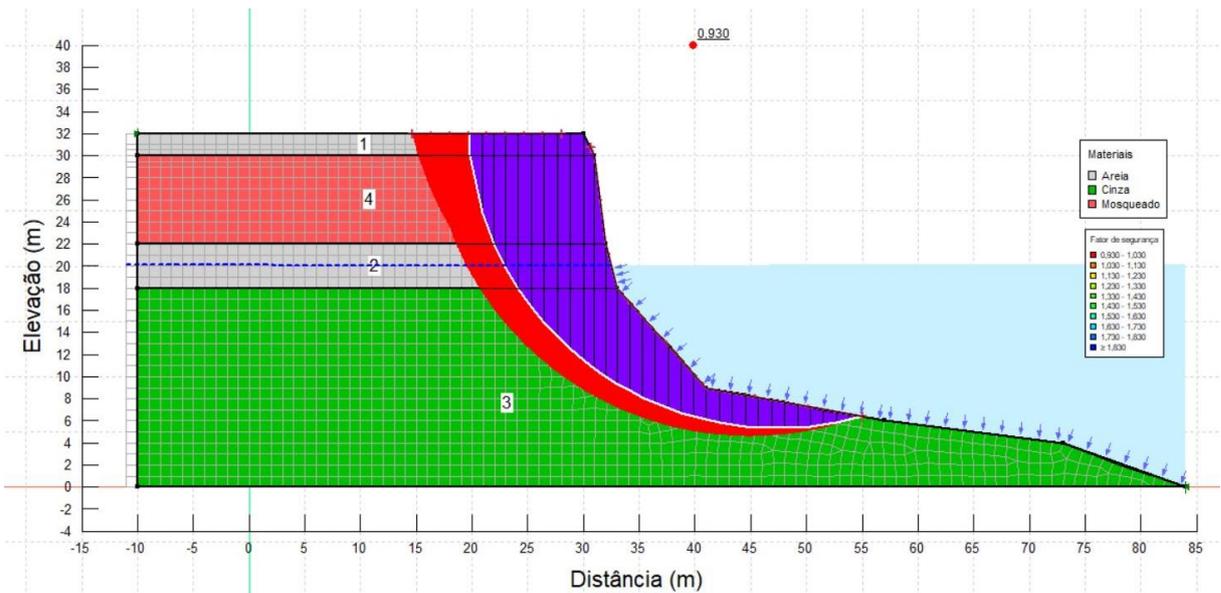


Figura 116: Talude-padrão, no tempo igual a 3 meses (cota 20m), com $FS=0,930 < 1,50$.
Fonte: Autor, 2019.

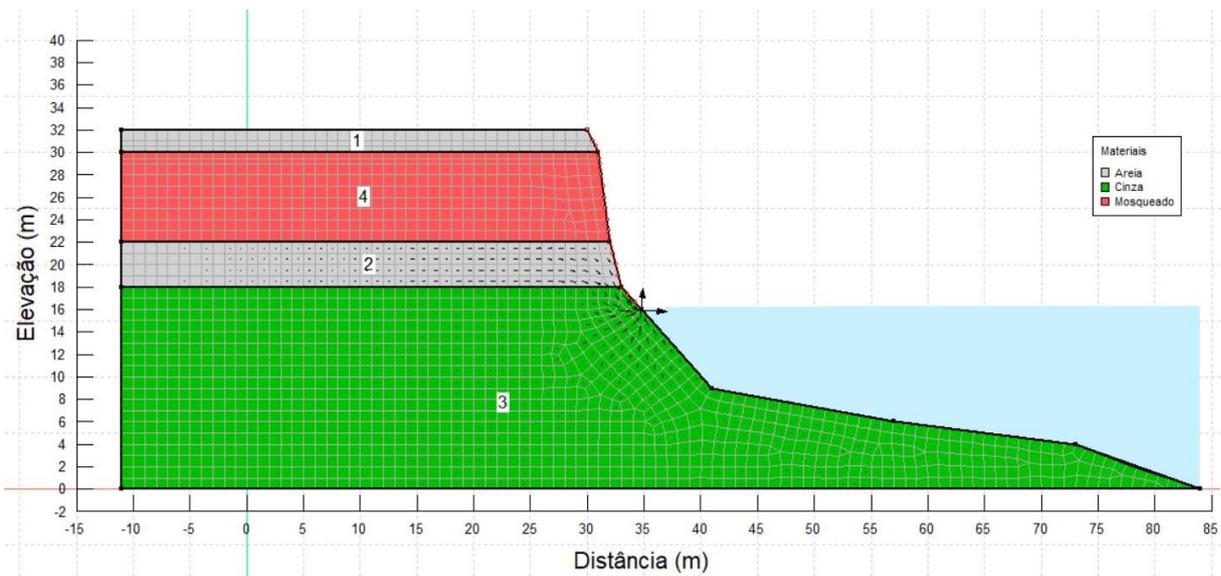


Figura 117: Talude-padrão, no tempo igual a 4 meses (cota 16m).
Fonte: Autor, 2019.

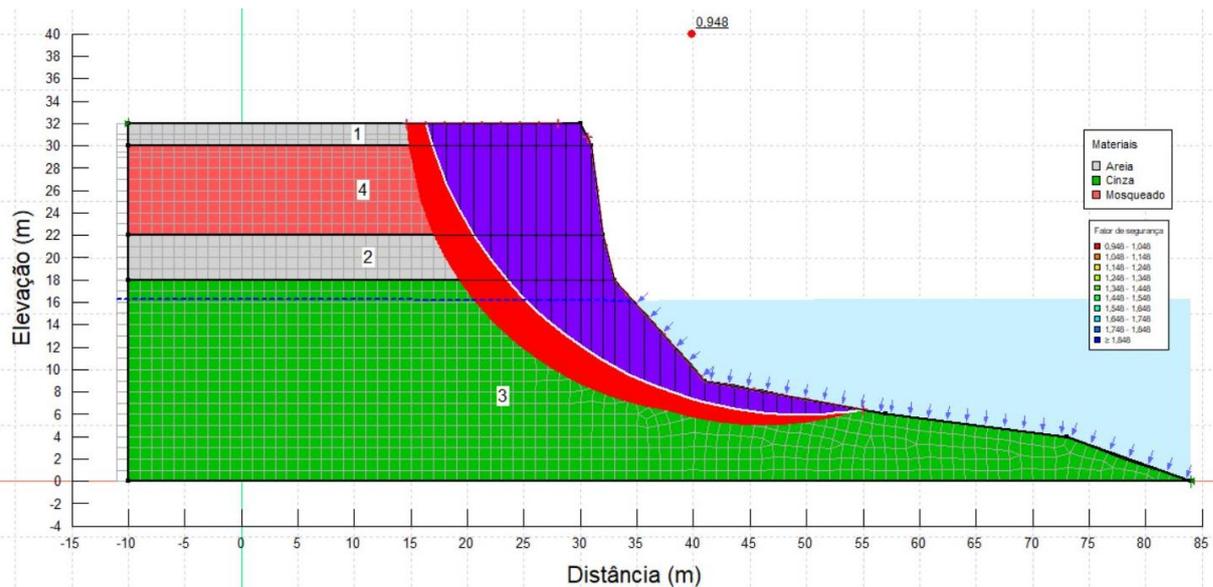


Figura 118: Talude-padrão, no tempo igual a 4 meses (cota 16m), com $FS=0,948 < 1,50$.
Fonte: Autor, 2019.

Vencida esta etapa, observa-se conforme a descida do nível de água, menor o fator de segurança observado para o maciço. Apesar de esta ser uma consideração (conclusão) semelhante àquela feita no item anterior (modelagem via *GEO5*®) há de se fazer algumas explicações importantes, principalmente no que tange a capacidade do programa computacional em avaliar a situação.

Com o uso dos sistemas *Geostudio*®, os métodos de avaliação são bastante diferentes daqueles aplicados ao sistema anterior. Aqui, o nível de detalhamento das informações é bem maior, pois neste sistema, utilizam-se tanto as informações mais simples, como os parâmetros físicos do solo (índices individuais), quanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito), como também (em grande diferença ao sistema anterior) os índices de permeabilidade de cada uma das camadas (nas direções x e y).

Outra importante situação observada é a força das águas (empuxo lateral) como uma força computável ao equilíbrio do maciço (aos moldes da teoria explanada anteriormente), que neste sistema é claramente apresentada e proporciona certas diferenças aos resultados (fatores de segurança), que aparentemente tendem a serem maiores por esta razão.

Mais uma importante consideração, é a avaliação automática de certos cenários, que permitem a observação mais simplificada da questão. Muito disso está

concentrado na avaliação de quais as tensões presentes no cenário. Enquanto no GEO5[®] havia uma preocupação contínua da determinação de quais tensões viriam a romper o solo (totais ou efetivas, a depender do nível do rio), aqui o sistema avalia de maneira automática a situação, compreendendo quando o solo está na condição submerso, saturado ou não-saturado (condição não aplicada).

Isso posto, vemos que diferentemente dos resultados obtidos no sistema anterior, a avaliação de ruptura perpassa por todas as camadas lançadas (“areia”, “mosqueado” e “cinza”), em todos os cenários extraídos (cinco cenários: 0, 1, 2, 3 e 4 meses), sendo que conforme o nível do rio se desloca, maior a cunha de ruptura, que se explica pela perda do suporte lateral (arrimo da água) e a consideração do nível de saturação da camada baseada na permeabilidade, pois quanto mais saturada, maior a tensão geostática produzida.

A diante, segue o Gráfico 21, em que é feita a comparação entre os fatores de segurança observados e os níveis de água. Optou-se por esta comparação (FS vs NA) pela razão do sistema anterior não computar de maneira automática a relação do nível ao tempo. Como pode ser visto, é uma tendência natural a redução do fator de segurança conforme se reduz o nível de água, no entanto, os fatores de segurança obtidos pelo *Geostudio*[®] nos parecem mais confiáveis e próximos daquilo que observa no campo e nas análises por modelos reduzidos, pois como visto naquela etapa (**5.6 Do modelo em escala reduzida**).

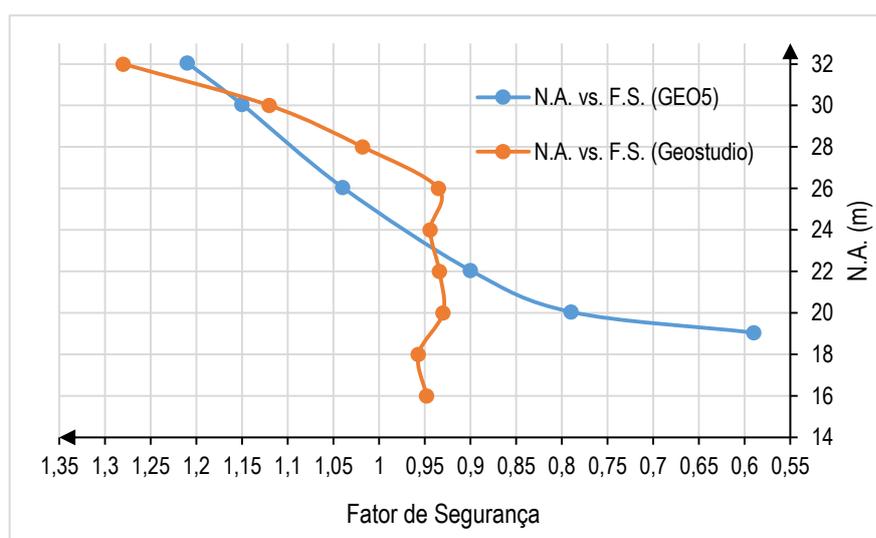


Gráfico 21: Fator de segurança em função do nível do rio durante a vazante conforme as modelagens computacionais.

Fonte: Autor, 2019.

No entanto, é possível observar que a modelagem no *Geostudio*® apresenta um certo patamar de “estabilização” do fator de segurança a partir do 45º dia e por ele segue com poucas variações até o reinício da cheia (após o 120º dia), fato que é melhor observado no Gráfico 22.

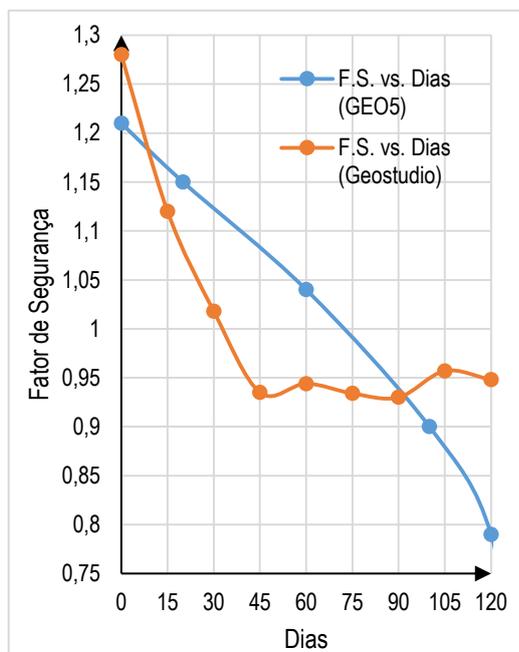


Gráfico 22: Fator de Segurança em função dos dias de vazante.
Fonte: Autor, 2019.

Uma possível explicação a tal fenômeno é o ponto que se encontra o nível de água em relação ao maciço, de maneira mais apropriada, qual a camada que o empuxo das águas fluviais atua. Após o 45º dia, o empuxo passa a atuar exclusivamente nas porções de solo com menor coesão e maior permeabilidade (“areia” e “cinza”), sendo que estas passam da condição submersa à saturada em questão de 30 (trinta) dias, fato que modifica sensivelmente a configuração das forças e resistências do talude. Apesar de não contribuir de modo efetivo à resistência, a água pode agir tanto de modo a minimizar o peso, quanto no empuxo lateral, ambos na condição submersa. Reduzido o nível, maiores passam a ser as cargas e menor o suporte lateral, que ocasionam a ruptura (**2.3 A problemática das Terras Caídas – uma descrição mecânica aproximada**).

Finalmente, assim como naquela avaliação (escala reduzida) e na modelagem anterior, algumas situações infelizmente não puderam ser contempladas, e com isso a análise via modelagem (*GEO5*® e *Geostudio*®) não é completa e fechada, no

entanto, elas se complementam e permitem uma visão aproximada do que é fenômeno sob o ponto de vista de cálculo de equilíbrio. É importante frisar que para todas as análises apresentadas neste trabalho, os maciços sempre se mostram inicialmente ($t=0$) em desequilíbrio, ou seja, a configuração natural já se apresenta num equilíbrio instável, pois apesar de estar lá, qualquer mudança sensível em suas condições naturais, logo o maciço passa a se mover.

Ao passo que os sistemas *Geostudio*® permitem grandes possibilidades de condições de contorno para avaliação complexa de problemas geotécnicos, nem sempre os resultados ali obtidos vão representar todos os movimentos de massa que cercam as terras caídas, sendo um bom exemplo disso a ocorrência do desabamento, induzido pela perda da camada arenosa, sem necessariamente o desfazimento imediato da camada coesiva acima. Justamente nisso, que há o imperativo da pesquisa em diversas frentes, seja na caracterização individual, na modelagem computacional e na recriação em miniatura, pois como anteriormente dito, uma situação é completada pela outra e boa parte do fenômeno é visto e compreendido.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões sobre a pesquisa

Ante o exposto, cumpre relatar que o estudo das Terras Caídas pelo campo ferramental da Engenharia, é de suma importância a melhor caracterização e compreensão do fenômeno. Como inicialmente visto, o *quantum* de pesquisas nesta área (com enfoque mecânico) é bastante reduzido, porém, as demais pesquisas (campos da geologia, geografia e sociologia) se mostraram bastante úteis para compreensão inicial da questão e formação deste trabalho.

Adentrando no espectro da pesquisa, mais propriamente dos resultados obtidos, iniciam-se as considerações pela investigação *in loco*, a qual foi fundamental ao entendimento do fenômeno pela visualização bem próxima das estruturas naturalmente formadas (e inclusive a sua modificação, por meio dos movimentos de massa), pela inspeção do subsolo (sondagem à percussão – Anexo A) e a coleta das amostras necessárias à caracterização física, química e mecânica.

Um desdobramento da visita de campo é a avaliação da área de estudo por meio das imagens via satélite (cuja fonte principal foi o *Google Earth*[®]). Por meio do filtro temporal, foi possível avaliar a contínua modificação daquele horizonte, sendo as duas referências principais o ponto de coleta e o ponto de sondagem. A avaliação é de que nos últimos 17 (dezesete) anos essas áreas têm passado por uma modificação negativa de seu horizonte. Por modificação negativa, denota-se a “perda” de áreas em razão das Terras Caídas, uma vez que naquela localidade não foi verificada qualquer outra atividade que levasse a tão contrastante mudança (jazidas, entre outras).

Sobre o aspecto geológico do cenário estudado, cita-se que a localidade da pesquisa é basicamente uma planície fluviolacustre, formada por sucessivos processos de deposição/redistribuição de sedimentos, fato que explica a razão das grandes frações arenosas que se formam através do transporte. Sobre a origem, ou pedologia preponderante daqueles solos, cita-se o gleissolo háplico tb eutrófico, o qual é descrito como uma massa de cinza, pastosa e hidromórfica, sem mudança abrupta textural (granulométrica). Essa informação condiz com a granulometria realizada,

onde boa parte das amostras coletadas possuem essa característica de baixa mudança da distribuição de seus grãos (grandes frações de areia e silte presentes).

Sobre a avaliação dos materiais coletados em campo, destaca-se que o seu estudo individual em muito contribuiu ao entendimento do fenômeno. Dado que a granulometria aponta elevados percentuais de solos arenosos e siltes, principalmente aos solos “areia” e “cinza”, é possível observar que em termos de resistência ao corte, os solos tendem a ter menores ou nenhuma coesão no estado não-confinado, como de fato ocorre nos ensaios de resistência à compressão simples.

A questão do alto nível de saturação e dos elevados números de vazios também se mostram grandes influenciadores da sistemática de ruptura dos maciços naturais, pois a redução do contato entre os grãos é fator prejudicial à resistência.

Aliada à questão da expressiva quantidade de água presente naturalmente no solo, destaca-se a permeabilidade que se apresenta como um elemento-chave da forma que as tensões se modificam numa determinada porção de solo, uma vez que as camadas ao centro (bolsões do solo “areia”) e base (“cinza”) são bem mais permeáveis que a camada superior (“mosqueado”), o que faz das tensões geostáticas desta camada serem sempre elevadas após a descida do nível do rio (e de menor capacidade de resistência), pois o mesmo acaba rompendo com grande quantidade de água interna.

A resistência ao cisalhamento, que é um estudo fundamental ao desenvolvimento dos modelos computacionais para permeabilidade e ruptura dos maciços, foi realizado unicamente pelas condições do equipamento, a ruptura sem submersão das amostras, na condição natural (indeformada) que estavam. Os resultados se mostraram bastante interessantes à visualização das formas de movimentos de massa que podem ocorrer nas terras caídas, principalmente pelos solos que compõem a base e o centro dos maciços, que possuem baixa e até quase nenhuma coesão e rompem abruptamente, deixando em alguns casos, a camada de solo coeso (“mosqueado”) para trás, em balanço (desabamento), ou, rompendo-a em conjunto (escorregamento e desmoronamento), a depender da época. Um especial adendo é feito sobre o solo “cinza” que como já mencionado, fica nas camadas mais inferiores, e passa basicamente todo o ciclo de cheia/vazante submerso e com isso,

apresenta baixíssima resistência ao corte, como pode ser observado na parte pertinente. Isso se mostra como uma formidável condição natural para certos tipos de ruptura a serem observados.

Sobre as etapas de análises da granulometria, limites de consistência, classificação dos solos, reporta-se que os solos analisados nesta pesquisa se destacam pela expressiva partição arenosa e siltosa, pois o solo “areia” é naturalmente uma areia fina, de boa graduação, o solo “cinza” é uma areia siltosa, com comportamento plástico (ainda que baixo em relação ao IP) e o solo “mosqueado” é o mais diferenciado dos três, por ser um silte arenoso, com partição de argila plenamente ativa ($IA = 7,18$), questão que faz o solo se comportar como argiloso. A classificação de todos solos foi feita tanto pelo sistema *SUCS*, quanto *AASHO*, sendo que por meio delas já seria possível obter algumas informações comportamentais prévias, mas sem grande valia estrita ao estudo.

Sobre a verificação de composição mineralógica e química dos solos, destaca-se basicamente as elevadas porções de quartzo presentes, principalmente pela expressiva presença de areia em todos os solos. Àqueles solos com certa coesão, seja proporcionada pelo silte, ou, pela argila, cita-se a variada gama de aluminossilicatos, silicatos de sódio, potássio e cálcio.

Acerca dos modelos em escala reduzida constituídos para melhor visualização das terras caídas, explana-se que este foram desenvolvidos sobretudo para análises qualitativas e paramétricas, uma vez que sobre uma série de condições de contorno foi aplicada o princípio econômico do *Ceteris paribus*. Com a demais condições não aplicadas, procurou-se enxergar como os maciços passavam pelo processo de ruptura. Com este conjunto de ensaios, viu-se os três tipos de movimentos associados às terras caídas, sendo os casos mais emblemáticos, o movimento de desabamento, o qual é precedido por uma espécie de desmonte das camadas mais granulares, deixando simplesmente em balanço a camada argilosa, sendo esta mantida apenas pela coesão das partículas, o movimento de desmoronamento que ocorre por semelhante razão, excetuando-se a parte em balanço, pois neste caso o maciço se rompem em blocos e o movimento de escorregamento (descida em cunha de todo maciço), que tem maior ocorrência (assim como o desmoronamento) na descida do nível do rio, no caso na drenagem do fluido utilizado.

Sobre a modelagem computacional utilizada, observou-se diferenças relevantes aos mecanismos de ruptura entre os sistemas utilizados. Parte significativa da diferença reside no grau de sofisticação (limites) em cada um deles. O *GEO5*®, por desconsiderar uma série de variáveis, apresentou resultados mais simples, sem, no entanto, ser demasiadamente impreciso, pois a partir daqueles dados que se notou a correlação direta da redução do fator de segurança e o nível de água adotado, e ainda, da ruptura do maciço em camadas arenosas quando o nível de água lhes atinge, que são questões observáveis em campo.

A utilização do *Geostudio*® conseguiu superar as capacidades do sistema anterior, principalmente pela modelagem de *n*-cenários e por mais variáveis serem alocadas (permeabilidade, regime fluvial, entre outros), todas essas questões proporcionaram uma visão mais integral das terras caídas pelo viés de estabilidade de taludes, sendo as principais conclusões aquelas que reportam a importância no nível de água para uma certa estabilização do maciço, o equilíbrio instável que as margens se encontram constantemente à luz da teoria (e norma) de estabilidade de taludes e como a disposição natural das camadas podem ou não gerar maior segurança.

Como visto, a modelagem computacional, assim como o estudo em escala reduzida possuem um caráter majoritariamente paramétrico, ou, de modo mais apropriado, uma avaliação qualitativa do fenômeno que faz uso de ferramental numérico para descrever de maneira aproximada a probabilidade de ocorrência das Terras Caídas.

6.2. Sugestões para pesquisas futuras

Para pesquisas futuras, recomenda-se um maior número de sondagens, de coletas de amostras indeformadas e deformadas a fim de que seja criada uma estratigrafia bastante consistente e a partir desta e dos dados de caracterização (físicos e mecânicos), amplie-se a análise, tanto espacialmente (áreas mais suscetíveis), quanto temporalmente (que se tornarão suscetíveis ao fenômeno).

A ideia de monitoramento *pari passu* ao longo de um ano, ou até mais tempo (dois anos, no caso de uma pesquisa no nível de doutorado) é bastante possível e factível, pois, entender como se desenvolve o fenômeno numa grande extensão pode

ser a chave para uma prevenção mais acurada e para construção de sistemas de prevenção. Nesta ideia, além das variáveis já estabelecidas, o monitoramento dos níveis de água dentro e fora do maciço seriam fundamentais para entendimento dos fatores majorantes e minorantes que levam a ruptura, seja ela qual for.

O estudo em maior profundidade da dinâmica fluvial das áreas de ocorrência das terras caídas é o apoio ideal para constituição de modelos e cenários ainda mais precisos, pois um estudo que abrangesse o máximo de cidades ao longo dos rios de águas barrentas, poderia cercar grande parte do fenômeno (não ao ponto de esgotá-lo, mas de ampliá-lo a visão), inclusive identificado formas diferentes daquelas já estudadas para as terras caídas (escorregamento, desabamento e desmoronamento).

A ideia de um modelo que utiliza os dados de resistência de cada uma das camadas conhecidas, porém simulando-as em diversas combinações também parece bastante interessante e facilmente aplicável, já que existe uma geometria pré-definida no *Geostudio*[®] e pode gerar uma discussão pertinente sobre a influência de determinada configuração de resistência e peso específico sobre o equilíbrio geral do maciço.

Ainda no campo da modelagem e da teoria de estabilidade de taludes, sugere-se também a possibilidade de serem desenvolvidos marches (e consequentes ferramentas computacionais) mais ajustadas aos movimentos propícios das terras caídas, de maneira a aproximar o comportamento mecânico da realidade observada, afastando as soluções genéricas.

Por fim, a ideia de construção de modelo em miniatura bem mais precisos, que levassem consideração a pluviometria, a fluviometria, os coeficientes de *run-off* e principalmente, a escala de grandeza (utilização de centrífugas para modificação da gravidade) e a dinâmica fluvial, pois a análise até este ponto se dá em modo estático.

7. REFERÊNCIAS

ABREU, Solange Hingst. ***Escorregamento de Encostas em Áreas Urbanas habitadas por População de Baixa Renda***. São Paulo: Universidade Anhembi Morumbi. (Trabalho de Conclusão de Curso), 2007.

ANDRETTA, Elton; *et al.* ***Mapeamento das Áreas de Risco no Bairro Gilberto Mestrinho, Zona Leste de Manaus-AM***. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/art_andretta_mapeam.pdf>. Acesso em 01 de abril de 2018.

ARENARE, Bruna de Souza. ***Estudo da Estrutura, Morfologia e Mineralogia de um Sistema de Solos Laterítico-Podzolizado na bacia do Alto Rio Negro – AM***. Rio Claro (SP): Universidade Estadual de São Paulo – UNESP. (Dissertação de Mestrado em Geografia), 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.520: Citações em documentos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR 10.838: Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas de solo. Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 11.682: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 12.004: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

_____. NBR 12.007: Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.

_____. NBR 12.051: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 13.292: Determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 14.545: Determinação do coeficiente de permeabilidade a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 14.724: Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 6.023: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR 6.024: Informação e documentação – Numeração progressiva das seções de um documento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 6.027: Informação e documentação – Sumário – Elaboração. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 6.028: Informação e documentação – Resumo – Elaboração. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 6.034: Informação e documentação – Índice – Apresentação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 6.457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 6.484: Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 6.508: Determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7.180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7.181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7.182: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 7.185: Determinação da massa específica aparente com frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 7.250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 9.813: Determinação da massa específica aparente do solo 'in situ', com emprego do cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9.820: Coleta De Amostras Indeformadas De Solos De Baixa Consistência Em Furos de Sondagem. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 9.895: Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1986.

AYSEN, A. **Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications**. Gorter (NED): Swets & Zeitlinger B.V., 2002.

BANDEIRA, Iris C. N.; *et al.* **Terras Caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon?** Springer Environmental Earth Sciences. In: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7405-7>. 2018.

BARBOSA, Carla Alexandra Fernandes. **Soluções para Estabilização de Taludes Sujeitos a Erosão Superficial**. Aveiro: Universidade de Aveiro. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2008.

BASTOS, Cezar Augusto B. **Estudo Geotécnico sobre Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil), 2004.

BEZERRA, Joana; FUNARI, Pedro Paulo; KUYPER, Thomas W. **Solos Amazônicos – suas representações e seus contextos históricos**. *Revista de História da Arte e Arqueologia (UNICAMP)*. Campinas: 2015.

BEZERRA, José F. R. **Geomorfologia e Reabilitação de Áreas Degradadas por erosão com Técnicas de Bioengenharia de solos na Bacia do rio Bacanga, São Luís-MA**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. (Tese de Doutorado em Geografia), 2011.

BOGGS, Sam. **Principles of sedimentology and stratigraphy**. New Jersey (USA): Pearson, 4th ed., 2006.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. Porto Alegre: Livros Técnicos e Científicos, 1966. 3 volumes.

CARVALHO, José Alberto Lima de. **Terras Caídas e consequências sociais: Costa do Miracauera – Paraná Trindade, Município de Itacoatiara – AM, Brasil**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia), 2006.

CHOW, Ven Te; *et al.* **Handbook of Applied Hydrology: A compendium of Water-resources Technology**. San Francisco (USA): McGraw-Hill, 1964.

DAS, Braja M. **Advanced Soil Mechanics**. New York (USA): Taylor & Francis, 2008.

_____. **Principles of Geotechnical Engineering**. Stamford (USA): Cengage Learning, 2010.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma DNIT 108: Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Norma DNER-ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DUNCAN, James M. **Soil strength and slope stability**. New Jersey (USA): John Wiley and Sons, 2014.

ESTARQUE, Marina. **Natureza do Desastre**. Folha de São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://temas.folha.uol.com.br/natureza-do-desastre/amazonas/moradores-do-am-abandonam-comunidade-afetada-por-erosao-fluvial.shtml>>. Acesso em: 03 de março de 2018.

FERREIRA, Álvaro Xavier. **Distribuição e Propriedade Hidráulica dos Solos da Várzea de Curuai, Pará**. Brasília: Universidade de Brasília – UNB. (Dissertação de Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente), 2016.

FREITAS, Marco Antônio Coelho. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Porto (POR): Universidade do Porto – U.Porto. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Geotecnia), 2011.

GOMES, Fabíola de Souza. **Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um solo em processo erosivo**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2001.

HOLANDA, Francisco Sandro Rodrigues; *et al.* **Controle de erosão em margens de cursos d'água (...)**. *Revista RA'E GA*. Curitiba: n. 17, p. 93-101, 2009.

HIGHLAND, Lynn M; BOBROWSKY, Peter. **The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides**. Virginia (USA): Geological Survey Circular, 2008.

IBGE. **Geografia do Brasil - Região Norte**. Rio de Janeiro: Vol I, 1977, p. 123-125.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: 2ª Edição, 2007.

IGREJA, Hailton Luiz Siqueira da, CARVALHO, José Alberto Lima de, FRANZINELLI, Elena. **Aspectos das Terras Caídas na Região Amazônica**. In: RABELLO, Adoréa. *Contribuições Teórico-metodológicas da Geografia Física*. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2010.

JESUS, Alexandre Cerqueira de. **Retroanálise de Escorregamentos em Solos Residuais Não Saturados**. São Carlos: Universidade de São Paulo – USP. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia), 2008.

KAMPF, N.; SCHWERTMANN, U. **Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em Hematitas de Solos**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa: 1999.

KRYNINE, Dimitri P. **Soil Mechanics, Its Principles and Structural Applications**. New York: McGraw-Hill, 1947.

LABADESSA, Aparecido S. **“Terras Caídas”, as causas naturais e antrópicas: Uma ocorrência na comunidade de São Carlos – Médio Madeira/RO**. *Revista Geoingá (do Programa de Pós-Graduação em Geografia)*. Maringá: v. 3, n. 1, p. 45-61. 2011.

LIMA, Marisaides Cruz. **Contribuição ao Estudo do Processo Evolutivo de Boçorocas na Área Urbana de Manaus**. Brasília: Universidade de Brasília – UNB. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia), 1999.

LIMA, Marisaides Cruz; CARVALHO, José Camapum de; FROTA, Consuelo Alves da. **Caracterização Geotécnica do Perfil de Solo Típico da Cidade de Manaus-AM.** *Revista de Solos e Rochas*. São Paulo: v. 23, (3): p. 143-155, 2000.

LOPES, I.R.; RODRIGUES, F.G.S. **Análise das Terras Caídas nas Margens do Rio Solimões em Tabatinga, AM.** *Revista Geonorte*. Manaus: Edição Especial 4, V. 10, p. 55-59. 2014.

MAGALHÃES, Regiane Campos; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha. **Análise do Risco nas Terras Caídas: Consequências Socioambientais na Comunidade do Divino Espírito Santo, Município de Iranduba (AM) – Brasil;** 2010, Porto Alegre. Porto Alegre: XVI Encontro Nacional dos Geógrafos, 2010.

MAGALHÃES, Regiane Campos. **As características físicas, químicas, mineralógicas e hidráulicas do solo e sua susceptibilidade ao processo de terras caídas: comunidade Divino Espírito Santo – Iranduba/AM.** Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM (Dissertação de Mestrado em Geografia), 2011.

MARQUES, José Couto; FERREIRA, César Romão. **A Percolação de Água em Solos, Estudos em Modelo Reduzido.** 2009, Porto. Porto: 4ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente – FEUP.

_____; UNAS, Mário. **Estudos em Modelo reduzido de Percolação em Barragens de Aterro.** 2010, Porto. Porto: 5ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente – FEUP.

MARTINS, Henrique Lembi. **Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos (...).** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (Dissertação de Mestrado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos), 2006.

MATOS, J.; NOGUEIRA, Regina. **As Terras-Caídas no Careiro de Várzea e as implicações para os moradores da comunidade Miracauera no Paraná do Careiro (Careiro da Várzea-AM).** *Revista Geonorte*. Manaus: Edição Especial 4, V. 10, p. 128-134. 2014.

MONTEMEZZO, Rodrigo Fabiano. **Estudo Comparativo de Ensaio de Compressão Confinada em Argilas e Areias Saturadas utilizando o ensaio CRS**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2005.

NASCIMENTO, Ricardo R.; SIMÕES, Gustavo F. **Avaliação da Suscetibilidade a movimentos de massa de cursos d'água da cidade de Rio Branco (AC)**. *Revista Geociências (UNESP)*. São Paulo: v. 36, n. 2, p. 233-249, 2017.

NOGAMI, Job Shuji. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. 1ª Edição. São Paulo: Villibor, 1995.

NOVAES FILHO, João Paulo; *et al.* **Variabilidade Espacial de Atributos Físicos de Solo (...)**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa: vol. 31, n. 1, p. 91-100, 2007.

NUNES, Elias; NÓBREGA, Orgival. **Geologia Física**. Apostila do Programa Universidade a Distância (Disciplina Geografia Física I). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

PACHECO, Jesuete Brandão; BRANDÃO, José Carlos Martins; CARVALHO, José Alberto Lima de. **Geomorfologia fluvial do Rio Solimões/Amazonas: Estratégias do Povo Vazeano do sudoeste do Careiro da Várzea**. *Revista Geonorte*. Manaus: Edição Especial 4, V. 2, p. 542-554. 2012.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, Mônica Cortêz. **Correlações entre as Dinâmicas Geomorfológicas e Pecuárias na margem esquerda do Rio Madeira, município de Autazes (AM)**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Geociências), 2016.

PÉRTILE, Patricia. **Propriedades mecânicas em micro e mesoescala de solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. (Tese de Doutorado em Ciência do Solo).

PLESE, Luís; *et al.* **Áreas degradadas da Amazônia: ações antrópicas e a degradação ambiental.** Rio Branco: PROIN-IFAC, 2013.

REYNOLDS, Henry. PROTOPAPADAKIS, P. **Practical Problems in Soil Mechanics.** London (ENG): Crosby Lockwood & Son, 1956.

RODRIGUES, Francisco Gleison de S. **O Conceito de ‘Terras Caídas’ e a Caracterização Morfodinâmica fluvial do Alto Solimões.** *Revista Geonordeste.* São Cristóvão: Ano XXV, n. 3, p. 04-23, 2014.

ROQUE, Wallace Vargas. **Mapeamento Geoambiental da Área Urbana de Manaus-AM.** Brasília: Universidade de Brasília – UNB (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil), 2006.

SANTOS, Rozely. **Vulnerabilidade Ambiental.** Brasília: MMA, 2007.

SILVA, Amanda Luzia da. **Caracterização Mineralógica por Difração de raios X e Determinação de Terras Raras por ICP-MS de Rochas da Região Sul da Bahia.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (Dissertação de Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares), 2013.

SILVA, Apolonio José Nogueira da; CARVALHO, Fabíola Gomes de. **Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* Viçosa: 2007.

SILVA, Rebeca; *et al.* **Ensaio de Campo para Investigação Geotécnica de um Processo Erosivo em Bauru-SP.** PIBIC/CNPq Universidade Estadual de São Paulo – Campus Bauru, 2010.

SILVA, Rui Carlos Vieira da. **Hidráulica fluvial.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003.

SUÇUARANA, Monik da Silveira. **Várzea.** Disponível em: <<https://www.infoescola.com/biomas/varzea/>>. Acesso em: 12 de abril de 2018.

SOUZA, José Camilo; Almeida, Regina. **Vazante e Enchente na Amazônia Brasileira: Impactos Ambientais, Sociais e Econômicos.** In: VI Seminário Latino-

Americano de Geografia Física / II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, 2010.

SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003.

TERZAGHI, Karl. **Theoretical Soil Mechanics**. New York (USA): John Wiley and Sons, 1943.

TORRES, Rayane Tayná da Costa; BARROS, Michel Rodrigo Santana; CHISSOLUCOMBE, Ircílio. **Estabilidade de Taludes**. In: IV Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG. Universidade Estadual de Goiás, 2017.

TORRES DE FREITAS, Francimara; ALBUQUERQUE, Adoréa Rebello da Cunha. **Análise Temporal sobre as “Terras Caídas” no médio Solimões/Coari – AM**. *Mercator – Revista de Geografia da Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza: V. 11, N. 25, maio-agosto, p. 129-140, 2012.

TSCHEBOTARIOFF, Gregory Porphyriewitch. **Fundações, Estruturas de Arrimo e Obras de Terra: A arte de projetar e construir suas bases científicas na mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

TSYTOVICH, N. **Soil Mechanics**. Moscow (URSS): Mir Publishers, 1976.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Landslides – Analysis and Control**. Washington, D.C. (USA): Mildred Clark, 1978.

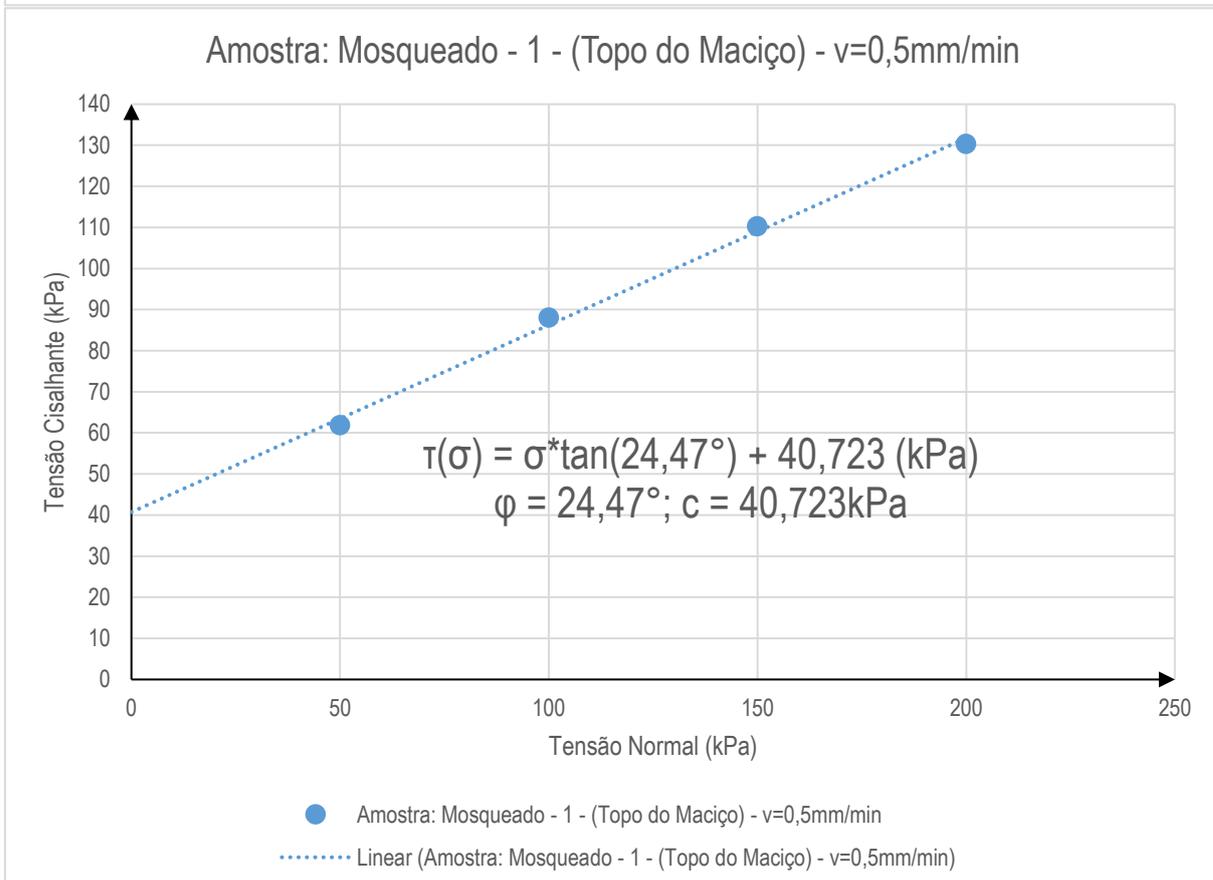
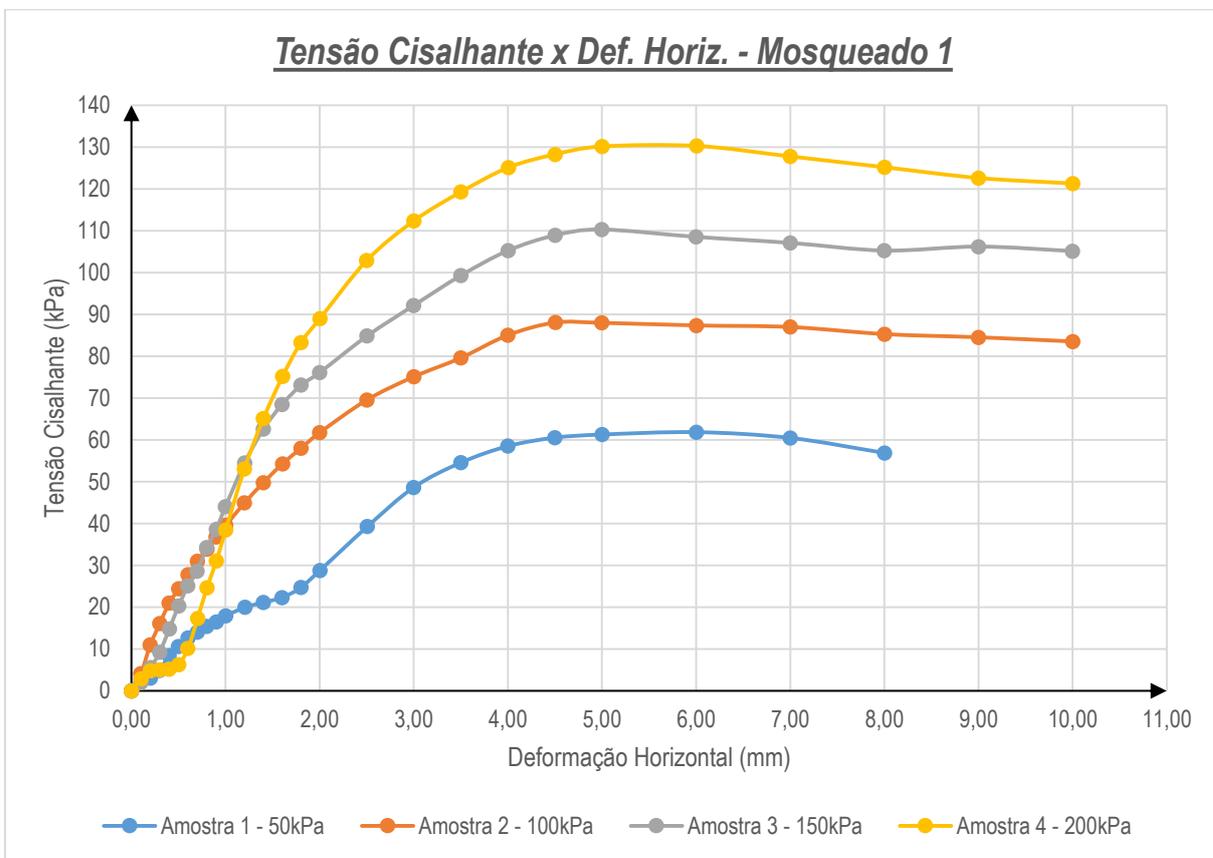
TUCCI, Carlos; SILVEIRA, André; *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2004.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

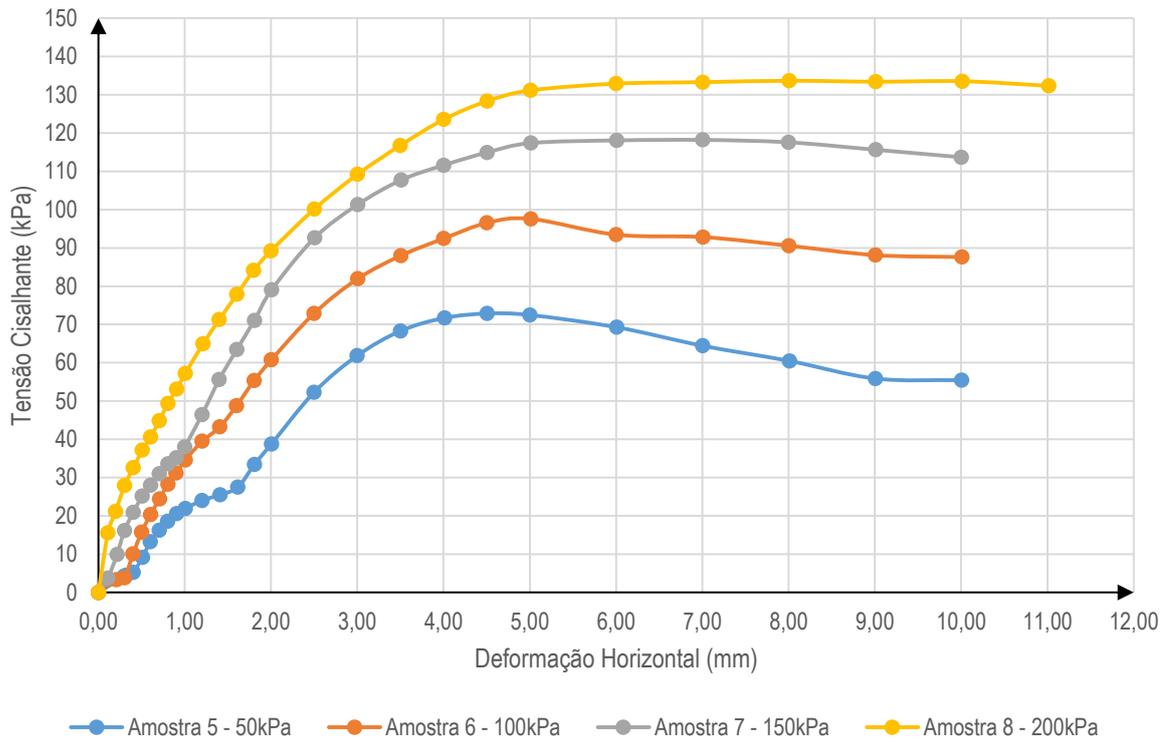
VENKATRAMAIAH, C. **Geotechnical Engineering**. New Delhi (IND): New Age International, 2006.

VERRUIJT, Arnold. **Soil Mechanics**. Delft (NED): Delft University of Technology, 2001.

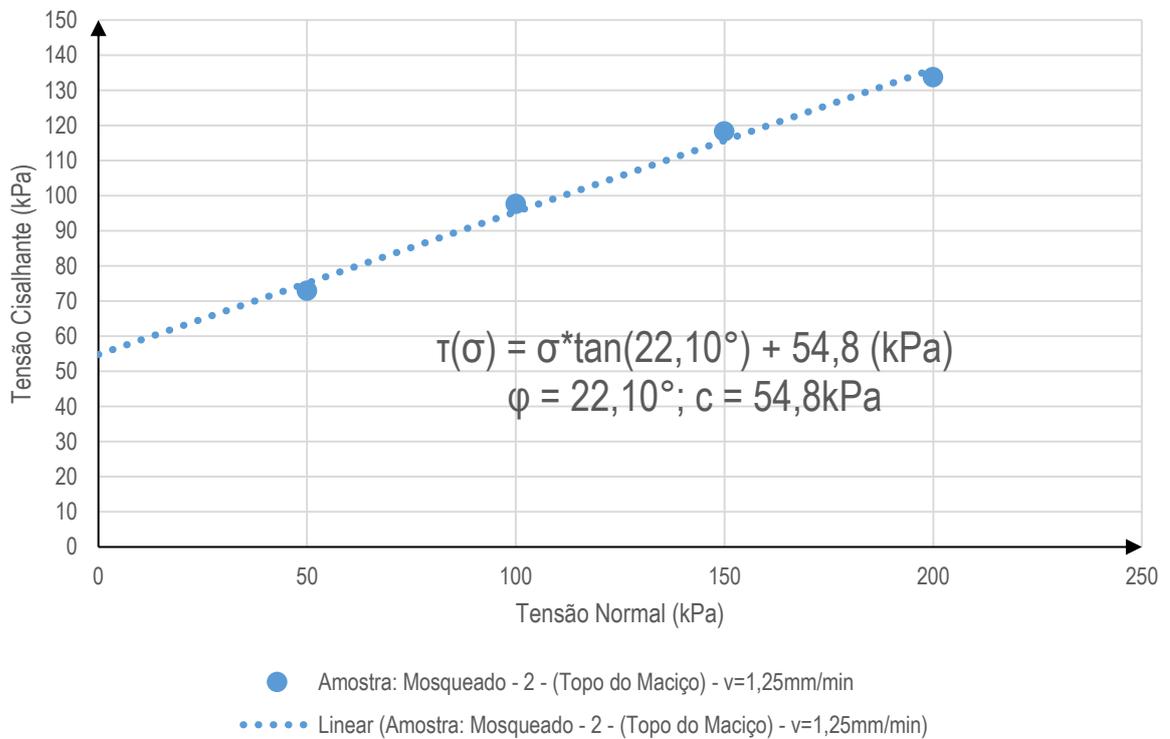
ANEXO B – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

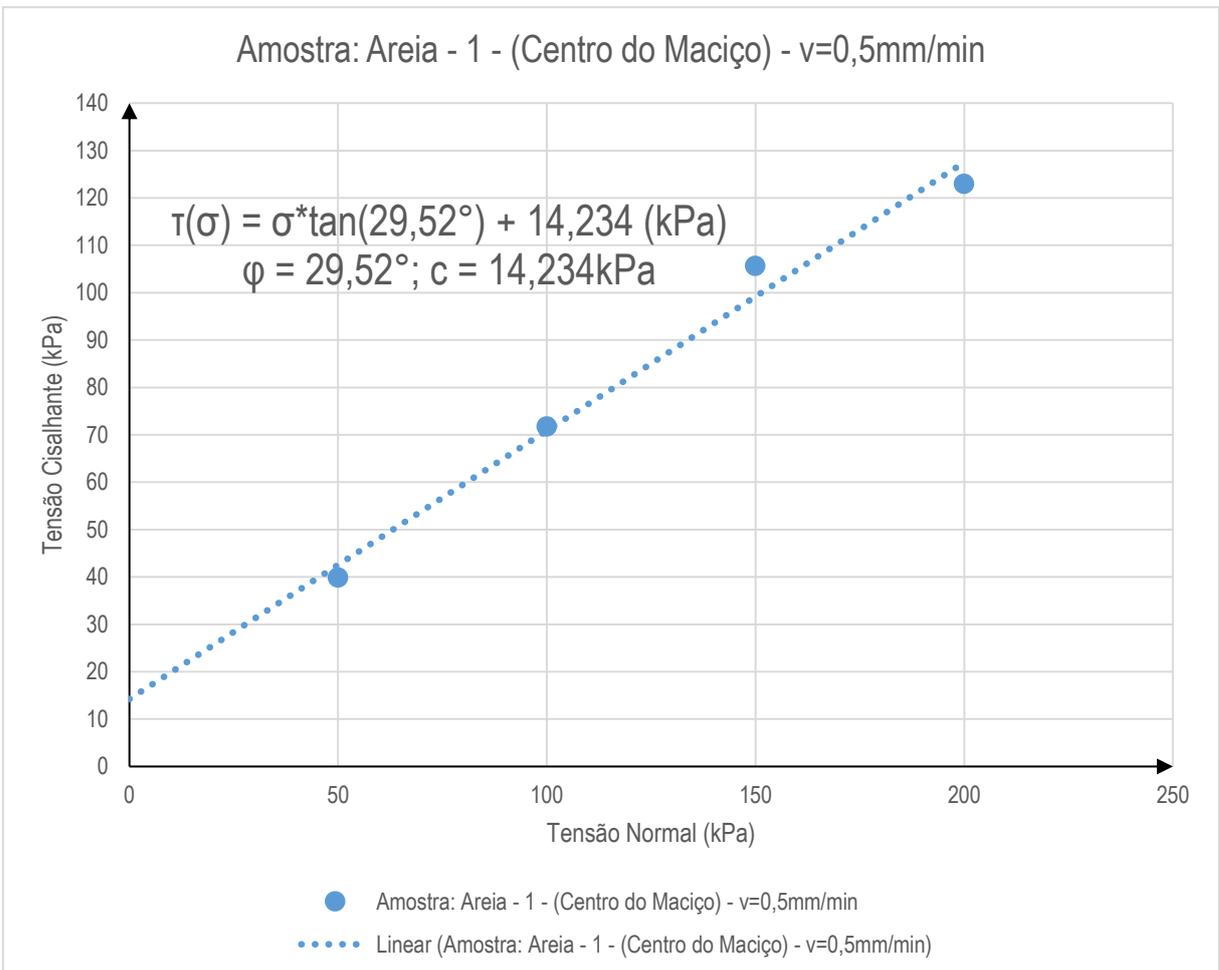
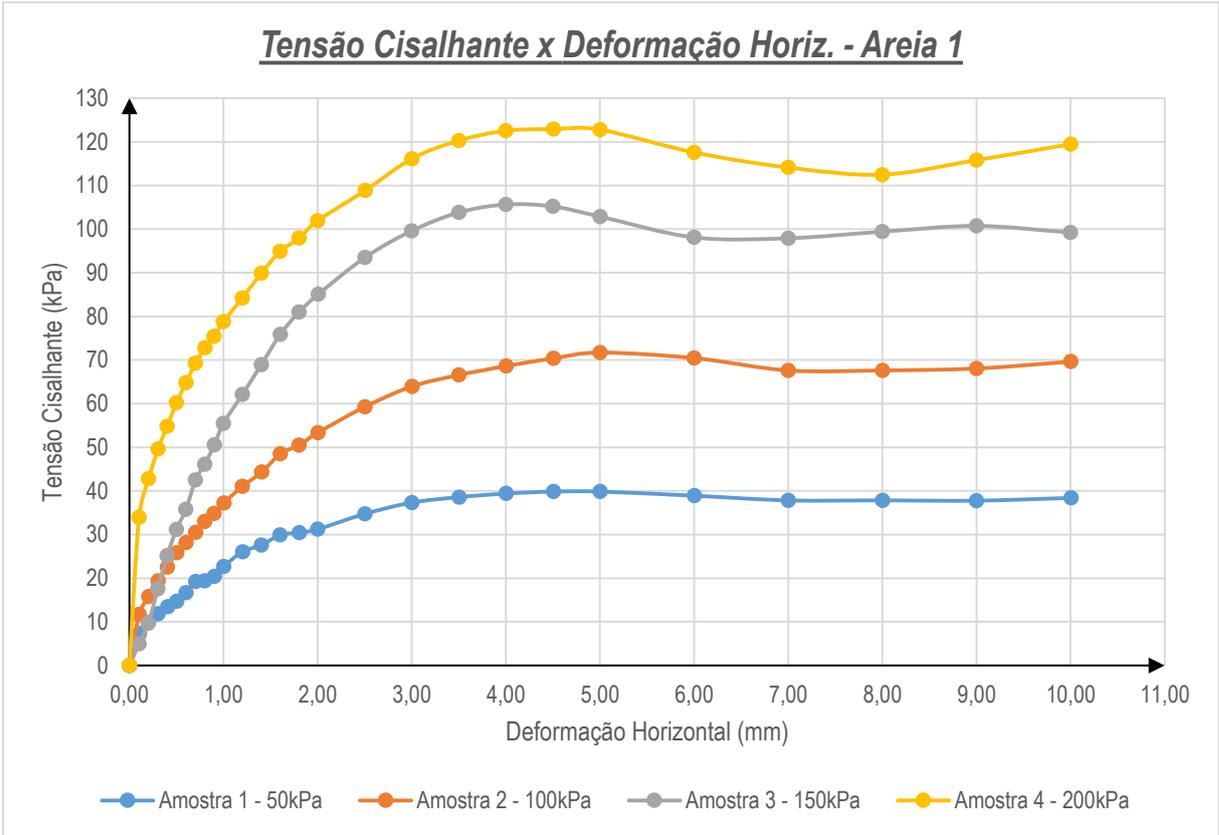


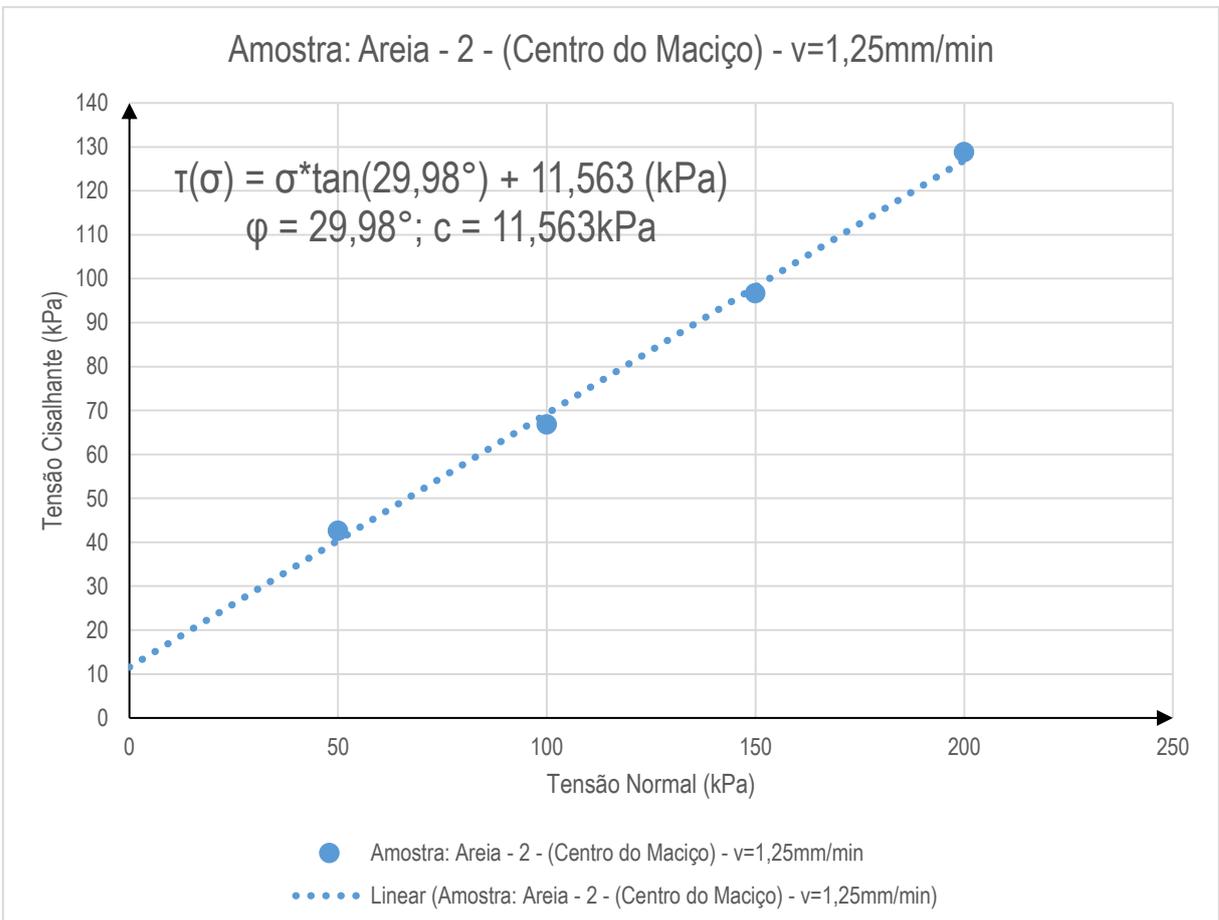
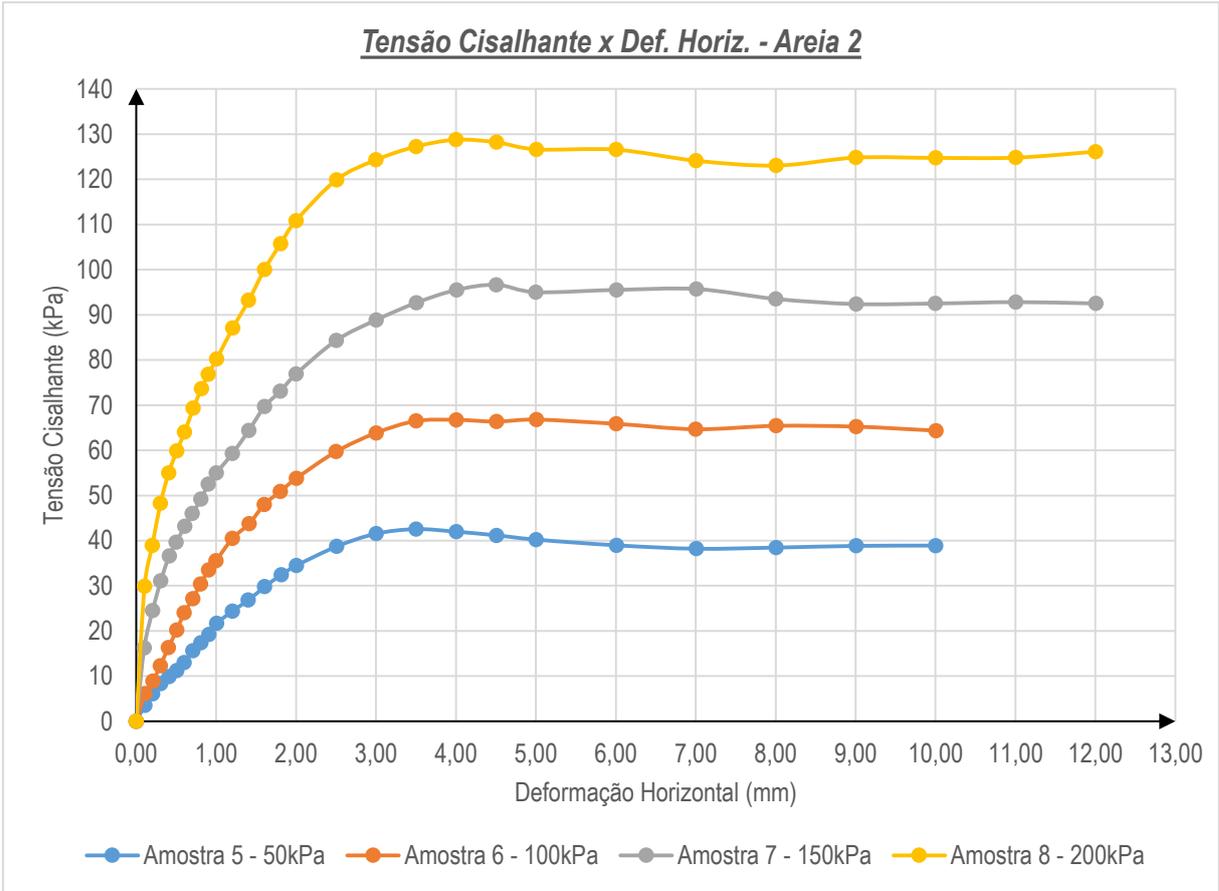
Tensão Cisalhante x Deformação Horiz. - Mosqueado 2



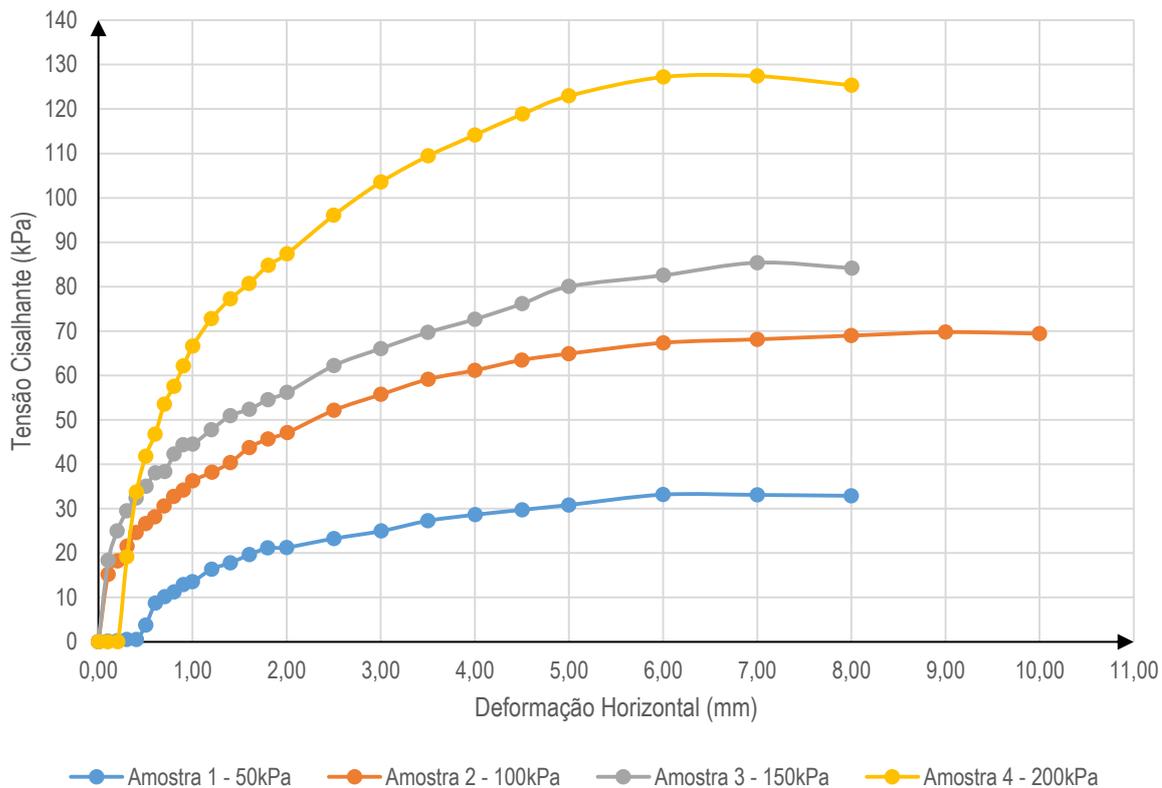
Amostra: Mosqueado - 2 - (Topo do Maciço) - v=1,25mm/min



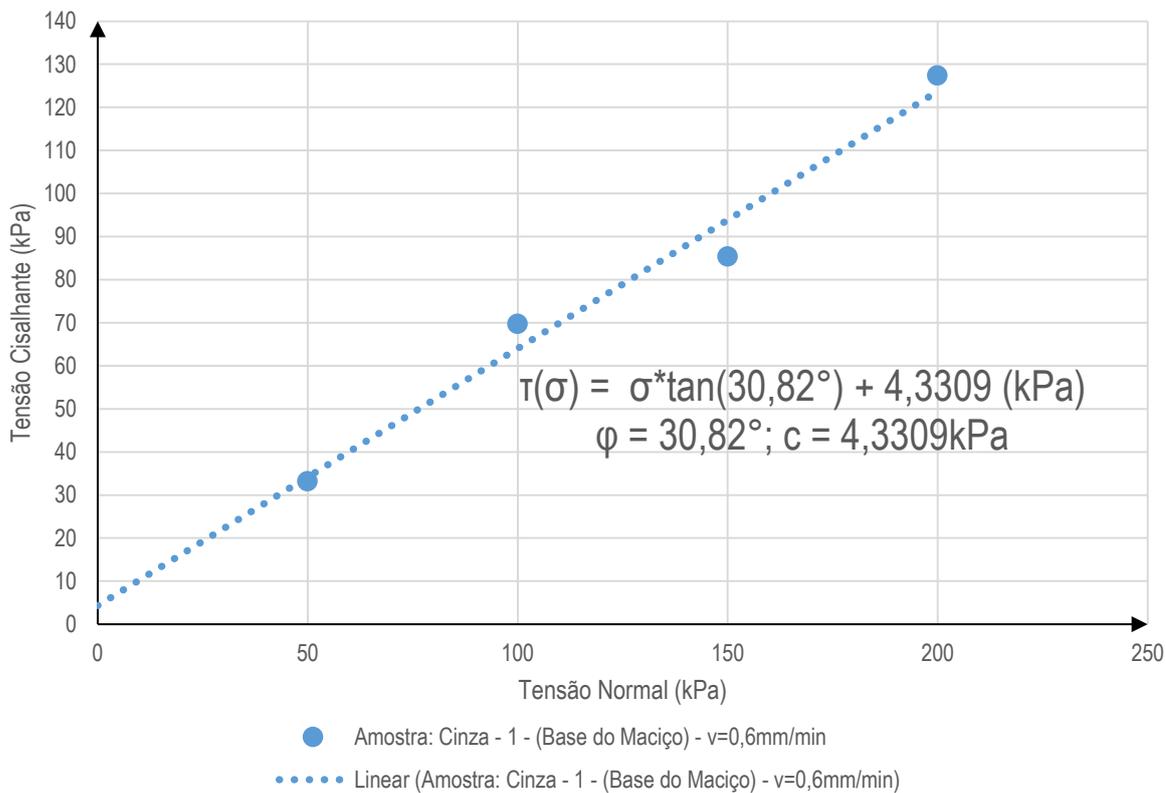




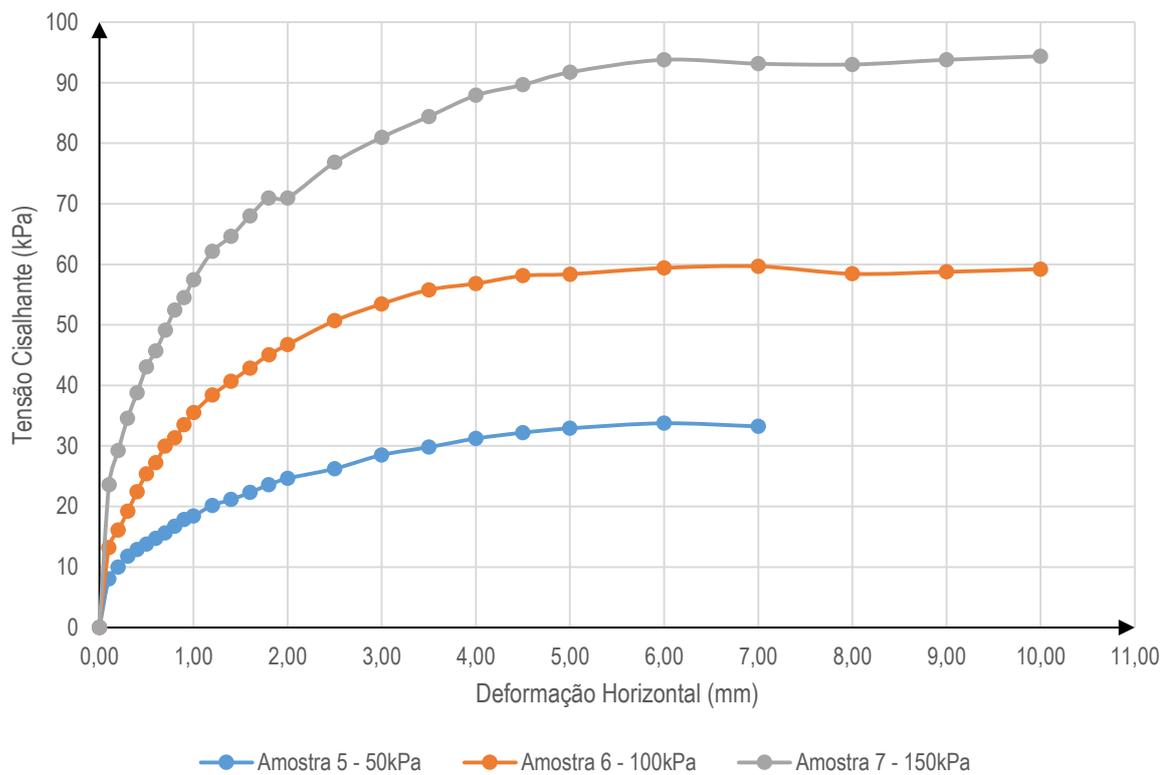
Tensão Cisalhante x Deformação Horiz. - Cinza 1



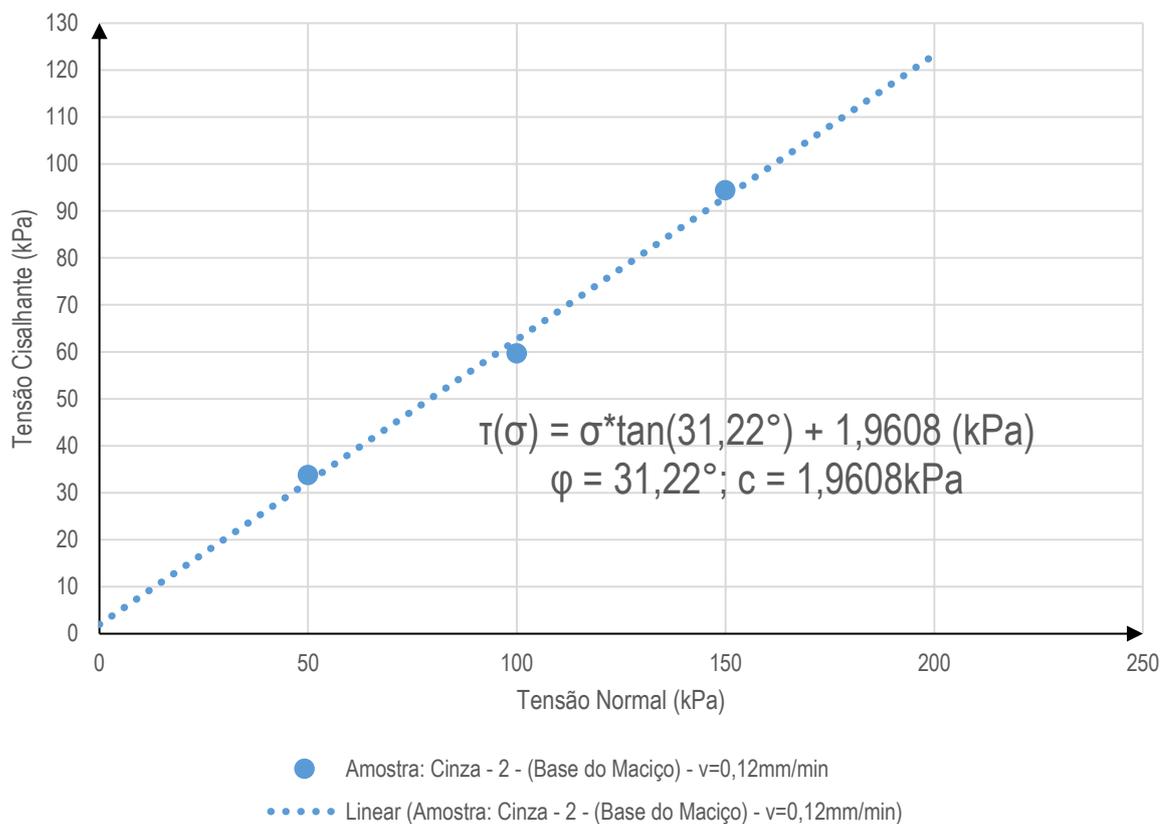
Amostra: Cinza - 1 - (Base do Maciço) - v=0,6mm/min



Tensão Cisalhante x Deformação Horiz. - Cinza 2



Amostra: Cinza - 2 - (Base do Maciço) - v=0,12mm/min



ANEXO C – ENVOLTÓRIAS DE TENSÕES (VIA COMPRESSÃO SIMPLES)

