



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CAROLINA VERBICARO PERDOMO

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DE UMA ENCOSTA DA SERRA DO MAR VISANDO  
À SUSCETIBILIDADE AO ESCORREGAMENTO

CAMPINAS  
2021

CAROLINA VERBICARO PERDOMO

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DE UMA ENCOSTA DA SERRA DO MAR VISANDO  
À SUSCETIBILIDADE AO ESCORREGAMENTO

TESE APRESENTADA AO INSTITUTO DE  
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE  
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
DOUTORA EM GEOGRAFIA NA ÁREA DE ANÁLISE  
AMBIENTAL E DINÂMICA TERRITORIAL

ORIENTADOR: PROF. DR. FRANCISCO SÉRGIO BERNARDES LADEIRA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA CAROLINA  
VERBICARO PERDOMO E ORIENTADA PELO PROF. DR.  
FRANCISCO SÉRGIO BERNARDES LADEIRA.

CAMPINAS

2021

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Geociências  
Marta dos Santos - CRB 8/5892

P412c Perdomo, Carolina Verbicaro, 1980-  
Caracterização de solos de uma encosta da Serra do Mar visando à suscetibilidade ao escorregamento / Carolina Verbicaro Perdomo. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Francisco Sérgio Bernardes Ladeira.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Solos tropicais. 2. Hidráulica. 3. Resistência ao cisalhamento. 4. Engenharia geotécnica. 5. Determinação mineralógica. I. Ladeira, Francisco Sérgio Bernardes, 1965-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Soils characterization on a slope in Serra do Mar aiming the landslides susceptibility

**Palavras-chave em inglês:**

Tropical soils

Hydraulics

Shear strength

Geotechnical engineering

Mineralogical determination

**Área de concentração:** Análise Ambiental e Dinâmica Territorial

**Titulação:** Doutora em Geografia

**Banca examinadora:**

Francisco Sérgio Bernardes Ladeira [Orientador]

Nelson Ferreira Fernandes

Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Jefferson de Lima Picanço

Ana Elisa Silva de Abreu

**Data de defesa:** 30-07-2021

**Programa de Pós-Graduação:** Geografia

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-8934-6862>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7756472887942819>



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**AUTORA:** Carolina Verbicaro Perdomo

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DE UMA ENCOSTA DA SERRA DO MAR VISANDO  
À SUSCETIBILIDADE AO ESCORREGAMENTO**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Francisco Sérgio Bernardes Ladeira

Aprovada em: 30 / 07 / 2021

**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Francisco Sérgio Bernardes Ladeira - Presidente

Prof. Dr. Jefferson de Lima Picanço

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Elisa Silva de Abreu

Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

*A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta no processo de vida acadêmica da aluna.*

Campinas, 30 de julho de 2021.

## DEDICATÓRIA

Dedico à

Todos que amo!!!!!!

## AGRADECIMENTOS

Penso que todos que ingressam em programas de pós-graduação, e desenvolvem uma dissertação ou tese, pensam em contribuir para a ciência, e desta forma eu espero que este trabalho também possa auxiliar trabalhos futuros.

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Francisco Ladeira e Miriam Miguel (não oficial), muito obrigada por terem aceitado me orientar, por terem acreditado no meu trabalho, e por terem uma visão diferenciada e por isso aceitaram esta empreitada que envolve diferentes áreas de estudos. São grandes exemplos de como sair da zona de conforto, contribui para o avanço da ciência.

Gostaria de agradecer a todos os técnicos dos laboratórios envolvidos na pesquisa. No Laboratório da Faculdade de Eng. Civil, Cipriano, Leonardo e Reinaldo. Sempre muito gentis e com disposição para explicar os procedimentos e buscar soluções para problemas que surgiam durante os ensaios. Conviver com eles durante este tempo foi muito bom.

Ao técnico do Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências, Eufrásio, obrigada por preparar as amostras para o ensaio

Ao técnico supervisor do Laboratório de Quantificação Mineral do Instituto de Geociências, Dailto. Obrigada pela ajuda com as amostras

Ao técnico do Laboratório de Raio-X da faculdade de Física, Rogério Marcon, obrigada pelo ensaio, e pelas explicações e esclarecimentos.

Ao técnico do laboratório de Hidrologia da Faculdade de Eng. Agrícola, Sérgio Lopes, obrigada por toda ajuda com as amostras

Aqui não poderia deixar de agradecer ao menino Estéfano.... obrigada, sem você o campo não seria o mesmo!!!! Até porque eu não saberia chegar até as trincheiras.

Gostaria também de agradecer ao Lula, e em seu nome agradeço a Defesa Civil de Santos pelo apoio na logística dos trabalhos de campo. E ao aluno César pelo apoio no campo.

Aos alunos de iniciação científica que ajudaram na tese com seus projetos, Lidiane e Riadh, muito obrigada..... Jovens interessados e dispostos, espero que continuem assim ao longo de suas carreiras.

A UNICAMP e ao Instituto de Geociências, onde tive a oportunidade de ter minha formação acadêmica desde a graduação até aqui (espero que com a finalização do doutorado).

Ao programa de pós-graduação por poder desenvolver este trabalho, como aluna de um curso de excelência acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos professores do Instituto de Geociências por todo o conhecimento compartilhado nestes anos.

Da mesma forma, gostaria de agradecer a minha família, sempre me apoiando e incentivando em todos os momentos, é a minha base forte. Ajudaram e muito para a realização deste trabalho.

Em especial, aos meus pais que sempre fizeram das realizações dos filhos as suas próprias, sempre valorizaram a educação (tinham como base na família, saúde e educação). Sempre auxiliando durante o período de estudos, inclusive financiando participações em congressos. Na verdade, desta parte eles gostavam muito.... Todo ano me perguntavam: onde vai ser o evento deste ano? Claro que me usavam de desculpa para viajar!! Afinal eu não poderia ir sozinha!!!

Ao meu companheiro Zé, que permaneceu ao meu lado em todos os momentos que passamos (bons e ruins). Sempre incentivando o desenvolvimento da tese. Uma pessoa especial que sabe o quanto a educação é importante.

Muito obrigada a todos!!!!

## EPÍGRAFE

*“Por maior que seja o buraco que você se encontra,  
pense que, por enquanto, ainda não há terra em cima”*

Dercy Gonçalves



## RESUMO

O estudo dos movimentos gravitacionais de massa tem se tornado cada vez mais necessário ao longo dos últimos anos, principalmente no Brasil onde parte da população ocupa áreas de risco, como as encostas dos morros. Estes eventos são desencadeados, principalmente pelas chuvas, podendo em alguns casos estarem relacionados com atividade humana. A Serra do Mar é palco constante para estes eventos, pois possui características geomorfológicas, geológicas e climatológicas favoráveis. Existem muitos trabalhos relacionados a problemática dos movimentos gravitacionais de massa, mas poucos são os trabalhos que envolvem um trabalho detalhado de caracterização dos solos e sua interação com o aumento da umidade. O principal objetivo deste estudo foi o de entender o comportamento da cobertura pedológica de uma encosta, em relação a dinâmica hidráulica, considerando sua influência nos movimentos gravitacionais de massa. Para a realização deste trabalho, foram utilizadas 4 trincheiras (TR1, TR3, TR7, TR9) ao longo de uma encosta em Santos e retiradas amostras deformadas e indeformadas para realização de ensaios de laboratório. Foram realizados ensaios de caracterização física, permeabilidade (em laboratório), retenção à água, mineralogia, porosimetria e resistência ao cisalhamento do solo. Os resultados obtidos para as amostras deformadas mostraram gibbsita, caulinita, montmorillonita, vermiculita e hidrobiotita nos ensaios de mineralogia evidenciando que o comportamento do solo foi influenciado pela presença destas argilas expansivas. A granulometria (com e sem defloculante), mostrou diferentes concentrações em cada trincheira, e para os ensaios sem defloculante a fração argila foi ausente em todos os horizontes, apontando uma forte microagregação das partículas em campo. Nos ensaios de limites os resultados chamaram a atenção na TR7 que apresentou apenas um horizonte (B1) com resultado (IP = 1,5), os outros deram NP (não plástico). Nas amostras indeformadas, as curvas de retenção à água foram unimodais para todos os horizontes “A” e bimodais para os outros horizontes de todas as trincheiras, mesmo a TR7 apresentando pouco material da fração argila, as curvas de retenção à água dos horizontes “B” e “C” foram bimodais. Os ensaios de condutividade hidráulica saturada nas diferentes direções mostraram anisotropia e isotropia, sendo influenciados não só pela porosidade, mas pela mineralogia. Os resultados de resistência ao cisalhamento tiveram influência da mineralogia, principalmente nos ensaios de menor umidade (maior sucção) onde os horizontes “B” e “C” da TR1 ( $w = 25\%$ ), “B” da TR3 ( $w = 25\%$ ) e “B” da TR9 ( $w = 20\%$ ) apresentaram valores muito altos para a resistência. As caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e as propriedades hidráulicas e geotécnicas dos horizontes de solo das 4 trincheiras estudadas permitiram a realização de uma análise detalhada da caracterização dos solos e sua relação quanto à suscetibilidade ao escorregamento da encosta nos locais onde estas trincheiras se localizavam e entre seus horizontes.

**Palavras-chave:** Solos tropicais; Hidráulica; Resistência ao cisalhamento; Engenharia geotécnica; Determinação mineralógica.

## ABSTRACT

The mass movement study has become even more required over the last few years, mainly in Brazil where the population occupies risky areas, for instance hills. These events are triggered mainly by rain. In some cases, it has been related to human activity. Serra do Mar is a constant stage for these events due to geomorphological, climatological and geological characteristics. There are many works related to the problem of landslides, but there are few works that involve detailed work on soil characterization and its interaction with increased moisture. The main objective of this study is to understand the soil characterization on the slope and this relation with hydrological dynamics, considering its influence on landslides. To carry out this works, 4 trenches (TR1, TR3, TR7 and TR9) were opened along the slope in Santos, and disturbed and undisturbed samples taken to laboratory tests. For this, physical characterization, permeability (in laboratory), water retention (SWRC), mineralogy, porosimetry and shear strength were carried out. The results obtained for the disturbed samples showed gibbsite, kaolinite, montmorillonite, vermiculite and hydrobiotite in the mineralogy tests showing that the soil behaviour was influenced by the presence of these expansive clays. The results for grain size (with deflocculant and without deflocculant) show different concentration for each trench, and specifically for the test without deflocculant, the results show that no clay appear in the horizons, and this indicates the particles are strongly microaggregated in the field. The limits tests presented results different for TR7, that presented one horizon (B1) with result (PI = 1,5), the others were NP (not plastic). The soil water retention curves (SWRC) were unimodal for all "A" horizons and bimodal for others horizons of all trenches, even though TR7 presented little material in the clay fraction, the SWRC of the "B" and "C" horizons were bimodal. The hydraulic conductivity test in different directions showed anisotropy and isotropy being influenced not only by porosity, but also by mineralogy. The shear strength results were influenced by the mineralogy mainly in the tests of lower moisture (higher suction) where the horizons "B" and "C" of TR1 (w = 25%), "B" of TR3 (w = 25%) and "B" of TR9 (w = 20%) presented very high values of resistance. The physical, chemical, mineralogical characterization and the hydraulic and geotechnical properties of the soil horizons of the 4 trenches studied allowed for a characterization of the soil and their relationship with the susceptibility to landslides where the trenches are located and between their horizons

**Keywords:** Tropical soils; Hydraulics; Shear strength; Geotechnical engineering; mineralogical determination.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização de Santos .....	27
Figura 2 - Mapa da Geologia de Santos .....	30
Figura 3 - Vista do local onde foi feito o trabalho de campo .....	34
Figura 4 - Trincheiras analisadas no estudo .....	35
Figura 5 - Foto da TR1 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades .....	36
Figura 6 - Foto da TR3 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades .....	37
Figura 7 - Foto da TR7 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades .....	38
Figura 8 - Foto da TR9 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades .....	39
Figura 9 - Formas das vertentes e seus respectivos fluxos .....	40
Figura 10 - Elementos geomórficos principais de um escorregamento rotacional.....	45
Figura 11 - Diagrama esquemático de classificação dos movimentos gravitacionais de massa .....	46
Figura 12 - Tensões da água no solo .....	49
Figura 13 - Diagrama de fases do solo .....	53
Figura 14 - Fenômeno da histerese nas curvas de retenção a água no solo, na drenagem e na infiltração da água .....	59
Figura 15 - Argilomineral do tipo expansivo quando hidratado .....	63
Figura 16 - Fluxograma da metodologia utilizada .....	64
Figura 17 - Foto das amostras indeformadas, sendo retiradas no campo para os ensaios de permeabilidade e resistência ao cisalhamento .....	66
Figura 18 - Foto do processo de sedimentação para o horizonte B2 da trincheira TR1.....	68
Figura 19 - Triângulo textural para classificação de solos .....	69
Figura 20 - Acomodação das amostras no ensaio de curva de retenção a água com o método do papel filtro .....	74
Figura 21 - Anéis volumétricos usados para o ensaio da curva de retenção tendo uma geomembrana na base para apoiar as amostras .....	74
Figura 22 - Esquema de montagem do Permeâmetro de Parede Rígida .....	76
Figura 23 - Foto dos corpos de prova moldados na vertical e horizontal após o ensaio de permeabilidade.....	77
Figura 24 - Exemplo de curva de retenção a água, bimodal.....	78
Figura 25 - Difratograma da TR1 .....	85

Figura 26 - Difratoograma da TR3 .....	87
Figura 27 - Difratoograma da TR7 .....	89
Figura 28 - Difratoograma da TR9 .....	91
Figura 29 - Curvas granulométricas dos horizontes da TR1 nos ensaios com e sem defloculante .....	95
Figura 30 - Curvas granulométricas dos horizontes da TR3 nos ensaios com e sem defloculante .....	97
Figura 31 - Curvas granulométricas dos horizontes da TR7 nos ensaios com e sem defloculante .....	98
Figura 32 - Curvas granulométricas dos horizontes da TR9 nos ensaios com e sem defloculante .....	100
Figura 33 - Foto da tentativa de realizar o ensaio no horizonte A da TR9.....	108
Figura 34 - Diâmetro dos poros dos horizontes B e C de todas as trincheiras .....	114
Figura 35 - Gráficos com a porcentagem total de mercúrio introduzido e o tamanho dos poros para os horizontes B e C de todas as trincheiras.....	115
Figura 36 - Corpo de prova do ensaio de condutividade hidráulica do horizonte B da TR9 .	118
Figura 37 - Curvas de retenção a água de amostras da TR1 para secagem e umedecimento.	122
Figura 38 - Curvas de retenção a água de amostras da TR3 para secagem e umedecimento.	125
Figura 39 - Curvas de retenção a água de amostras da TR7 para secagem e umedecimento.	127
Figura 40 - Curvas de retenção a água de amostras da TR9 para secagem e umedecimento.	129
Figura 41 - Foto de um anel do horizonte A da TR3, utilizado para a curva de umedecimento .....	131
Figura 42 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 B 25% ....	133
Figura 43 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 B 35% ....	133
Figura 44 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 B Sat .....	134
Figura 45 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 C 25% ....	137
Figura 46 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 C 35% ....	137
Figura 47 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR1 C Sat .....	138
Figura 48 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 B 25% ....	141
Figura 49 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR3 B 38% ....	142
Figura 50 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 B Sat .....	142
Figura 51 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 C 25% ....	145
Figura 52 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 C 35% ....	145
Figura 53 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR3 C Sat .....	146

Figura 54 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 B 38% ....	149
Figura 55 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 B 42% ....	149
Figura 56 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 Sat.....	150
Figura 57 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 C 22% ....	152
Figura 58 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 C 43% ....	152
Figura 59 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 C Sat .....	153
Figura 60 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR9 B 20% ....	156
Figura 61 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR9 B 30% ....	156
Figura 62 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR9 B Sat .....	157
Figura 63 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR9 C 18% ....	159
Figura 64 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR9 C 28% ....	159
Figura 65 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR9 C Sat .....	160
Figura 66 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para a TR1.....	164
Figura 67 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para a TR3.....	165
Figura 68 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para TR7 .....	166
Figura 69 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para a TR9.....	167
Figura 70 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR1 .....	201
Figura 71 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR3 .....	202
Figura 72 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR7 .....	203
Figura 73 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR9 .....	204
Figura 74 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR1 .....	205
Figura 75 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR3 .....	206
Figura 76 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR7 .....	206
Figura 77 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR9 .....	207
Figura 78 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica.....	207

Figura 79 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica.....	208
Figura 80 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica.....	208
Figura 81 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica.....	208
Figura 82 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR1 .....	209
Figura 83 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR3 .....	209
Figura 84 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR7 .....	210
Figura 85 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR9 .....	210
Figura 86 - Corpos de prova mostrando o quanto o solo contraiu durante a realização do procedimento das curvas de retenção .....	219

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa .....	44
Tabela 2 - Nova versão da classificação dos movimentos gravitacionais de massa .....	47
Tabela 3 - Resultados de FRX para a TR1 .....	79
Tabela 4 - Resultados de FRX para a TR3 .....	80
Tabela 5 - Resultados de FRX para a TR7 .....	81
Tabela 6 - Resultados de FRX para a TR9 .....	82
Tabela 7 - Massa específica dos sólidos e teor de umidade das amostras deformadas de solo para cada horizonte das trincheiras analisadas .....	94
Tabela 8 - Distribuição granulométrica com e sem defloculante da TR1 .....	96
Tabela 9 - Distribuição granulométrica com e sem defloculante da TR3 .....	97
Tabela 10 - Distribuição granulométrica com e sem defloculante da TR7 .....	99
Tabela 11 - Distribuição granulométrica com e sem defloculante da TR9 .....	100
Tabela 12- Porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante, com as respectivas classificações texturais para a TR1 .....	102
Tabela 13 - Porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante com as respectivas classificações texturais para a TR3 .....	103
Tabela 14 - Porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante com as respectivas classificações texturais para a TR7 .....	104
Tabela 15 - Porcentagens de frações granulométricas com e sem defloculante com as respectivas classificações texturais para a TR9 .....	105
Tabela 16 - Limites de consistência de todos os horizontes das 4 trincheiras.....	106
Tabela 17 - Atividade das argilas para todos os horizontes das trincheiras estudadas.....	109
Tabela 18 - Caracterização das amostras de solo para cada horizonte na trajetória de secagem .....	111
Tabela 19- Caracterização das amostras de solo para cada horizonte na trajetória de umedecimento.....	112
Tabela 20 - Valores de condutividade hidráulica do fluxo vertical para os horizontes B e C de todas as trincheiras.....	116
Tabela 21 - Valores de condutividade hidráulica do fluxo horizontal para os horizontes B e C de todas as trincheiras.....	116
Tabela 22 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR1.....	140

Tabela 23 – Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR3 .....	148
Tabela 24 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR7.....	154
Tabela 25 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR9.....	162
Tabela 26 – Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR1.....	211
Tabela 27 – Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR3.....	211
Tabela 28 - Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR7 .....	212
Tabela 29 - Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR9 .....	212
Tabela 30 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR1...213	
Tabela 31 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR3...214	
Tabela 32 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR7...214	
Tabela 33 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR9...215	
Tabela 34 - Cálculo de porcentagem para grau .....	216
Tabela 35 - Química de rotina .....	220



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DRX – Difração de Raio X

FRX – Fluorescência de Raio X

LC – Limite de Contração

LP – Limite de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

IP – Índice de Plasticidade

IA – Índice de Atividade

NP – Não Plástico

$V_s$  – volume de sólidos do solo ( $\text{cm}^3$ )

$V_w$  – Volume de água no solo ( $\text{cm}^3$ )

$V_v$  – Volume de vazios do solo ( $\text{cm}^3$ )

$V_t$  – Volume total dos solos ( $\text{cm}^3$ )

$M$  – Massa do solo (g)

$M_s$  – Massa seca do solo (g)

$K_{\text{sat}}$  – Condutividade hidráulica saturada (m/s)

$W$  (%) – Umidade gravimétrica

$\theta$  (%) – Umidade volumétrica

SR (%) – Grau de saturação

$t$  – Resistência ao cisalhamento

$c$  – Coesão ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma$  – Tensão Normal ( $\text{kN/m}^2$ )

$\phi$  – Ângulo de atrito interno

$Q$  - Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\Delta h$  - Variação da carga hidráulica (da maior cota para a menor) (m)

$L$  - Distância percorrida pela água (m)

$\gamma_s$  - Massa Específica dos Sólidos (g)

$\gamma_{nat}$  - Massa Específica Natural do solo (g)

$\gamma_d$  - Massa Específica Seca do solo (g)

$e$  - Índice de Vazios

$n$  (%) - Porosidade

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2 - OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>3 - ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>26</b>
3.1 - CLIMA DO MUNICÍPIO DE SANTOS .....	28
3.2 - GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SANTOS.....	29
3.3 - GEOMORFOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SANTOS .....	31
3.4 - PEDOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SANTOS .....	32
3.5 - VEGETAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTOS .....	33
3.6 - TRINCHEIRAS ANALISADAS .....	35
3.6.1 - TRINCHEIRA TR1 .....	36
3.6.2 - TRINCHEIRA TR3 .....	37
3.6.3 - TRINCHEIRA TR7 .....	37
3.6.4 - TRINCHEIRA TR9 .....	38
<b>4 - A VERTENTE E SEUS PROCESSOS .....</b>	<b>40</b>
4.1 - ESTABILIDADE DA ENCOSTA.....	41
4.2 - MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA .....	42
4.2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA .....	43
4.3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	48
4.4 - ÁGUA NO SOLO .....	51
4.4.1 - HIDROLOGIA DE VERTENTE.....	54
4.4.2 - POTENCIAL DA ÁGUA NO SOLO .....	55
4.4.3 - PERMEABILIDADE.....	56
4.4.4 - CURVA DE RETENÇÃO .....	58
4.4.4.1 - PAPEL FILTRO.....	60
4.5 - INTEMPERISMO DOS SOLOS .....	61
<b>5 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>64</b>
5.1 - PROCEDIMENTOS DE CAMPO.....	64
5.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	66
5.2.1 - AMOSTRAS DEFORMADAS .....	66
5.2.1.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO .....	67
5.2.1.1.1 - MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	67

5.2.1.1.2 - GRANULOMETRIA .....	67
5.2.1.2 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA .....	69
5.2.1.3 - ANÁLISES DE DRX E FRX .....	71
5.2.2 - AMOSTRAS INDEFORMADAS .....	71
5.2.2.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	72
5.2.2.2 - POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO .....	72
5.2.2.3 - CURVA DE RETENÇÃO À ÁGUA DO SOLO .....	73
5.2.2.4 - PERMEABILIDADE.....	76
5.2.2.5 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO .....	77
<b>6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
6.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DEFORMADAS DE SOLOS .....	79
6.1.1 - GEOQUÍMICA DOS SOLOS .....	79
6.1.1.1 - FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X .....	79
6.1.1.2 - DIFRAÇÃO DE RAIOS X .....	84
6.1.2 - ANÁLISES FÍSICAS DO SOLO .....	93
6.1.2.1 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	95
6.1.2.1.1 - CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL .....	102
6.1.3 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA .....	106
6.1.3.1 - ATIVIDADE DA ARGILA .....	109
6.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS .....	110
6.2.1 - POROSIMETRIA .....	113
6.2.2 - ÁGUA NO SOLO INDEFORMADO .....	116
6.2.2.1 - PERMEABILIDADE.....	116
6.2.2.2 - CURVA DE RETENÇÃO .....	121
6.2.3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	132
6.2.3.1 - RESULTADOS DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO CAMPO COM A UMIDADE .....	164
<b>7 - SÍNTESE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>169</b>
7.1 - TR1 .....	169
7.2 - TR3 .....	171
7.3 - TR7 .....	175
7.4 - TR9 .....	177
<b>8 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>181</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>184</b>

<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>201</b>
<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>205</b>
<b>APÊNDICE III.....</b>	<b>213</b>
<b>APÊNDICE IV.....</b>	<b>216</b>
<b>APÊNDICE V.....</b>	<b>217</b>
<b>APÊNDICE VI.....</b>	<b>219</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>220</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores de desencadeamento dos movimentos gravitacionais de massa é a chuva. Essas condições intensas de chuvas, principalmente em países tropicais, representam condições normais do regime pluviométrico nos meses da estação chuvosa, que são semelhantes a diversas regiões do território brasileiro.

Além das chuvas, outros fatores de destaque são a declividade, as atividades vulcânicas, os abalos sísmicos, as águas de degelo e a interferência humana (Highland e Bobrowsky, 2008).

Este tipo de evento natural está se tornando um dos maiores causadores de perda econômica e de vidas humanas ao redor do mundo (Alcantara-Ayala, 2002). No Brasil o pior desastre já registrado foi o de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro, em que mais de 1000 pessoas morreram ou estão desaparecidas.

Esses movimentos gravitacionais de massa desencadeados pelos eventos de chuva têm sido estudados em todo o mundo. Na China, embora muitos movimentos de massa tenham origem a partir de terremotos, uma grande parte é desencadeada a partir de chuvas intensas (Kong, 2017; Chen, 2016; Tang, 2017; Zhuang, 2017; Ran, 2018), assim como na Itália (Giannecchini, 2012; Vennari, 2014; Bordoni, 2015; Montrasio, 2012; Martelloni, 2012) e em muitas outras partes do mundo (Wilson, 1995; Springman, 2013; Lee, 2009; Matsushi, 2007; Rosi, 2016).

Em especial, no Brasil, existem algumas regiões que apresentam características específicas que influenciam diretamente no desenvolvimento e desencadeamento dos movimentos gravitacionais de massa. O litoral sudeste do Brasil é uma destas áreas, sendo caracterizado por uma grande barreira montanhosa conhecida como Serra do Mar. Esta se apresenta por mais de 1000 km ao longo da costa brasileira e com altitudes de mais de 1000m, como uma parte da Serra do Juqueriquerê, com altitudes de até 1277 m (Cruz, O. 1974, Almeida e Carneiro, 1998). Outro aspecto importante desta região costeira do Brasil está relacionado a uma das maiores atividades comerciais e ocupação populacional do país, por isso a ocorrência desses eventos afeta, não somente a população com perda de vidas, como a economia do país, destruindo rodovias, linhas de transmissão, residências e outras construções (Wolle e Carvalho, 1989, Augusto Filho e Magalhães, 2004).

Nesta região encontra-se o município de Santos, localizado entre o Oceano Atlântico e a barreira da Serra do Mar. A região de Santos é uma das mais movimentadas e estratégicas do país, com a presença Porto de Santos, um dos principais do Brasil com atividades intensas na exportação de produtos como açúcar, milho, enxofre, complexo de soja, óleo diesel e mineral, minério de ferro, álcool entre outros (Codesp, 2013).

De maneira geral, os movimentos gravitacionais de massa, em especial, os escorregamentos, têm suas causas relacionadas com as propriedades físicas, geotécnicas, químicas e mineralógicas, e suas relações com a dinâmica da água, exigindo uma abordagem mais intensa e detalhada das características relacionadas com esse fenômeno, isto é levantamento detalhado e cuidadoso de informações relacionadas a esses movimentos.

Assim, essa abordagem foi realizada no município de Santos, com trabalhos detalhados de campo e de laboratório, para que fosse possível relacionar as características locais com os potenciais de movimentação de massa (Ferreira, 2013, Mendes, 2008). As propriedades geotécnicas e hidráulicas do solo precisam ser amplamente estudadas, em relação aos eventos de escorregamentos, em especial em regiões tropicais, onde a frequência de chuvas intensas e as temperaturas elevadas têm um papel fundamental no desenvolvimento do perfil de solo e na dinâmica da água, que podem acarretar em uma diminuição da resistência ao cisalhamento como a coesão aparente (Rahardjo, 2007). Infelizmente, os trabalhos relacionados a movimentos de massa, que envolvam uma análise mais detalhada das propriedades do solo, não são muito comuns (Stanchi, 2012), o que justifica a importância deste tipo de abordagem.

Assim, considerando que o solo não apresenta continuidade na sua estrutura, o comportamento da água no solo será diferente tanto na profundidade como nas dimensões laterais. Essa complexidade nas descontinuidades estruturais do solo produz alterações significativas em relação a infiltração e percolação da água na matriz do solo, podendo produzir zonas de descontinuidades hidráulicas elevando a poro-pressão positiva no solo, gerando uma perda da sucção matricial e, conseqüentemente, levando a instabilidade da encosta (Wolle e Carvalho, 1989; Suradi, 2015).

Desta maneira, com o aumento gradual da quantidade água nos poros do solo, a sucção matricial diminui, alterando também a resistência ao cisalhamento do solo, podendo atingir um ponto crítico onde a frente de umedecimento em determinada profundidade pode causar uma instabilidade na vertente e início da movimentação de massa (Fourie, 1999).

Diante do exposto se faz necessário estudar a dinâmica da relação água-solo para compreender o desencadeamento dos movimentos gravitacionais de massa, fornecendo dados confiáveis para futuros trabalhos de modelagem e mapeamento. A importância e complexidade do tema envolveu um trabalho intenso de campo e de laboratório com a realização de análises e ensaios das amostras, em uma área de extrema importância para o estado de São Paulo, que é o município de Santos.

Assim, para o desenvolvimento do trabalho, partiu-se da hipótese de que a descontinuidade no perfil de solo entre os horizontes B e C provoca uma de perda da resistência ao cisalhamento indicando um provável local de desestabilização de massa nas vertentes. Portanto o presente trabalho se concentrou em estudar estes dois horizontes.



## 2 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é compreender o comportamento da cobertura pedológica de uma encosta, pertencente a Serra do Mar no município de Santos – SP, considerando a dinâmica hidráulica e sua influência nas possíveis zonas de fragilidade onde podem ocorrer as rupturas que levam aos movimentos gravitacionais de massa da encosta.

### 2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física e geotecnicamente os solos dos horizontes A, B e C de trincheiras abertas na encosta estudada.
- Obter a composição mineralógica dos solos, relacionando-a ao grau de intemperismo e a composição físico-química e geotécnica.
- Compreender a influência da água sobre os fatores de controle da estabilidade da encosta, relacionados principalmente às propriedades hidráulicas do solo.
- Determinar propriedades da resistência ao cisalhamento associando-as à variação da umidade.
- Correlacionar todas as análises realizadas para entender o comportamento do solo frente a umidade.

### 3 - ÁREA DE ESTUDO

Santos é uma das cidades mais antigas do Brasil, pois seu povoamento começou por volta de 1540. Ela se destaca no âmbito nacional, porque abriga desde o início do século XX, o maior complexo portuário da América Latina, possuindo, portanto, uma logística muito especial para poder receber um intenso tráfego externo tanto de pessoas como de veículos, além dos próprios residentes necessários para o funcionamento deste porto.

Inserida na região da Baixada Santista, a cidade de Santos ocupa a parte leste da ilha de São Vicente, que tem a cidade de mesmo nome ocupando a parte oeste. Entre as duas cidades encontra-se um complexo de morros com altitudes máximas em torno de 200m, onde se insere a área objeto desse estudo. Nesse conjunto de morros já aconteceram alguns dos maiores e mais trágicos eventos de movimentos de massa do país, como o do Mont Serrat em 1928 e depois em 1956.

A área do município é de 280,6 km<sup>2</sup>, sendo a parte insular com 39,4 km<sup>2</sup> (Moreira, 2017) e o número de habitantes no último censo (2010) foi de 419.400 mil segundo IBGE (2018). Este município faz parte da RMBS com outros oito municípios: Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande e São Vicente, ocupando uma área de 2.818 km<sup>2</sup> e com uma população de mais 1,6 milhões de habitantes, sendo que no período de verão esta população aumenta.

A encosta estudada engloba o Morro do Saboó e o Morro Chico de Paula no município de Santos, litoral do Estado de São Paulo (Figura 1). Ela se encontra no interior da área urbanizada, na parte insular deste município, e está ocupada por moradias irregulares na sua metade inferior e no topo desses morros.

Essa vertente foi escolhida porque tem ótima representatividade geográfica para o nosso objetivo de estudo, ou seja, os movimentos gravitacionais de massa. Além de estar inserida na estrutura geomorfológica de “Morros Litorâneos” ou “Morros Residuais”, bem característica desse trecho do município. A encosta também se encontra ocupada em algumas partes, por moradias irregulares de baixa renda, fatores que tornam essa área ainda mais suscetível aos movimentos gravitacionais de massa.

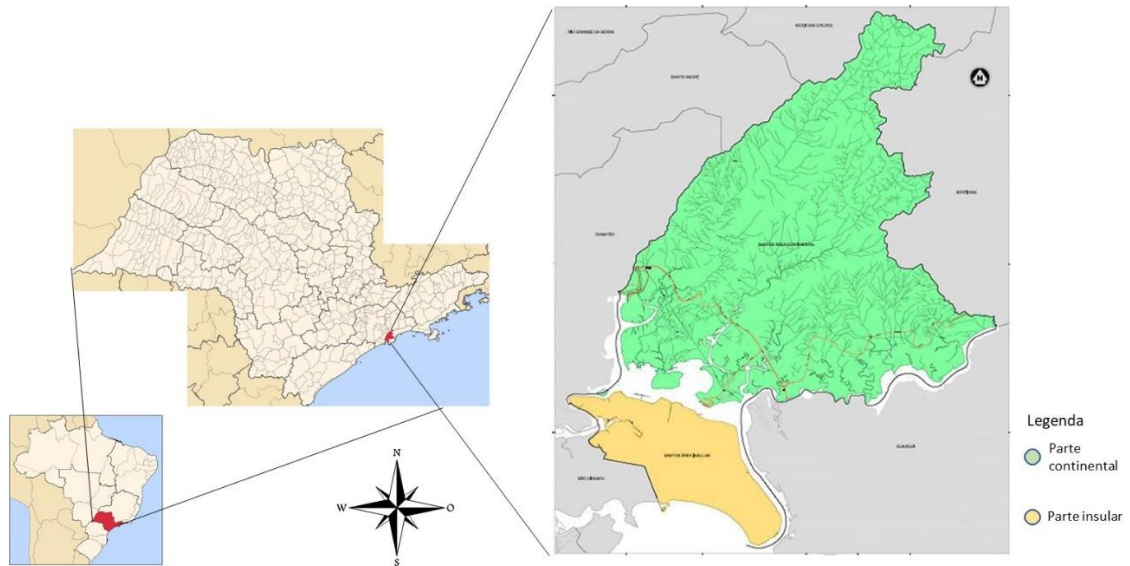


Figura 1 - Mapa de localização de Santos

Município de Santos destacando a parte insular em amarelo e a parte continental em verde

Principalmente por ter sido palco de inúmeros eventos de movimentos de massa ao longo dos anos, a Serra do Mar tem sido estudada em várias ocasiões (De Ploe e Cruz, 1979; Wolle e Carvalho, 1989; Vargas, 1999; Santos, 2004; Augusto Filho e Magalhães, 2004; Kanji et al, 2008). Essa barreira orográfica se estende pela costa do Brasil passando por cinco diferentes estados (Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina) com uma extensão aproximada de 1.500 km, formando um conjunto de escarpas festonadas, que em São Paulo se apresenta como uma típica borda de planalto nivelada em altitudes entre 800 e 1.200 metros (Oliveira, 2007; Nery, 2011; Vieira et al, 2010; Cerri, et al., 2018).

Santos é um dos poucos municípios no Brasil que apresenta estudos de áreas de riscos, principalmente desenvolvidos pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), já tendo inclusive um relatório elaborado pelo IPT (2012) que contempla a área em questão e a define como de risco associado a cortes de taludes ou escoamentos superficiais concentrados.

A Serra do Mar no estado de São Paulo, apresenta condições favoráveis ao desenvolvimento de movimentos gravitacionais de massa de vários tipos, entre eles os escorregamentos e fluxos de detritos, por ter um clima tropical, com altos índices pluviométricos (com chuvas concentradas e intensas), escarpas e desníveis elevados, com uma intensa urbanização (Cerri et al, 2018).

### 3.1 - CLIMA DO MUNICÍPIO DE SANTOS

Pela sua localização, numa estreita faixa de terra entre o Oceano Atlântico e o continente, neste caso representado pela Serra do Mar, o município de Santos sofre influência direta das frentes úmidas vindas do mar e que encontram uma barreira a poucos quilômetros, caracterizando o clima quente e úmido da região.

Segundo a Classificação Climática de Köppen, a faixa litorânea do estado de SP recebe a classificação Af, caracterizada pelo clima tropical chuvoso, sem estação seca, com a precipitação média do mês mais seco superior a 60mm. (CEPAGRI, 2018).

O clima é litorâneo de transição tropical para subtropical úmido, sendo que o período mais intenso de chuva acontece nos meses de verão (janeiro, fevereiro e março) e o de menor intensidade nos meses de inverno (junho e julho). A pluviosidade média anual é de 2350mm e a temperatura média anual é de 22°C (IPT, 1979).

Pellegati (2007) também define o regime de chuva como Tropical, com os meses mais secos entre abril e setembro e mais úmidos entre outubro e março. A pluviosidade vai variar de acordo com os fatores topográficos, pois estes influenciam a circulação dos ventos na região.

Nesse mesmo estudo Sant'anna Neto (1994) demonstra também que o “Litoral Central” representa uma zona transicional, que ora se assemelha ao que acontece com o tempo no litoral sul, e ora se assemelha ao que acontece no litoral norte, mostrando que a participação dos sistemas Tropicais e Extra-Tropicais, são mais equilibrados, alternando-se de um ano para o outro”.

O litoral do Estado de São Paulo, devido a sua posição latitudinal, acaba sendo o palco de um complexo jogo de atuações de ventos dos sistemas tropicais (oriundos do Anticiclone Tropical do Atlântico – ATA) e de ventos dos sistemas polares (oriundos dos Anticiclones Polares Migratórios – APM), além dos fenômenos Frontológicos (Farinnaccio et al, 2009).

Segundo Monteiro (1999), ao sul do Trópico de Capricórnio tem-se um clima regional de contrastes térmicos acentuados entre verão e inverno, que associados a uma pluviosidade farta durante todo o ano, faz com que não se tenha um período seco definido.

### 3.2 - GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SANTOS

A região em questão está no domínio geológico denominado Embasamento Exposto, na Província da Mantiqueira, ou seja, no Sistema Orogênico Mantiqueira formado essencialmente por rochas Pré-Silurianas, quase sempre expostas. Nele também se encontra a zona de cisalhamento transcorrente de Cubatão, derivada dos processos orogênicos transbrasilianos com metamorfismo, deformação tangencial seguida de transcorrência e levada à foliação (geometria de fatias, lentes e sigmoides justapostos (Hasui, 2012).

Segundo Almeida e Carneiro (1998), a Serra do Mar é um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1.000 km de extensão, em que termina o Planalto Atlântico no trecho voltado para a Bacia de Santos. Em São Paulo, impõe-se como típica borda de planalto, frequentemente nivelada pelo topo em altitudes de 800 a 1.200 m.

Para Zalán (2012), a linha de costa brasileira se encontra na margem passiva oeste da Placa Sul-Americana, que está se afastando da África num processo de rifteamento, ou seja, abertura da crosta terrestre em consequência do fenômeno considerado pela Teoria da Tectônica de Placas.

A linha de charneira das Bacias de Santos e Campos representa o limite original da Serra do Mar. Esse soerguimento teve como consequência o fato de os rios desta região fluírem para o interior desse plateau, ou melhor, do continente. Esse trecho da zona costeira é caracterizado por numerosas ilhas e baías originadas pela inundação no Quaternário, ou seja, a elevação do nível do mar sobre os Grabens e Horstes da região. O escarpamento da Serra do Mar, é na verdade uma escarpa de falha, e todas as grandes baías e estuários são riftes inundados pelo mar (Zalan e Oliveira, 2005).

A grande variedade de rochas existentes na região se divide em três grupos: os Migmatitos, o granito intrusivo (tipo Santos) com rochas associadas e as intrusivas básicas (Figura 2). O primeiro grupo é o que possui maior complexidade dos tipos de rochas, no segundo temos os Migmatitos de Paleossoma Dominante (solos de espessuras variáveis), Migmatitos Estromatíticos (com espessuras de solo consideráveis, podendo atingir mais de uma dezena de metros), granito com megacristais orientados (origina solos pouco espessos) e o terceiro grupo dito genericamente como constituído de diabásio. (IPT, 1979).

Segundo Santos (2004) a região possui grande variedade litológica em seu substrato, que são agrupadas em dois grupos, as rochas do embasamento cristalino e as coberturas cenozoicas. Na serra do Mar, as rochas mais frequentes são os migmatitos, os

gnaisse e os xistos, mas também ocorrem com frequência média, corpos granitóides, quartzitos, filitos, rochas metacarbonáticas, intrusões graníticas e de diabásio.

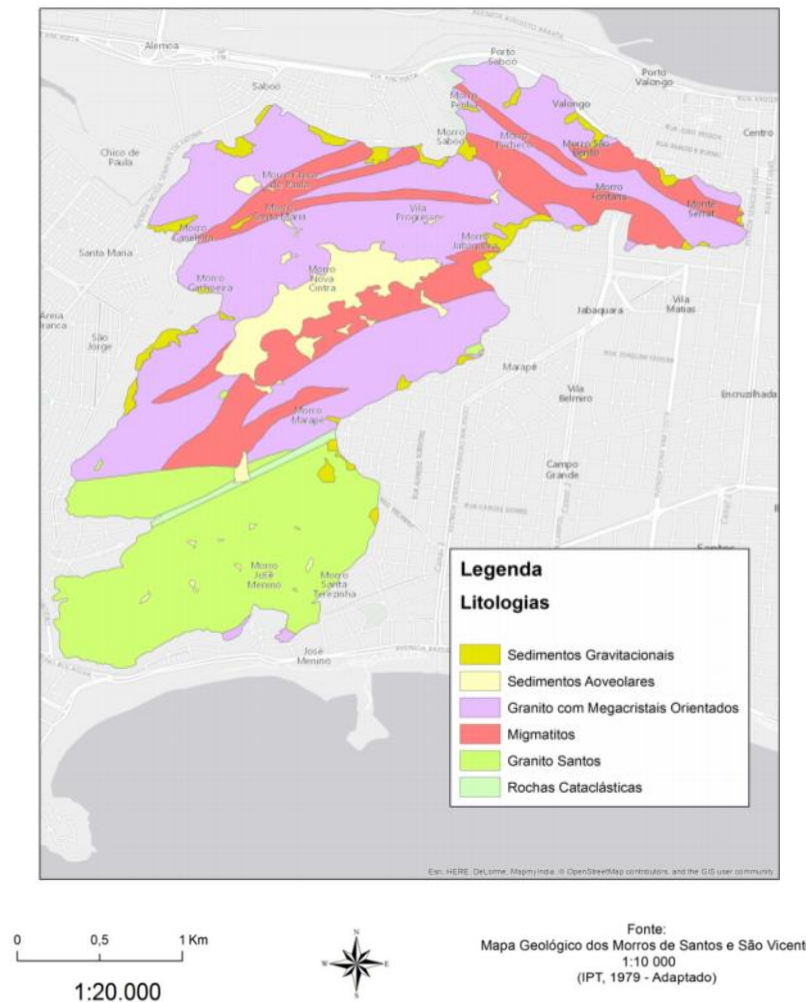


Figura 2 - Mapa da Geologia de Santos

Fonte: Gobbi, 2017

A influência dos diversos tipos rochosos no comportamento das encostas foi investigada em escala de detalhe por Pires Neto et al. (1979), na região dos morros de Santos e São Vicente.

### 3.3 - GEOMORFOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SANTOS

Geomorfologicamente, a área de estudo se encontra na zona da Morraria Costeira ou na unidade geomorfológica de Morros Litorâneos, dentro da Província Costeira do Estado de São Paulo. Esta Província representa a área do Estado que é drenada diretamente para o Atlântico, constituindo o rebordo oriental do Planalto Atlântico, onde se encontra a Serra do Mar. Serra essa que corresponde à escarpa montanhosa de transição entre a borda do Planalto Atlântico e as Baixadas Litorâneas, ora se apresentando abrupta e festonada, e ora em espigões lineares digitados (Santos, 2004).

Souza (2012) cita em seu trabalho os vários estudos realizados sobre os aspectos geomorfológicos do litoral paulista, como Deffontaines (1935), que reconheceu ali duas regiões, a costa retilínea a oeste de Santos e a costa recortada a leste de Santos, Almeida (1964) que considerou que essas variações morfológicas são devidas principalmente à erosão diferencial das rochas do embasamento cristalino, e denominou o compartimento litorâneo paulista de Província Costeira, dividida em duas zonas: Serrania Costeira e Baixada Litorânea. Mais tarde Ponçano et al. (1981) acrescentou nessa divisão mais uma zona, a Morraria Costeira (morros isolados ou conjuntos de morros dispersos nas planícies costeiras); esclarecendo que a Morraria e a Serrania Costeiras condicionam o alinhamento NE-SW da linha de costa paulista, Fúlfaro e Coimbra (1972) compartimentaram o litoral paulista em duas áreas morfológicamente distintas. A área ao norte, e a área ao sul, esta última é a que abrange a área estudada e que vai da Ponta da Boracéia até a divisa com o Paraná, com planícies costeiras e praias mais contínuas, separadas por pequenos pontões do embasamento cristalino e Ab'Saber (2000) propôs uma subdivisão do litoral paulista em oito setores, estando a área desse estudo, no setor denominado: Ilhas de São Vicente e Santo Amaro.

A Serra do Mar tem uma topografia que reflete os condicionantes geológicos, apresentando diferentes compartimentos: o planalto apresentando feições amorceadas; as serras e escarpas abruptas revestidas por formações superficiais pouco espessas sobre granito-gnaíse, recobertas por florestas tropicais, e a planície onde ocorrem sedimentos marinhos e flúvio marinhos, sobre os quais se desenvolvem uma vegetação herbácea e arbórea, com solos que podem apresentar hidromorfismo (Rossi e Queiroz Neto, 1996)

A Serra do Mar apresenta grande variedade geomorfológica, pois alguns trechos são irregulares e heterogêneos e outros, declivosos e contínuos. Muitas vezes as escarpas chegam próximas a linha de costa e outras avançam em direção ao Planalto Atlântico. A

explicação desta variação pode ser a presença de arranjos de falhas e transcorrências complexas e eventos morfotectônicos ligados à gênese do Planalto Atlântico durante o Pleistoceno e Mioceno (Vieira e Gramani, 2015).

Cerri et al (2018) apresentam as escarpas da Serra do Mar com alta densidade textural, vales encaixados em estruturas geológicas, deixando as drenagens com estrutura retilínea e com declividades médias e altas. As encostas são predominantemente retilíneas e secundariamente côncavas.

A Serra do Mar é resultado do movimento ascendente da crosta terrestre com origem em variações térmicas ou de volume no manto superior. Essa Serra é definida como uma escarpa de falha recuada pela erosão remontante; onde essa feição morfológica não corresponde mais ao plano de falha original, e a declividade aparente pode estar situada a quilômetros do local em que se produziu o deslocamento, ou melhor, a própria falha (Penha, 1998).

Ribeiro et al (2011) em seu trabalho sobre o desnivelamento da Serra do Mar ocorrido entre o Cretáceo Superior e o Paleoceno chama a atenção para eventos de dissecação de paleo-superfícies e reorganização da rede de drenagem do relevo.

Pereira e Feijó (1994) em seu trabalho sobre a bacia de Santos falam que o registro estratigráfico da região mostra uma forte discordância da erosão, que está provavelmente relacionada a interrupção das paleodrenagens que antes do Paleoceno migravam em direção a borda continental e que tiveram uma mudança na direção, esta indica uma atividade tectônica que causou esta alteração.

Segundo IPT (1981) “na região serrana, as escarpas mostram-se abruptas e festonadas, desenvolvendo-as ao longo de anfiteatros sucessivos, separados por espigões. Para compor o desnível total da ordem de 800 a 1200 metros entre as bordas do Planalto Atlântico e as baixadas litorâneas, a faixa de escarpas apresenta em planta larguras de 3 a 5 quilômetros em média.”.

### 3.4 - PEDOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SANTOS

Muito instáveis, essas coberturas mostram evidências em vários locais, de que estão em movimento de rastejo serra abaixo. Quando a precipitação supera os 100mm por dia podem acontecer escorregamentos catastróficos, como o ocorrido em 1928, no Monte Serrat,



quando, após chuvas violentas de março, cerca de dois milhões de metros cúbicos de terra deslizaram do alto do morro, sobre um hospital, matando um grande número de pessoas (Vargas, 1999b).

A análise das feições ao longo da evolução da Serra do Mar já expõe a “instabilidade” desta Serra, onde o registro de depósitos na zona costeira, mostra que os episódios mais recentes de escorregamentos e outros movimentos gravitacionais de massa, não são fatos isolados, mas sim a continuidade de um processo que em sua maior parte antecede à ocupação humana. Numa região com prolongados e elevados índices pluviométricos, escorregamentos e deslocamentos de solos e rochas acontecem em superfícies planas e inclinadas. A água se aproveitando das juntas e falhas antigas, combinadas com os lentos processos de denudação, ajudam a desenvolver em profundidade as massas de solo e rocha decompostas (Almeida e Carneiro, 1998).

Para Wolle e Carvalho (1989) os escorregamentos acontecem predominantemente na média e alta vertente, sendo que para eles as espessuras de solo eram bastante reduzidas nestas posições, tendo um solo poroso, argilo-arenoso ou arenoso-argiloso cobertos por um horizonte orgânico e com um horizonte mais profundo caracterizado por uma matriz arenosa ou siltosa e possíveis blocos e outras feições herdadas da rocha matriz.

Devido à alta declividade e altos índices pluviométricos, as partes altas das vertentes e interflúvios são onde ocorrem os movimentos gravitacionais de massa, como observa-se nas cicatrizes de escorregamentos, a exposição das rochas e a identificação de solos rasos. As cicatrizes deixam muitas vezes uma forma côncava na vertente, não oferecendo condições para o desenvolvimento de vegetação exuberante (Rossi e Queiroz Neto, 2001).

No quadro elaborado por (Ross e Moroz, 1996) encontra-se para a Unidade Morfoescultural dos Morros Litorâneos, uma altimetria variando de 10 a 200m, declividade variando de 20 a 30%, tendo os Cambissolos e os Litólicos como solos dominantes, mas também afloramentos rochosos.

### 3.5 - VEGETAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTOS

A vegetação característica da Serra do Mar é a de Mata Atlântica, sendo que na região de Santos ela tem sofrido muitas alterações, principalmente na área urbana, como é o

caso da encosta estudada, em que ocorre ocupação e conseqüentemente o uso da área, além de construção para moradia, para o plantio de bananeiras (IPT, 2012) usado no consumo dos próprios moradores como mostra a Figura 3.

A vegetação da região começou a sofrer alterações desde o início da colonização, próximo a 1560 com pequenas estradas que levavam a baixada ao interior do estado. O uso do solo começou com pequenas atividades agrícolas e em meados de 1813 começaram a surgir fábricas de tecidos em Cubatão. Em 1867 foi inaugurada a São Paulo Railway para escoar o café do interior para o litoral, e em 1913 foi possível a passagem de automóveis (Santos, 2004 e Nery, 2011).



Figura 3 - Vista do local onde foi feito o trabalho de campo

Segundo o IPT (1979), a cobertura vegetal tem ação específica que interage para auxiliar nos processos de escorregamentos, e que acabam se perdendo com o desmatamento. São três grandes ações, a copa das árvores que tem função de interceptar, reter e realizar a evapotranspiração, os detritos vegetais retendo a água no solo e diminuindo o escoamento superficial e o sistema radicular auxiliando no aspecto mecânico e hidráulico do solo.

A vegetação tem papel importante na estabilidade das vertentes que evoluem de acordo com processos erosivos, relacionados à inclinação, espessura e coesão dos

constituintes do solo, auxiliando a formar uma estrutura consolidada e dando estabilidade à vertente. A principal ligação entre a estabilidade das vertentes e os processos do ecossistema florestal é a alocação de carbono no solo através da rede de raízes que contribuem para a coesão e resistência, por isso a vegetação tem papel fundamental na estabilidade dessas áreas e deve ser considerada como um dos principais componentes no estudo de estabilidade de vertentes (Band et al., 2012).

### 3.6 - TRINCHEIRAS ANALISADAS

Esta encosta foi selecionada por trabalho anterior, por ser estratégica para a prefeitura, uma vez que existem moradias, tanto na base quanto no topo e tem registro anterior de deslizamento.

O trabalho utilizou 4 trincheiras (apresentadas na Figura 4) anteriormente abertas em outro trabalho (Gobbi, 2017) na mesma encosta, onde foram abertas 10 trincheiras para análises de descrição macromorfológica.

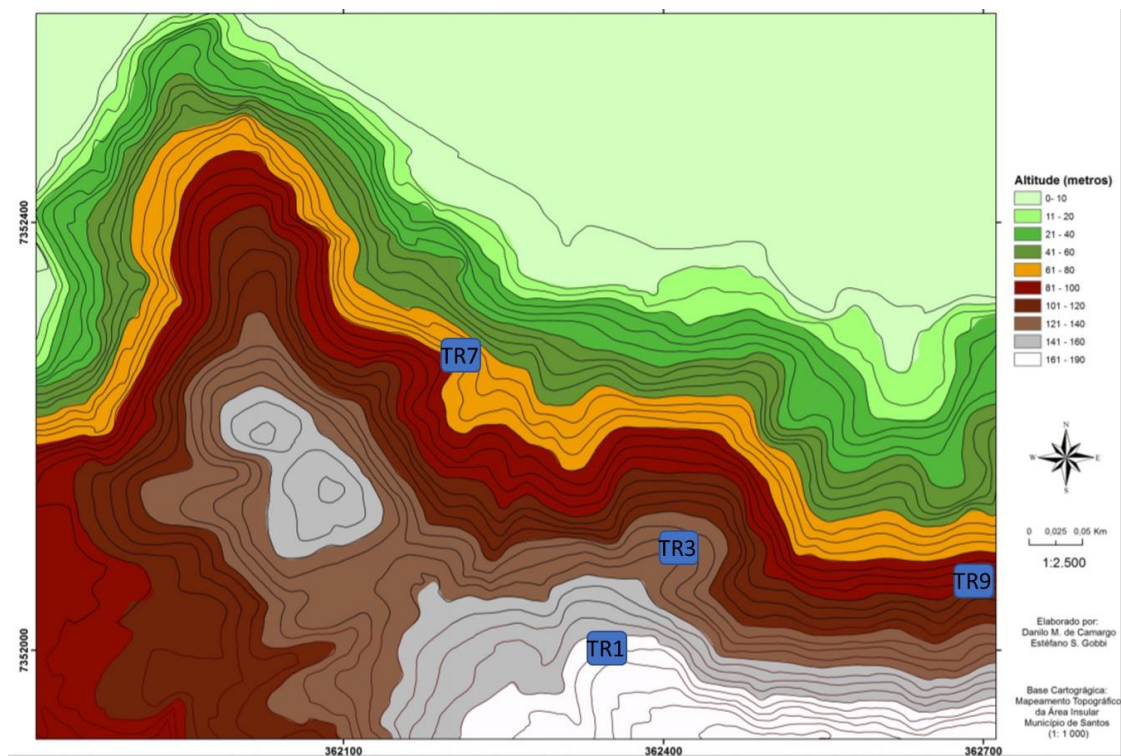


Figura 4 - Trincheiras analisadas no estudo

Fonte: Gobbi (2017), modificado pela autora

Embora as trincheiras TR1 e TR3 estejam próximas, elas apresentaram uma diferenciação das características macromorfológicas que levaram à sua escolha. As outras (TR7 e TR9) estão com uma espacialização mais distante, distribuídas para melhor verificar o comportamento do manto do solo ao longo de toda encosta. As trincheiras TR3, TR7 e TR9 tiveram a identificação de 5 horizontes, somente a TR1 apresentou 6 horizontes

### 3.6.1 - TRINCHEIRA TR1

A trincheira TR1 se localiza em área próxima ao divisor de águas (Figura 4), a qual é ocupada por moradias na parte superior, descampada com plantação de algumas bananeiras no local. Esta parte da encosta tem formato retilíneo. O primeiro trabalho de campo, no qual ocorreu a descrição dos horizontes da trincheira, aconteceu em dia nublado com precipitação moderada no dia anterior e o segundo trabalho de campo, quando houve a coleta de amostras de solo indeformadas, em dia ensolarado sem registro de precipitação nos dias anteriores.

A trincheira foi dividida em 6 horizontes sendo o A (0- 10/13cm), B1 (13-45cm), B2 (46-90cm), B3 (91-132cm), B/C (133-162/177cm) e C (162/177-218cm) como mostra a Figura 5. Apresenta declividade aproximada de 25% e foi verificado no ponto de escavação a presença de Migmatitos de Paleossoma Dominante (Gobbi, 2017).

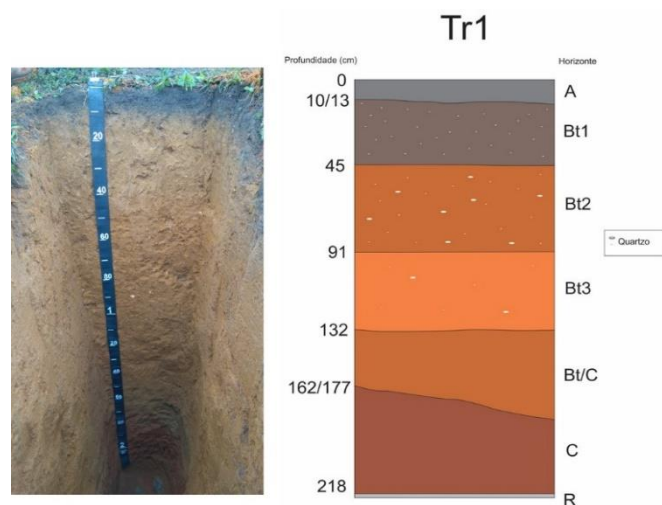


Figura 5 - Foto da TR1 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades

### 3.6.2 - TRINCHEIRA TR3

A trincheira TR3 situa-se em área aberta em pequeno platô (com forma retilínea), próxima a TR1 (Figura 4), com cobertura de gramíneas um pouco abaixo do divisor de águas da vertente. O primeiro trabalho de campo aconteceu em dia ensolarado sem registro de chuvas nos dias anteriores e a descrição pedológica foi realizada neste dia. Um segundo trabalho de campo, para coleta de amostras indeformadas, ocorreu em dia ensolarado sem registro de chuvas nos dias anteriores.

Esta trincheira foi dividida em 5 diferentes horizontes, sendo A (0-16cm), A/B (17-29cm), B1 (30-111cm), B2 (112-157cm) e C (158-206cm) como se pode observar na Figura 6. Ela apresenta 12% de declividade e se encontra no contato entre Granitos e Migmatitos (Gobbi, 2017).

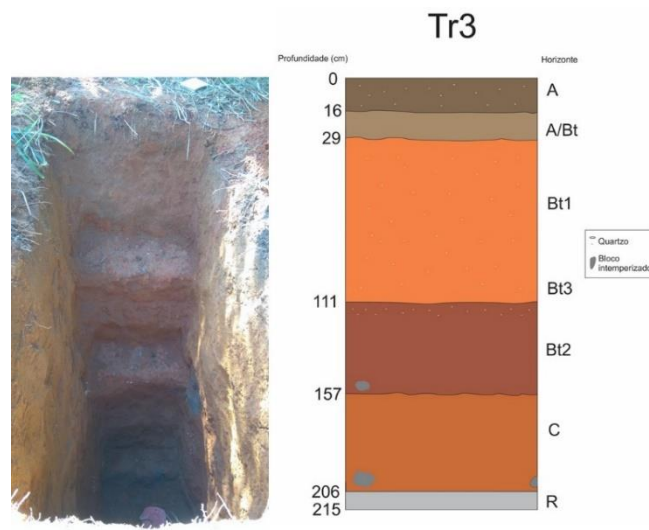


Figura 6 - Foto da TR3 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades

Fonte: Gobbi (2017)

### 3.6.3 - TRINCHEIRA TR7

A área da trincheira TR7 está próxima a uma moradia em meio a vertente (Figura 4) com vegetação de médio a grande porte, com presença de um canal de drenagem de águas pluviais. O primeiro trabalho de campo, para descrição do perfil de solo, foi realizado em dia nublado sem registro de chuvas nos dias anteriores, e o segundo trabalho de campo, no qual

ocorreu a coleta de amostras indeformadas, em dia ensolarado também sem registro de chuvas nos dias antecedentes. Esta trincheira está localizada em parede de antiga cicatriz de escorregamento.

Foram separados 5 horizontes, sendo A (0-12cm), B1 (12-30cm), B2 (30-54cm), C1 (54-107cm) e C2 (107-211cm) como pode-se observar na Figura 7. A TR7 apresenta 75% de declividade e está localizada na área de ocorrência de Granitos com Megacrístais Orientados (Gobbi, 2017).

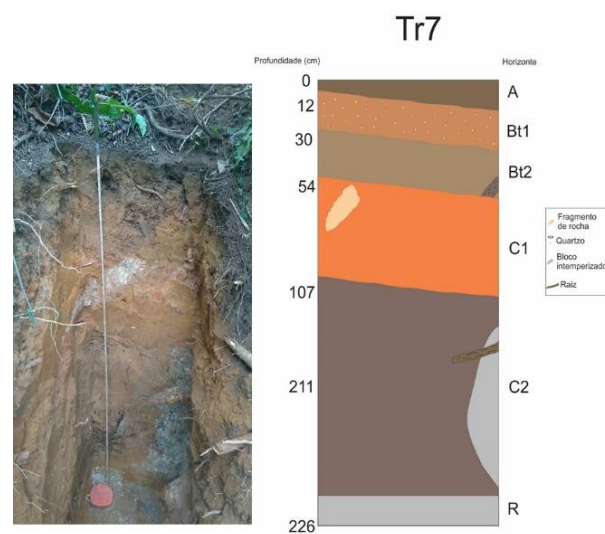


Figura 7 - Foto da TR7 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades

Fonte: Gobbi (2017)

### 3.6.4 - TRINCHEIRA TR9

A trincheira TR9 está localizada em área com declividade acentuada (Figura 4) em meio a vegetação e próxima ao canal de drenagem com presença de blocos angulosos na superfície (Gobbi, 2017). O primeiro trabalho de campo foi realizado em dia ensolarado sem registro de chuvas nos dias anteriores, para descrição da trincheira e o segundo trabalho de campo, também em dia ensolarado sem registro de chuvas nos dias antecedentes, para retirar amostras de solo indeformadas. Ela está localizada em uma parte côncava da vertente.

A trincheira TR9 foi dividida em 5 horizontes, sendo A (0-16/20cm), B1 (16/20-40/43cm), B2 (40/43-110/120cm), B3 (110/120-152cm) e C (152-177cm) como mostra a



Figura 8. Ela apresenta 70% de declividade e está sobre a área de ocorrência de Granitos com Megacristais Orientados (Gobbi, 2017).

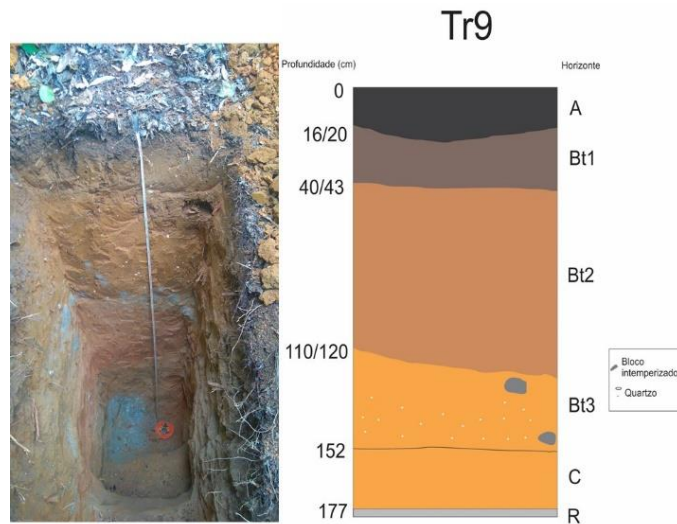


Figura 8 - Foto da TR9 com desenho definindo os horizontes e suas profundidades

Fonte: Gobbi (2017)

#### 4 - A VERTENTE E SEUS PROCESSOS

O estudo da vertente está diretamente relacionado com os processos de movimentos gravitacionais de massa. A vertente é um elemento geomorfológico presente na superfície terrestre e que tem orientação e uma inclinação em relação a horizontal. As vertentes apresentam diferentes formas, podendo ser retilíneas com ângulos constantes ou com curvaturas como as côncavas ou convexas. Estas formas podem desenhar toda a vertente ou somente parte dela.

As propriedades da rocha e os processos de modelagem da vertente são determinantes para a sua forma. Gravidade, fluxo de água e variações na temperatura são as forças por trás dos processos envolvidos nas vertentes (Huggett, 2007).

As formas das vertentes em área montanhosa são produto de processos construtivos e destrutivos. Estas áreas foram criadas por forças terrestres internas, mas são modificadas e eventualmente destruídas por forças externas, estas formas têm sido geradas ao longo do tempo geológico (Janke e Price, 2013).

O sistema de vertentes, considerando suas formas em retilínea, côncava e convexa é resolvido por mecanismos complementares de compensação, sendo a forma côncava a que concentra os fluxos, a forma convexa é onde existe uma dispersão de fluxo e a forma retilínea representada por um subsistema com características intermediárias as outras duas formas (Colângelo, 1995). As formas das vertentes e as concentrações do fluxo de água das chuvas podem ser observadas na Figura 9.

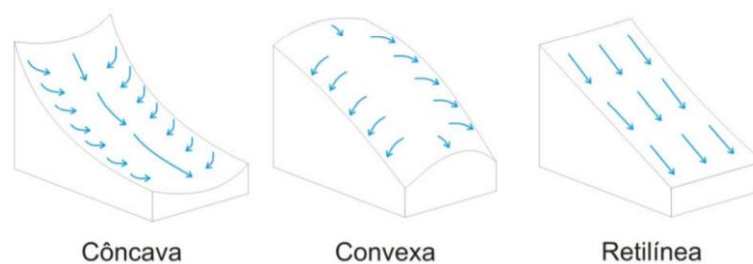


Figura 9 - Formas das vertentes e seus respectivos fluxos

Fonte: De Paula (2010)



Tanto a forma da vertente quanto seu comprimento influenciam no fluxo da água, sendo na forma convexa, o fluxo divergente, com um transporte difuso e na forma côncava um fluxo convergente de transporte incisivo.

Nogueira et al. (2011) chamam a atenção para a forma da vertente influenciando a direção do movimento de percolação da água, onde notaram este comportamento especialmente na alta vertente, em que a declividade era mais acentuada pela forma convexa do relevo.

Ao relacionar formas de vertentes e movimentos gravitacionais de massa, especialmente os escorregamentos Passarela et al. (2008) concluíram que a maior parte dos escorregamentos da região de Cubatão (Serra do Mar) está associada às vertentes retilíneas, seguidas das convexas.

Os solos das vertentes da Serra do Mar são tidos como pouco espessos, principalmente nas altas vertentes e interflúvios da escarpa onde, por efeito da alta declividade, o material de origem e os altos índices pluviométricos, estes solos têm pouca espessura (Rossi e Queiroz Neto, 2001).

#### 4.1 - ESTABILIDADE DA ENCOSTA

As vertentes naturais são objeto de estudo de diferentes especialistas, como engenheiros civis, geomorfólogos, pedólogos, engenheiros de minas, geólogos e profissionais que trabalham com meio ambiente. O material que compõe a encosta tem a tendência natural de deslizar, ou cair, sobre a influência da gravidade ou outras forças (como abalos sísmicos), o qual resiste graças às forças de resistência ao cisalhamento, quando esta resistência não é o suficiente para contrabalançar as forças, ocorre a instabilidade da vertente (Chowdhuri, 1978).

O material inconsolidado, ou não, presente nas vertentes é regido por forças que atuam em sua estabilidade. O resultado destas forças é conhecido como Fator de Segurança (FS), que é descrito como o resultado da razão das forças opostas ao movimento (t) que fazem parte da resistência ao cisalhamento e as forças que levam a ruptura do material (T). Sendo o FS inversamente proporcional às forças de ruptura como mostra a Equação 1.

$$FS = \sum t / \sum T$$

**Equação 1**

Nos solos de encostas atuam tensões que influenciam diretamente na sua estabilidade. A totalidade destas tensões se dá pela soma da tensão efetiva e da pressão neutra, sendo a tensão efetiva relacionada à deformação e resistência da estrutura sólida dos solos, ela age pelo contato das partículas sólidas do solo.

#### 4.2 - MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa são deslocamentos de rochas e/ou solos em superfícies inclinadas, influenciados pela ação da gravidade. Estes tipos de movimentos são desastres que ocorrem em diversas partes do mundo, e muitas vezes são naturais, fazendo parte do processo de modelagem do relevo, mas podem ocorrer por indução da ação do homem.

Os movimentos gravitacionais de massa têm sido cada vez mais frequentes no Brasil. E como a ocupação em áreas de risco de grandes e médias cidades se intensificou nos últimos anos, a intensidade do desastre causado por estes eventos, também tem sido cada vez maior.

Os movimentos de massa são considerados desastres naturais, mas a intensidade dos prejuízos pode variar muito. Muitos são os trabalhos que definem desastres naturais. Para Goerl e Kobiyama (2013), os fenômenos que causam desastres são próprios da dinâmica terrestre, ou seja, em algum tempo estes desastres irão ocorrer, variando em intensidade, magnitude, frequência e local. Mas quando eles ocorrem em algum local com ocupação causando danos, são considerados desastres.

As consequências dos desastres podem ser grandes ou pequenas, assim como diretas ou indiretas, elas dependem do contexto ao qual estão ligados, os elementos e atributos afetados, os valores e o nível de importância (Glade et al, 2005).

Os desastres naturais podem ser definidos a partir da relação entre o homem e a natureza, ou seja, eles resultam das tentativas humanas em dominar a natureza, além disso quando não são aplicadas medidas para redução dos efeitos dos desastres, a tendência é aumentar a intensidade, a magnitude e a frequência dos impactos (Kobiyama et al, 2006).

Para Alcántara-Ayala (2002) os desastres naturais devem ser estudados, não somente em relação a suscetibilidade, mas também em relação às características do sistema social (vulnerabilidade), levando em consideração o sistema econômico-político-social, como

em países em desenvolvimento, que acabam sofrendo mais com as consequências dos desastres.

Os desastres naturais advêm dos impactos causados por um evento físico na população humana. Eles ocorrem naturalmente, trabalhando na dinâmica evolutiva do planeta, como os movimentos gravitacionais de massa. Estes acontecem quando um material da vertente (intemperizado ou não) é deslocado para baixo, mas só se transformam em desastres por conta da ocupação das áreas de encostas (Nunes, 2015).

A importância de se entender a dinâmica geomorfológica das vertentes e os solos que as compõem é fundamental para a compreensão dos movimentos de massa que ocorrem em suas superfícies. Os escorregamentos são processos modeladores que alteram a paisagem, responsáveis pela oferta de sedimento, recuo das vertentes e modificação da forma da encosta (Kobiyama et al, 2011).

A estabilidade da vertente pode ser afetada por diferentes fatores desencadeadores dos movimentos, como erupções vulcânicas, terremotos, ação humana (corte de aterros, explosões, drenagem alterando a umidade constante do solo) e eventos de chuvas intensos (Glades et al, 2005; Highland & Bobrowsky, 2008; Crozier, 1986; Lee and Jones, 2004), sendo estes últimos os mais comuns no Brasil.

#### 4.2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa podem variar de muito rápidos a extremamente lentos e envolvem todo tipo de material da vertente (rochas, solos, detritos etc.). Uma primeira classificação dos movimentos de massa foi proposta por Varnes (1958), onde ele fala da necessidade de se classificar os movimentos para poder dar uma solução apropriada para recuperação ou medidas de segurança quando necessárias.

Existe uma variedade de critérios para diferenciação dos movimentos de massa. Estes são o tipo de material, o mecanismo dos movimentos e a velocidade, a geometria do material movimentado e o conteúdo de água (Fernandes e Amaral, 1996).

As classificações podem ser bem complexas, envolvendo uma variedade extensa de movimentos. Mas existem classificações mais simples como a de Augusto Filho (1992) que separam quatro principais tipos: o rastejo, escorregamentos (planares, circulares e em

cunha), quedas (rolamentos de matações e tombamentos) e corridas (hoje conhecidas como fluxos), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos movimentos gravitacionais de massa

Processos	Características do movimento Movimento/Material/Geometria
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vários planos de deslocamentos (internos)</li> <li>- Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>- Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</li> <li>- Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</li> <li>- Geometria indefinida</li> </ul>
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poucos planos de deslocamento (externos)</li> <li>- Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)</li> <li>- Pequenos a grandes volumes de material</li> <li>- Geometria e materiais variáveis</li> <li>1 – Planares: Solos pouco espessos, solos e rochas com plano de fraqueza</li> <li>2 – Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas</li> <li>3 – Cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza</li> </ul>
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sem planos de deslocamentos</li> <li>- Queda livre ou rolamento através de plano inclinado</li> <li>- Velocidades muito altas (m/s)</li> <li>- Material rochoso</li> <li>- Pequenos e médios volumes</li> <li>- Geometria variável: lascas, blocos, placas etc</li> <li>- Rolamento de matação e tombamento</li> </ul>
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muitas superfícies de deslocamento (externas e internas a massa de movimentação)</li> <li>- Movimento semelhante à de um líquido viscoso</li> <li>- Desenvolvimento ao longo das drenagens</li> <li>- Velocidades médias a altas</li> <li>- Mobilização de solo, rochas, detritos e água</li> <li>- Grandes volumes de material</li> <li>- Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</li> </ul>

Fonte: Augusto Filho (1992)

As diferentes formas dos movimentos gravitacionais de massa são importantes para sua classificação. O exemplo de uma forma de um escorregamento rotacional que gera elementos geomórficos, são identificados na Figura 10, cada um tem uma especificação.

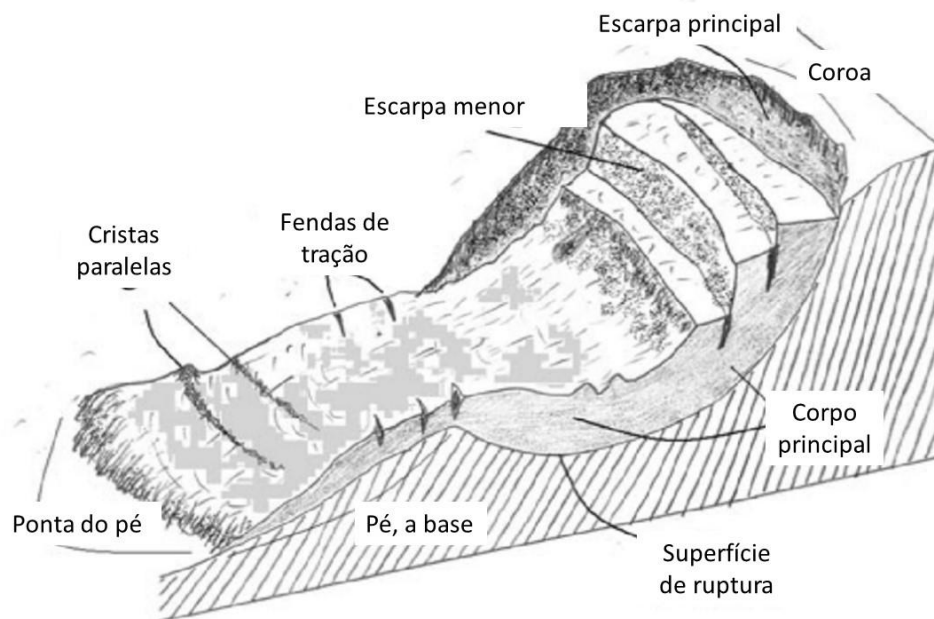


Figura 10 - Elementos geomórficos principais de um escorregamento rotacional

Fonte: De Blasio (2011), traduzido por Carolina Perdomo

A superfície de ruptura identifica a interface da base do escorregamento onde o material deslizou, o exemplo mostra uma superfície curva (escorregamento rotacional), mas em outros casos pode variar (por exemplo o escorregamento planar, com a superfície de ruptura plana). O pé (base) é o material depositado abaixo da superfície de ruptura, na zona de acumulação. O fim do depósito de material que escorregou se chama ponta do pé e determina a área de abrangência do escorregamento. Algumas vezes pode ocorrer fendas de tração ao longo do material que deslizou e podem aparecer também cicatrizes dentro do próprio movimento. O local onde ocorreu o movimento (o material foi removido) chama-se cicatriz (De Blasio, 2011).

Os mecanismos básicos de ruptura (queda, deslizamento, rastejo etc), combinados com os fatores constituintes da área, como estrutural geológica, clima, vegetação e topografia, produzem uma diversidade nos tipos de movimentos de massa (Lee and Jones, 2004).

Carson e Kirkby (1972) montaram um esquema, tipo diagrama, de classificação dos movimentos de massa (Figura 11). Neste diagrama é possível verificar as taxas relativas

do movimento durante o transporte de material e também o conteúdo de umidade para cada tipo de movimento.

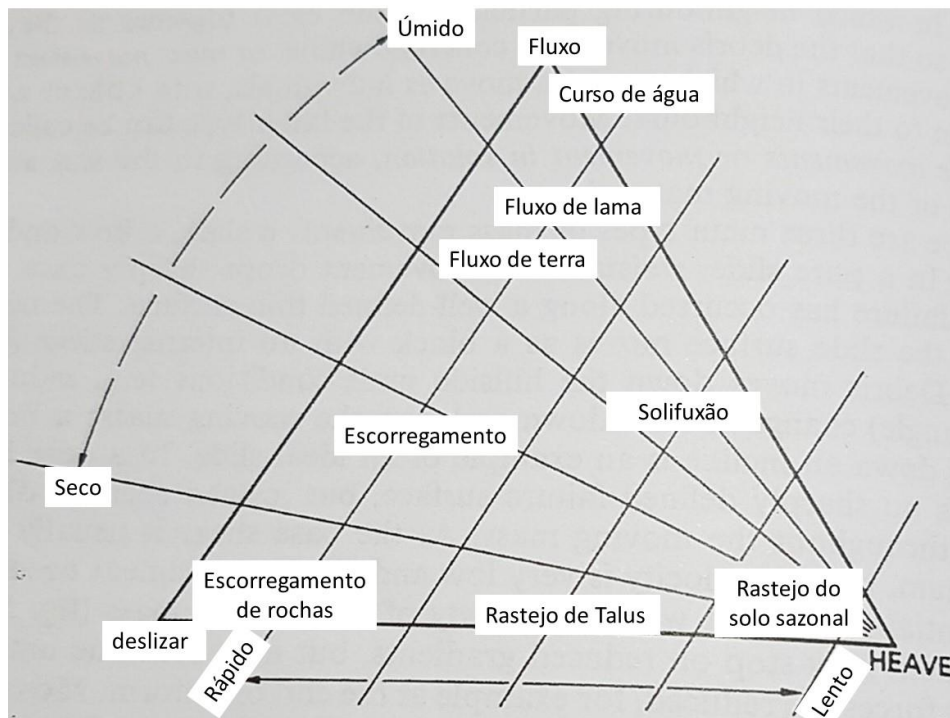


Figura 11 - Diagrama esquemático de classificação dos movimentos gravitacionais de massa

Fonte: Carson e Kirkby (1972), traduzido por Carolina Perdomo

Uma nova versão do sistema de classificação de Varnes para movimentos gravitacionais de massa foi feita por Hungr et al. (2014), classificando 6 grandes categorias, subdivididas em 32 no total. Esta nova versão da classificação pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Nova versão da classificação dos movimentos gravitacionais de massa

Tipos de Movimentos	Rocha	Solo
Queda	1. Queda de rochas /gelo	2. Queda de pedregulho/detrimento/silte
Tombamento	3. Tombamento de blocos de rocha 4. Tombamento a flexão de rochas	5. Tombamento de cascalho
Deslizamento ou Escorregamento	6. Escorregamento rotacional de rocha 7. Escorregamento planar de rocha 8. Escorregamento em Cunha de rocha 9. Escorregamento de rocha 10. Escorregamento irregular de rocha	11. Escorregamento rotacional de argila/silte 12. Escorregamento planar de argila/silte 13. Escorregamento de pedregulho/areia/detrimento 14. Escorregamento composto de argila/silte
Expansão lateral	15. Expansão de talude de rocha	16. Expansão de areia/silte 17. Liquefação, expansão de argila sensível
Fluxo	18. Avalanche de rocha/gelo	19. Fluxo seco de areia/silte/detrimento 20. Corrida úmida de areia/silte/detrimento 21. Fluxo úmido de argila sensível 22. Corrida (fluxo) de detritos 23. Corrida (fluxo) de lama 24. Inundação de detritos 25. Avalanche de detritos 26. Fluxo de terra 27. fluxo de turfa
Deformação de Talude	28. Deformação de talude de montanha 29. Deformação de talude de rocha	30. Deformação de talude de solo 31. Rastejo de solo 32. Solifluxão

Fonte: Hungr et al (2014), traduzido por Carolina

Os tipos mais comuns de movimentos de massa no Brasil são os escorregamentos. Dentre estes os planares ou rasos, por vezes, podem ocorrer fluxos de detritos como consequência de vários eventos de escorregamentos planares juntos. Esta situação é o que acontece na área Serra do Mar e em seu entorno.

A classificação destes movimentos tem importância, principalmente, atrelada ao planejamento de áreas de risco. Quando se consegue identificar os possíveis tipos de movimentos que podem ocorrer em determinadas áreas é possível identificar a abrangência

que poderá ter este, ou estes movimentos, e assim planejar melhor o tipo de ocupação que poderia ter naquela região.

#### 4.3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A avaliação da estabilidade da encosta consiste basicamente na análise do equilíbrio de uma massa de solo ou rocha potencialmente instável a partir de algumas hipóteses simplificadoras. A estabilidade de um talude ou de uma encosta é expressa pelo seu fator de segurança, e é obtido pelo quociente entre os esforços resistentes disponíveis e os esforços solicitantes (Carson & Kirkby, 1972; Crozier, 1986; Muceku, 2014; Silveira et al, 2012).

Para Pinto (2000), a resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a tensão máxima de cisalhamento que um solo pode suportar sem sofrer ruptura. Pode-se dizer que é o estudo das tensões máximas cisalhantes que um solo é capaz de suportar sem romper.

Os ensaios de resistência dos solos podem ser drenados ou não drenados, quando o ensaio é drenado, ocorre dissipação da água alterando a poropressão, os solos são adensados, mudam de volume. No ensaio não drenado a água não se dissipa, assim o volume não muda, as tensões entre as partículas não vão sofrer uma mudança, não alterando a poropressão da água (Gerscovich, 2011).

O comportamento dos solos em relação à resistência vai depender do estado de tensões. Em solos saturados, as tensões efetivas são denominadas através do conhecimento das tensões totais e da poropressão, no caso de solos saturados, as poropressões vão ser sempre positivas, e em solos não saturados a água preenche parcialmente os poros, e as poropressões vão ser negativas (sucção), assim os solos apresentam uma coesão aparente como mostra a Figura 12.



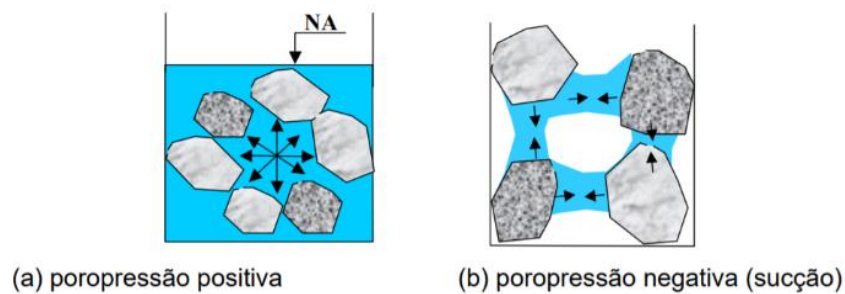


Figura 12 - Tensões da água no solo

Fonte: Gerscovich (2011)

A resistência ao cisalhamento do solo envolve dois parâmetros, o ângulo de atrito interno, função do contato entre superfícies, e a coesão, função da atração química entre partículas. Existem diferentes tipos de argila (fração fina do solo) que têm comportamentos diferentes em relação a absorção de água, como as expansivas que têm capacidade de absorver muito mais água e mudam seu tamanho por conta disso. Assim o ângulo de atrito interno depende do tipo de material e dos fatores que envolvem este material (densidade, rugosidade e forma entre outros), (Caputo, 1988; Pinto, 2006).

A estrutura dos solos vai influenciar na resistência, pois a tensão superficial da água nos poros (em solos não saturados) irá influenciar diretamente na sucção matricial, que gera maior atração entre as partículas do solo, aumentando assim a resistência. Quanto menor a porosidade maior a atração entre essas partículas (Budhu, 2015; Mendes, 2008).

O efeito da sucção matricial, em solos não saturados, em relação a sua resistência pode ser considerado como um incremento na rigidez, produzido pela ação intergranular que é gerada, com a tendência de manter as partículas do solo mais fortemente unidas. A resistência ao cisalhamento do solo cresce com o aumento da sucção matricial, até um valor máximo, a partir do qual pode-se ter uma diminuição na resistência até o solo ficar seco (Calle, 2000).

Pereira (2006) relata a influência da estrutura de solo na resistência, sendo que em solos granulares, os grãos tendem a formar pontes, e com a aplicação de forças externas, seus contatos acabam por desenvolver forças cisalhantes e normais, fazendo com que os grãos escorreguem entre si. Acontece que a interação ar/água gera um menisco unindo os grãos, esta união gera uma capacidade de resistência maior, mas com o aumento da umidade do solo, esta união se perde, ocorrendo a ruptura do solo.

Para os fenômenos de ruptura existe uma equação que representa a resistência ao cisalhamento e que leva em consideração a coesão, a tensão normal e o ângulo de atrito interno, Equação 2, Coulomb-Mohr (Selby, 1993; Pinto, 2006; Vargas, 1977).

$$t = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

t – Resistência ao cisalhamento

c – Coesão (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  – Tensão Normal (kN/m<sup>2</sup>)

$\varphi$  – Ângulo de atrito interno

A coesão verdadeira (ou real) do solo se dá pela atração físico-química entre as partículas e pela cimentação natural entre partículas. Esta coesão está presente em solos com fração granulométrica fina e em solos cimentados por óxidos de ferro, hidróxidos de alumínio, carbonatação entre outros agentes cimentantes. O que pode alterar o valor desta coesão é o processo de intemperismo. A coesão aparente está relacionada com as tensões capilares, meniscos de água entre os poros, gerando uma poropressão negativa, que gera uma atração entre as partículas. A coesão aparente está presente nos solos não saturados, quando ocorre a saturação do solo, esta coesão se torna nula, permanecendo somente a coesão verdadeira, se houver.

Se o material não tem coesão verdadeira nem aparente, como é o caso de areias puras e saturadas, a Equação 2 se simplifica para a Equação 3:

$$t = \sigma * \tan \varphi \quad \text{Equação 3}$$

Feuherhamel (2007) relatam a alteração do ângulo de atrito interno com a mudança dos valores de sucção matricial, sendo que com o aumento da sucção tende a elevar os valores do ângulo de atrito interno.

Os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito interno, não são constantes no solo, e podem variar em largos intervalos para um mesmo solo, conforme as condições de drenagem e o teor de umidade.

O parâmetro de ângulo de atrito interno já foi considerado como constante, mas sabe-se que, no entanto, que ele não é constante, variando sim, com o nível de sucção, que está intimamente ligado à umidade do solo (Campos et al, 2015). O ângulo de atrito vai depender da granulometria do solo, sendo maior quanto mais granular for o solo, ele tende a diminuir quando aumenta a quantidade de finos (Pinto, 2006).

As tensões totais representam a soma das tensões efetivas e das pressões neutras em solos saturados. Algumas equações foram propostas para definir as tensões efetivas em solos não saturados, relacionando a resistência do solo com a tensão efetiva ( $\sigma - u_a$ ) e a variável ( $u_a - u_w$ ), como resultado da interação dessas tensões foi proposta a Equação 4.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)$$

**Equação 4**

Onde:

$\sigma'$  é a tensão efetiva

$\sigma$  é a tensão total

$u_a$  é a pressão do ar

$u_w$  é a pressão da água

$\chi$  é um parâmetro que depende da saturação do solo, sendo  $\chi = 1$  para solos saturados e  $\chi = 0$  para solos secos.

#### 4.4 - ÁGUA NO SOLO

A água é um condicionante e deflagrador dos processos de escorregamentos, sendo o principal agente desencadeador destes eventos no Brasil, por isso sua interação com o solo deve ser compreendida. A água influencia aspectos da formação e do comportamento do solo, desde a intemperização à decomposição de matéria orgânica, influenciando a formação da vegetação, nos processos erosivos e de instabilização.

O conhecimento das causas e dos agentes condicionantes dos escorregamentos é fundamental para a adoção de medidas preventivas voltadas a minimizar ou evitar consequências negativas resultantes desses fenômenos. É importante realçar que embora

existam diferentes agentes deflagradores de escorregamentos, as chuvas constituem o principal deles, principalmente as condições climáticas e geológico-geotécnicas do Brasil (Santos, 2007).

Para Libardi (2012), o solo para o estudo de retenção da água é considerado simplesmente como um material natural, sólido e gasoso. A parte sólida é constituída de partículas minerais e substâncias orgânicas de várias formas e tamanhos, conhecida como esqueleto, sólidos ou matriz do solo. A parte porosa é aquela não ocupada pela matriz, consiste de poros interconectados, conhecido como espaço poroso ou poros do solo e estes poros podem conter quantidades variadas de solução aquosa conhecida como água ou solução no solo, e gases denominados de ar no solo. A Figura 13 mostra a relação existente entre as diferentes fases do solo.

Para Bonder (2008) a água no solo pode ser classificada em três diferentes tipos: água gravitacional, água capilar e água adsorvida. A água gravitacional se encontra livre para se mover entre os poros por força da gravidade. A água capilar é aquela que permanece no solo por conta da força da interação água-partículas sólidas e seu movimento se dá por conta destas forças. A água adsorvida está aderida à superfície das partículas, esta água faz parte da fase sólida e não consegue ser separada por forças hidrodinâmicas.

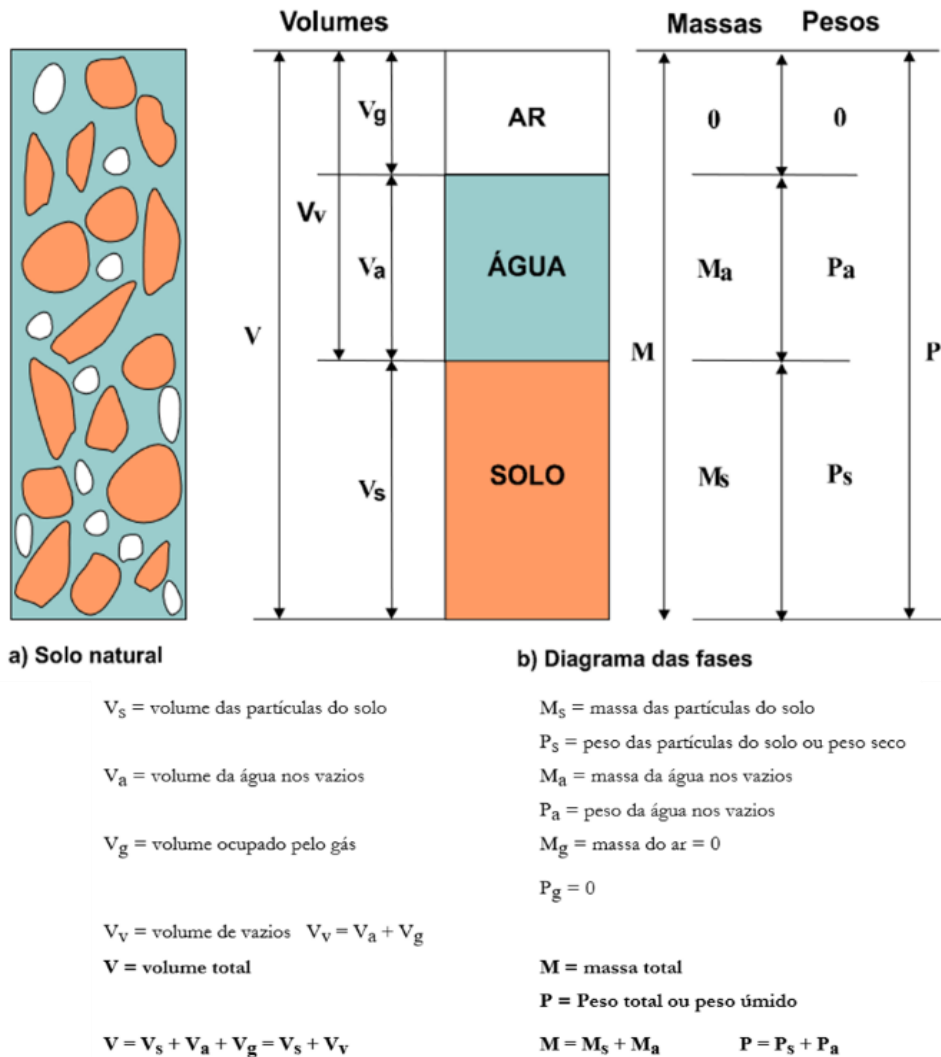


Figura 13 - Diagrama de fases do solo

Fonte: Alves de Lima

A partir do diagrama de fases do solo, é possível realizar cálculos como o índice de vazios, porosidade total, grau de saturação, peso específico do solo, peso específico dos sólidos e teor de umidade do solo. A partir destes dados são possíveis algumas inferências na dinâmica da interação água-solo, como, por exemplo, quando o solo atinge sua capacidade de campo inicia-se o escoamento superficial, podendo levar a erosão desta superfície.

O tipo de solo vai influenciar a dinâmica da água em seu interior, pois este define a área de contato entre as partículas sólidas e a água, assim como a variação do tamanho e forma dos poros. A estrutura também influencia nesta dinâmica pois mostra o arranjo

matricial das partículas do solo e a mineralogia, alguns argilominerais tem grande capacidade de retenção de água, como as vermiculitas (Silva, 2005).

As formações naturais de solo constituem-se de um conjunto de partículas sólidas, tocando-se entre si e deixando um espaço vazio entre elas - os poros do solo. Os vazios poderão estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água. Os poros não ocupados pelo líquido poderão conter ar ou outro gás. Assim, pode-se dizer que este constitui um sistema trifásico.

Para Libardi (1995), os solos com argilas expansivas, a textura, tamanho e disposição do espaço poroso, manejo do solo, estrutura mineralógica e umidade inicial do solo, são alguns dos fatores responsáveis pelas variações nos valores da taxa de infiltração da água na zona não saturada.

Para o melhor entendimento do comportamento hidráulico do solo não saturado, ou seja, o fluxo da água entre seus vazios, existem dois parâmetros que podem ser utilizados: a permeabilidade do material e a curva de retenção da água no solo (Vogt, 2012). As duas análises conseguem dar uma resposta importante para a dinâmica da água no solo.

#### 4.4.1 - HIDROLOGIA DE VERTENTE

O estudo da água na vertente leva em consideração o escoamento superficial e o subsuperficial. Para Fiori e Carmignani (2009), o primeiro pesquisador a propor um modelo de infiltração-escoamento foi Horton em 1933, que considerou a superfície do solo como um filtro capaz de separar a precipitação em dois diferentes componentes: um em que a parcela de água não infiltrada se desloca sobre a superfície do solo até alcançar o leito dos rios (escoamento superficial) e outra parcela de água que infiltra no solo e desloca-se por um fluxo subterrâneo para o rio (escoamento subsuperficial).

Intemperismo em encostas leva à transformação do material rochoso em solo e a constante alteração química e mecânica deste material. Muitos são os processos da encosta que transportam esse material do intemperismo, podendo ser lento ou rápido (Huggett, 2007).

Considera-se que o fluxo de água na vertente é direcionado paralelamente a declividade e a espessura do solo. A permeabilidade é uma propriedade do solo que determina a capacidade deste de conduzir a água para jusante através da encosta, por isso seu estudo se faz necessário para a compreensão desta dinâmica.

#### 4.4.2 - POTENCIAL DA ÁGUA NO SOLO

As duas principais formas de energia são: a cinética e a potencial. Em relação a água no solo, a energia cinética é desprezível, uma vez que ela está relacionada a velocidade do movimento, e a da água é muito lenta no meio poroso, já a energia potencial ou estado de energia da água no solo pode ser dividida em dois diferentes níveis. Quanto mais úmido o ambiente, maior será o potencial da água e terá uma maior liberdade de movimento, e quanto menos úmido o solo menor será o potencial da água nele sendo seu movimento mais difícil.

O potencial da água expressa o nível de energia da água de uma posição ou condição para outra (um solo saturado com água e outro não saturado) e determina a direção e velocidade do movimento desta água. Em solos saturados esta água se encontra nos poros maiores e a maioria das moléculas de água nesta condição não está muito próxima da superfície das partículas e por isso a força de atração pelos sólidos é mais fraca dando maior mobilidade para esta água. No entanto, em solos com menor umidade, ela se encontra em poros menores, tendo maior proximidade dos sólidos, estando mais fortemente retidas, tendo pouca liberdade de movimento Brady e Weil (2013).

Existem três diferentes forças que afetam a energia da água no solo: a) a osmótica que se refere a movimentação da água em relação a quantidade de solutos, íons dissolvidos que tem maior importância para os estudos agrários e de contaminação; b) a energia gravitacional que faz a água se movimentar pela força da gravidade (infiltração na vertical e em casos de encostas também na horizontal); c) a matricial, que se refere a atração entre a água e os sólidos do solo (matriz) podendo ser dividida em duas diferentes forças, a adsorvida que está ligada a superfície dos sólidos e a de capilaridade que é a água retida nos microporos (Libardi, 1995).

A movimentação da água no solo ocorre através dos poros e é resultado da diferença de potenciais de migração de líquidos. Este potencial é dado pelos desníveis altimétricos entre a zona de saturação e de exsudação, enquanto que o escoamento depende da condutividade hidráulica da camada de solo (porosidade) e da viscosidade da água Fiori e Carmignani (2009).

As propriedades hidráulicas do solo que determinam o comportamento do fluxo de água em seus vazios são a condutividade hidráulica e a curva de retenção da água no solo ou curva característica. A condutividade hidráulica do solo é uma medida de sua capacidade

de transportar água, e a curva de retenção é a representação da capacidade do solo de armazenar água (Calle, 2000).

#### 4.4.3 - PERMEABILIDADE

A permeabilidade dos solos se dá pelo movimento do fluxo subsuperficial da água, podendo ser na vertical, quando ela está se infiltrando e na horizontal, percolação horizontal, influenciada pelo ângulo de inclinação. Este movimento da água na subsuperfície do solo tem influência direta na estabilidade da encosta. A permeabilidade pode ser quantificada através do coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica do solo.

Em solos não saturados a condutividade hidráulica vai depender do índice de vazios e do teor de umidade, ou seja, da variação da área de passagem da água pelos poros sendo importante seu tamanho e forma e do quanto de água estes poros (macro e micro) já estão ocupados (Jesus, 2008; Fiori e Carmignni, 2009; Libardi, 2012).

A influência de outras propriedades no meio afeta o fluxo, como o diâmetro dos grãos, a distribuição da granulometria, a esfericidade e arredondamento dos grãos, a condutividade hidráulica de um solo não saturado aumenta com o aumento do teor de umidade (Freeze e Cherry, 2017).

A condutividade hidráulica ( $K$ ) pode ser saturada, quando os vazios do solo estão preenchidos com água sendo assim sua carga tem um valor constante, esta é chamada de  $K_{sat}$ . Ela também pode ser não saturada, quando os poros do solo estão parcialmente preenchidos com água, mas ainda tem capacidade de absorção da água ( $K_{nsat}$ ).

Condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) é o valor que expressa a menor ou maior facilidade com que um solo saturado pode transmitir água através do espaço poroso. É definido como o fator de proporcionalidade que relaciona o fluxo de água ao gradiente hidráulico na equação de Darcy (Equação 5), ela pode ser estimada a partir de outras propriedades como textura, estrutura, densidade aparente e outras (Schoeneberger, 2012).

$$Q = K_{sat} \cdot A \cdot (\Delta h) / L$$

**Equação 5**



Onde:

$Q$  - é a vazão ( $m^3/s$ )

$K_{sat}$  - é a condutividade hidráulica saturada (m/s)

$A$  - é a área ( $m^2$ )

$\Delta h$  - é a variação da carga hidráulica (da maior cota para a menor) (m)

$L$  - é a distância percorrida pela água (m)

A condutividade hidráulica saturada pode ser medida de várias formas, como em laboratório usando o permeâmetro de carga constante (ou variável) ou *in situ* como o permeâmetro de Guelph. Ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens como o ensaio no laboratório que é mais rápido e com maior controle, mas por conta do transporte e da moldagem com corpo de prova ele pode apresentar perturbações na estrutura do solo que vai influenciar na dinâmica da água. Já no método de campo se têm uma maior veracidade em relação a estrutura do solo, com a presença de bioturbações e sem alteração dos fatores físicos presentes, entretanto há uma dificuldade em relação ao tempo e a área que vai ser estudada, tendo que tomar cuidado na realização do ensaio pois pode-se causar colmatção do furo durante a instalação do aparelho, o que pode levar a uma diminuição do fluxo da água.

Em Gomes (2012) foi utilizado o permeâmetro de Gelp h com ensaio *in situ* para se obter a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) em cicatriz de escorregamento no município de Caraguatatuba (SP), constatando que a granulometria e a distribuição de microporos e macroporos estavam diretamente relacionados com os resultados encontrados para a  $K_{sat}$  nos três pontos amostrados, indicando também um comportamento de aumento da  $K_{sat}$  com o aumento da profundidade do perfil. Vieira e Fernandes (2004) também realizaram ensaios de permeabilidade saturada que indicaram descontinuidades no mesmo perfil de solo, podendo esta contribuir para o desenvolvimento de poro pressões positivas, que levam a instabilização.

Nogueira et al (2011) relatam a influência do volume, velocidade, direção, profundidade, propriedades do solo, litologia, vegetação, declividade e forma da vertente na variação do fluxo de água, mas chamam a atenção para questões referentes à percolação da água em subsuperfície, que ainda são de pouco conhecimento.

#### 4.4.4 - CURVA DE RETENÇÃO

A curva de retenção da água no solo é a relação entre a quantidade de água e a sucção do solo. A quantidade de água pode ser representada de diferentes formas, pode ser pela umidade gravimétrica ( $w$  %), umidade volumétrica ( $\theta$  %) e grau de saturação (SR%), e estas três formas estão relacionadas entre si (Bonder, 2008).

Para se determinar a sucção, é necessário entender a relação entre sucção e o conteúdo de água no solo. Esta relação é conhecida como curva de retenção de água no solo, ou curva característica, que pode ser obtida em laboratório, usando diferentes métodos. Esta relação influencia na poro-pressão da água no solo e, conseqüentemente, na estabilidade da vertente (Yeh e Lee, 2013).

A sucção pode ser medida em dois níveis distintos, a sucção mátrica ou matricial que envolve a medição da poro-pressão, e a sucção total, energia necessária para remover uma molécula de água no solo em forma de vapor, considerando além da sucção matricial, a sucção osmótica. Os principais fatores que influenciam as curvas de retenção são a distribuição granulométrica, a mineralogia, a estrutura do solo e a porosidade.

A retenção e a movimentação da água no solo através do potencial matricial, agem após a ação do potencial gravitacional, assim ocorre o fenômeno de sucção, quando se tem a água atraída pelas partículas sólidas da matriz do solo, esta atração influencia diretamente na retenção desta água (Pereira et al, 2016).

São duas as forças que estabelecem o potencial matricial da água (que interfere diretamente na retenção desta no solo) a primeira é a força de atração das moléculas de água entre si; e a segunda é a atração das moléculas de água com a superfície das partículas sólidas da matriz do solo (Brady e Weil, 2013).

A água intersticial, ou seja, a água nos poros, tem uma energia a qual está associada à sua capacidade de retenção, e para medir esta retenção tem-se a sucção nos meios porosos. A água livre ao entrar em contato com um meio poroso, é retida e absorvida por ele, até que todos os vazios sejam preenchidos (estado saturado). Para remover esta água retida nos poros é necessário aplicar uma energia, e quanto mais retida, maior será a energia para retirar esta água (Vilasboas, 2016).

As curvas de retenção a água no solo podem ser obtidas em duas trajetórias: a) uma com a drenagem deste solo, em que o corpo de prova está saturado e ao longo do

processo vai secando: e b) onde o corpo de prova foi seco, e ao longo do processo se adiciona água. As curvas obtidas por estas duas trajetórias são distintas, ou seja, não há superposição das curvas, este fenômeno é chamado de *histerese* do solo (Figura 14).

O fenômeno da *histerese* acontece devido aos processos de drenagem (secagem) e infiltração (umedecimento) do solo, podendo ser atribuída a não uniformidade dos poros, assim como as bolhas de ar aprisionadas pelos poros durante o processo de umedecimento, e a alteração na estrutura do solo, decorrente dos processos de contração ou expansão (Calle, 2000).

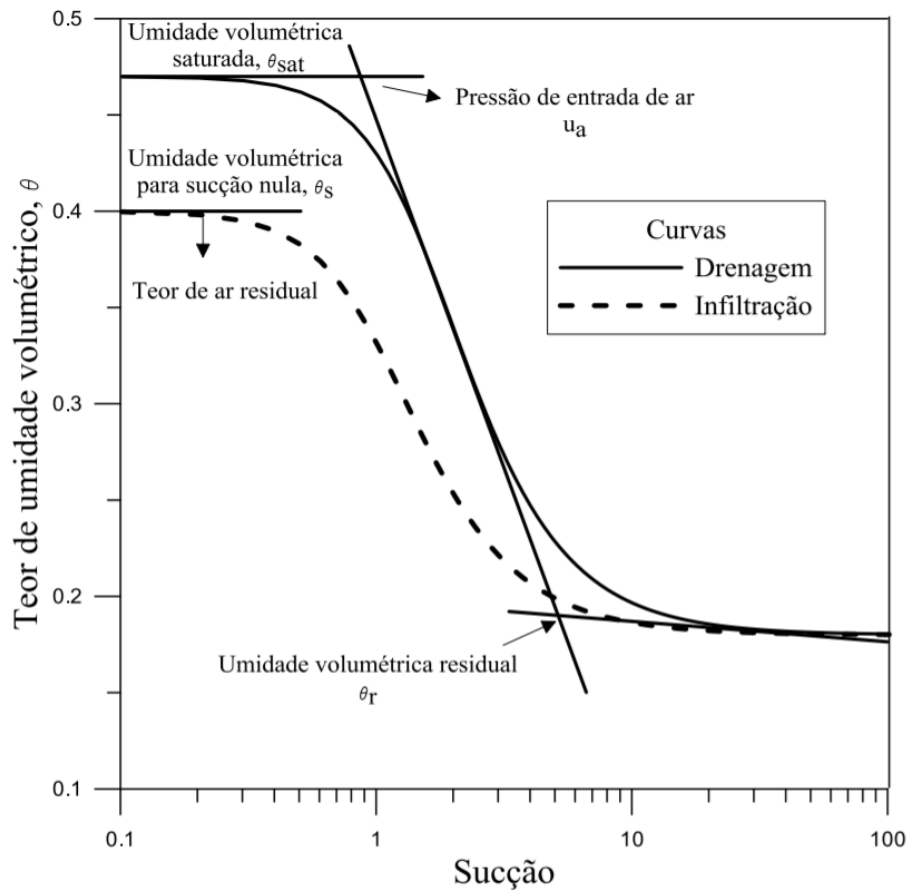


Figura 14 - Fenômeno da *histerese* nas curvas de retenção a água no solo, na drenagem e na infiltração da água

Fonte: Menezes (2013)

#### 4.4.4.1 - PAPEL FILTRO

Um dos métodos de se obter a curva de retenção é a do papel-filtro, que se baseia na capacidade que os poros têm de absorver, ou perder água (ou outro fluido), quando os papéis entram em contato direto, ou indireto com a amostra, em ambiente fechado, com a temperatura e pressão constantes, até atingirem o equilíbrio de energia entre eles (Vilasboas, 2016). Este método é bem simples, de baixo custo, mas com bons resultados.

O método do papel filtro é mais difundido na área da engenharia civil, pois ele alcança valores muito altos de sucção (podendo chegar a valores maiores que 10.000 kPa), enquanto o método tradicional de translação de eixos, por meio do uso das placas de Richards, só chega ao valor de 1500kPa, pois é o ponto de murcha da planta.

O método do papel filtro vem sendo gradualmente utilizado para medidas de sucção do solo. Este método é bem econômico e de fácil realização, ele só precisa de cuidado durante o manuseio das amostras para obter dados confiáveis. Ele pode ser usado para determinar tanto a sucção total (vapor) quanto a sucção matricial (equilíbrio no contato papel-solo) Bulut e Leong (2008).

A eficácia nos resultados depende muito do manuseio, o cuidado para não contaminar e deixar o papel filtro entrar em contato com o ambiente por muito tempo, para evitar absorção da umidade pelo ar, o que altera o resultado, assim como manter o sistema da amostra com o papel bem fechado (Vilasboas et al, 2016).

O princípio do método consiste na transferência da água do solo para um meio poroso (papel filtro) até que seja atingido um equilíbrio de potencial. Este equilíbrio acontece quando as sucções entre os materiais se igualam (Vivian, 2008).

Para determinar os teores de umidade de equilíbrio entre o papel filtro e os corpos de prova, utiliza-se cada umidade gravimétrica correspondente a uma sucção matricial estimada a partir do teor de umidade do papel filtro. Estes valores de sucção e de teor de umidade, correspondem a um ponto na curva de retenção à água (Bonder, 2008).

A curva com o papel filtro deve ser cuidadosamente realizada para não haver contaminação nem perda de umidade para o ambiente, mantendo o sistema fechado entre o papel filtro e a amostra de solo dentro de caixas devidamente lacradas, com as amostras envoltas em plástico (Sun, 2016). O sucesso deste procedimento é executá-lo com muita atenção.

#### 4.5 - INTEMPERISMO DOS SOLOS

A formação dos solos se inicia com o intemperismo das rochas através de processos físicos e químicos. A esta decomposição vão se juntar material biológico de plantas e animais.

Para Rodrigues (2014), a distribuição e o comportamento dos elementos químicos, que atuam no intemperismo, dependem de fatores como as condições físico-químicas do ambiente e a estabilidade do mineral primário que contém esses elementos.

Quando os processos intempéricos atacam a rocha, ocorre a modificação dos minerais primários em secundários ou de alteração, constituindo assim os argilominerais, hidróxidos de ferro, sais e sulfatos entre outros. Este grau de intemperismo químico guarda uma relação com a composição mineralógica da rocha, a existência de descontinuidades físicas e a exposição aos condicionantes climáticos e geomorfológicos (Machado, 2013).

As descontinuidades nos solos (que podem ser falhas, fraturas, bandamentos e horizontes de solos com diferentes características), podem condicionar os processos de cisalhamento. A mineralogia dos horizontes também pode criar uma descontinuidade, alterando o comportamento em relação a quantidade de água.

O processo de intemperismo altera e fragmenta rochas e minerais, destruindo suas características físicas e químicas, além de transportar de um local para outro seus fragmentos menores e produtos solúveis (Brady e Weil, 2013).

No Brasil, um dos processos de intemperismo mais atuante é o de hidrólise, em que a água é incorporada à estrutura cristalina do mineral, e atua na decomposição de constituintes das rochas em outras substâncias. Os feldspatos são relativamente pouco estáveis e sofrem com facilidade a ação da hidrólise.

Os solos se comportam de forma diferente, dependendo da predominância do mineral de argila silicatada. Estas argilas são conhecidas como filosilicatos, por causa da forma como se apresentam (folhas ou lâminas). São compostos por lâminas de tetraedro e octaedro, e as combinações destas lâminas variam de um tipo de argila para outra, controlando muito suas propriedades físicas e químicas (Brady e Weil, 2013).

A mineralogia do solo é essencial ao estudo da ciência do solo, sendo uma ótima ferramenta para avaliação e conhecimento da gênese do solo, da capacidade do potencial mineral disponível para as plantas e do seu comportamento físico e químico (Sampaio, 2006).

Das argilas silicatadas pode-se ter o tipo 1:1 como a caulinita que consiste em uma lâmina tetraédrica de silício e uma lâmina octaédrica de alumínio. As argilas do tipo 2:1 como a montmorilonita são caracterizadas por uma lâmina octaédrica no meio de duas lâminas tetraédricas. Estas últimas conhecidas como expansíveis, por causa de sua característica de absorção de água, alterando o volume do solo (Brady e Weil, 2013).

As características dos argilominerais presentes na fração granulométrica argila (fina) dos solos tem influência sobre seu comportamento, como a expansividade, absorção de água e consistência (Machado, 2013).

Áreas com presença de discontinuidades no perfil de solo são geralmente as que apresentam heterogeneidade como as variações nas características físico-mecânicas e hidráulicas. Duzgoren-Aydin e Aydin (2006) associam estas variações a processos de intemperismo diferencial e/ou a mobilização de elementos e argilominerais, e esses processos estão ligados à transformação de minerais primários em secundários.

Hasegawa et al (2009) identificam como as principais causas dos movimentos de massa gravitacionais em estradas do Nepal, a alteração hidrotérmica e a mineralização de argilas em zonas de cisalhamento. Mostrando a importância do processo intempérico para o desenvolvimento, e possível desencadeamento destes movimentos.

A concentração de minerais da fração argila em certas áreas indicam a formação de uma possível zona de cisalhamento a qual pode ser formada por lixiviação, deposição ou transporte lateral de solutos e colóides de Al-Si pelos poros ou fraturas do material em alteração (Wen et al, 2004).

Regmi et al (2013) em seu estudo sobre a relação da geologia e do intemperismo na instabilidade de taludes, observaram que grandes escorregamentos estão relacionados ao intemperismo de rochas profundas e pela influência de estruturas geológicas, como falhas e fraturas. Além disso, os movimentos do tipo rotativo estavam ligados a rochas altamente intemperizadas, em que a inclinação do plano de foliação e o intemperismo desempenha um papel importantíssimo.

Alguns solos podem conter uma proporção significativa de argilominerais com características muito específicas, como as montmorilonitas, estes apresentam um comportamento muito distinto na presença ou ausência da água. Estas argilas se expandem quando a água entra na estrutura do mineral, aumentando o volume da argila como mostra a Figura 15 a seguir.

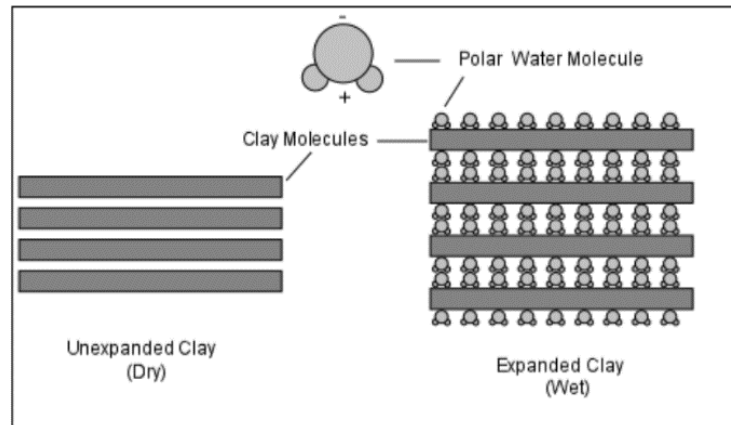


Figura 15 - Argilomineral do tipo expansivo quando hidratado

Fonte: site: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/massmovements.htm>

As argilas do tipo vermiculita e montmorilonita têm uma capacidade incomparável de expansão quando umedecidas, isto por causa de suas capacidades de incorporar grande quantidade de água interlamelar (Klein e Dutrow, 2012).

Para entender melhor a superfície de ruptura, é preciso definir a natureza do material, pois assim se compreende melhor o mecanismo do escorregamento, e é possível adotar medidas eficazes de prevenção (Erginal et al, 2009).

Para conhecer a natureza do material estudado pode-se realizar alguns ensaios de laboratório, como o ensaio de DRX, que permite o conhecimento mineralógico, e este conhecimento permite entender a evolução dos processos intempéricos que resultaram nos mantos de solos constituintes da paisagem. Já o ensaio de fluorescência de raio X (FRX) é uma técnica que permite identificar os elementos químicos e estabelecer a proporção (concentração) que cada elemento tem em uma amostra.

A Espectrometria de Fluorescência de Raio X (FRX) se baseia na excitação da amostra por um feixe primário proveniente de um tubo de raios X. De acordo com sua energia este feixe pode remover elétrons das camadas mais internas, sendo as vacâncias imediatamente preenchidas por elétrons das camadas externas. Nesta reorganização orbital são emitidos feixes secundários de raio X. No espectrômetro a radiação fluorescente é identificada em função de sua energia e sua intensidade é proporcional a concentração do elemento na amostra, e a quantificação acontece após a calibração do aparelho (Zambello, 2001).

## 5 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor visualizar a metodologia com todos os ensaios realizados para esta pesquisa foi montado um fluxograma que pode ser visualizado na Figura 16.

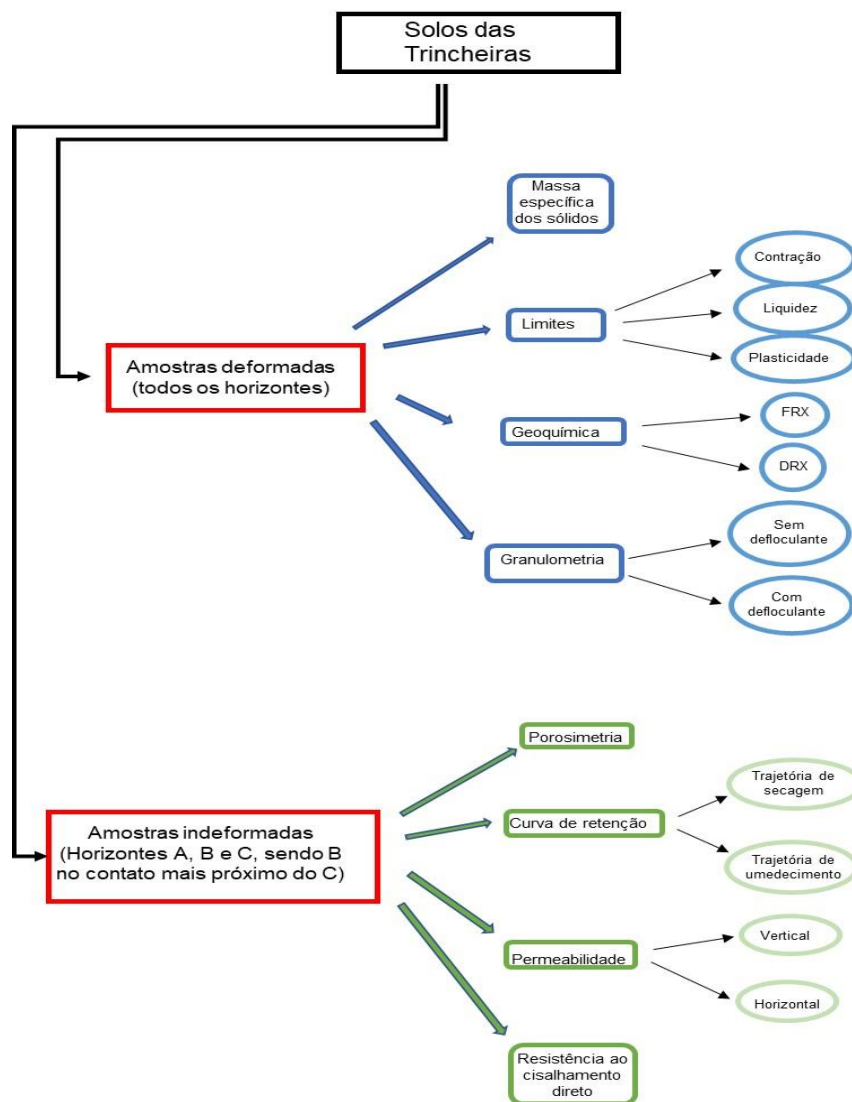


Figura 16 - Fluxograma da metodologia utilizada

### 5.1 - PROCEDIMENTOS DE CAMPO

O procedimento de abertura, descrição e análise das trincheiras foi realizado por Gobbi (2017) seguindo a orientação de Lemos e Santos (1996). A análise de cor foi realizada utilizando a Carta Munsell (MUNSELL SOIL COLOR CHARTS, 2000), com cuidado para



verificação por conta da luminosidade. As análises do perfil que permitiram diferenciar os horizontes, a textura e estrutura dos solos também seguiram as recomendações de Lemos e Santos (1996).

Foram coletadas amostras deformadas de solo de cada horizonte das 4 trincheiras com o cuidado para não misturar um material de um horizonte com outro. Elas foram acondicionadas em sacos plásticos resistentes e fechadas imediatamente com fita crepe para evitar ao máximo, a perda, ou ganho de umidade com a atmosfera, e foram transportadas em mochilas. Neste caso não se preserva a estrutura do solo “*in situ*”. As amostras deformadas foram coletadas em todos os horizontes identificados.

As amostras indeformadas de solo foram coletadas no sentido vertical, e para isto foi necessário raspar o horizonte imediatamente superior a cada nova coleta. Foram coletadas amostras indeformadas por meio de cravação de anéis metálicos e de tubos de PVC (Figura 17). Esta metodologia foi adotada por conta da dificuldade de acesso ao local das trincheiras. Todas as amostras foram envolvidas em filmes plástico e fita, com a identificação da parte superior do perfil, sendo acondicionadas em caixas plásticas para retirada do local até o veículo, evitando ao máximo alterar as características naturais do solo, como a estrutura. Os anéis foram coletados nos horizontes “A”, “B” e “C”, sendo considerado o horizonte “B” mais profundo (próximo ao “C”) e o horizonte “C” mais superficial (mais próximo ao “B”). Os tubos de PVC foram coletados somente nos horizontes “B” e “C”.



Figura 17 - Foto das amostras indeformadas, sendo retiradas no campo para os ensaios de permeabilidade e resistência ao cisalhamento

Em campo também foram descritas as características da área, como a espacialização da vegetação, a declividade nos pontos de abertura das trincheiras e se apresenta canais de drenagem ou caminhos preferenciais de águas pluviais (escoamento superficial).

## 5.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A partir das amostras retiradas em campo, tanto as deformadas quanto as indeformadas, ensaios de laboratório foram realizados, afim de se ter um conhecimento das características físicas, químicas e geotécnicas, além da compreensão da dinâmica da água e resistência do solo (Silva, 2005; Costa, 2008).

### 5.2.1 - AMOSTRAS DEFORMADAS

Os ensaios de massa específica dos sólidos, granulometria, limites de Atterberg e teor de umidade, foram realizados no laboratório de Mecânica dos solos, Topografia e Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp.

Os ensaios de Difração de Raio-X das trincheiras TR1, TR3 e TR9 foram realizados no laboratório de Difração de Raios X, do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade

Estadual Paulista (UNESP), e no Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais (LPCM) do Instituto de Física “Gleb Wataghin”. Os ensaios de Fluorescência de Raio-X das trincheiras TR1, TR3 e TR9 foram realizados no laboratório Fluorescência de Raios X, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Os ensaios da TR7 foram realizados na UNICAMP, no laboratório de Geoquímica Analítica do Instituto de Geociências.

### 5.2.1.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

#### 5.2.1.1.1 - MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

O ensaio de massa específica dos sólidos foi realizado segundo a ABNT NBR 6458/2016, este resultado é importante e vai auxiliar em outros ensaios e nos cálculos da caracterização dos índices físicos a partir dos anéis volumétricos.

#### 5.2.1.1.2 - GRANULOMETRIA

Para realizar os ensaios de caracterização, primeiro o solo foi seco ao ar e destorroado conforme a norma ABNT NBR 6457/2016a. O método utilizado para este ensaio foi o de granulometria conjunta (ABNT NBR 7181/2016), que compreende tanto o peneiramento quanto a sedimentação. Nogueira (1995), explica que para as partículas maiores que 0,075mm, a separação dos grãos dos solos será feita por peneiramento, enquanto que para as partículas menores que 0,075mm, deverá ser usado o processo de sedimentação em água destilada. Os ensaios foram realizados com o defloculante (Hexametáfosfato de sódio), que é um dispersante das partículas do solo, e sem o defloculante, para verificar a presença de microagregação dos grãos do solo. Nos ensaios de sedimentação as amostras sem defloculante podem decantar bem antes, como mostra a Figura 18.

A partir dos resultados foram traçadas as curvas granulométricas, em gráficos semi-logarítmicos, onde o eixo das ordenadas é representado por porcentagem e nas abscissas o diâmetro dos grãos (mm). Os gráficos foram feitos para todos os horizontes.



Figura 18 - Foto do processo de sedimentação para o horizonte B2 da trincheira TR1

Com o resultado das análises granulométricas, foi possível a realização da classificação textural, que foi realizada usando o triângulo textural (Figura 19) utilizado em pedologia, adotando-se a classe de textura do Sistema Americano de acordo com o Soil Survey Manual (Estados Unidos, 1959, 1993) em Santos (2005). Foi realizada para os ensaios com e sem o uso do defloculante, para mostrar que a classificação pode mudar devido a microagregação das frações mais finas do solo (principalmente argila).

Esta classificação das classes texturais de solos é usada em muitos trabalhos, como em Braga (2015) que no seu trabalho sobre a análise de uma encosta e os processos erosivos, que também utiliza o triângulo textural para classificar os solos encontrados na sua área de trabalho.

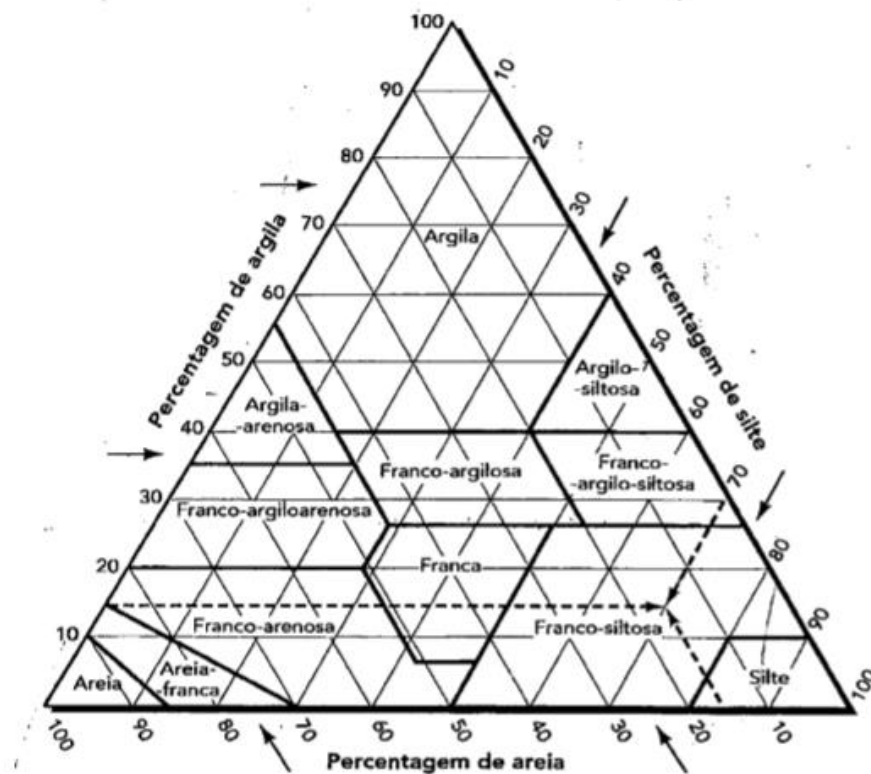


Figura 19 - Triângulo textural para classificação de solos

Fonte: Brady e Weil (2013)

### 5.2.1.2 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Existem ensaios para verificar o comportamento do solo, de um estágio de umidade até o de saturação, estes ensaios são: o limite de contração, o limite de plasticidade e o limite de liquidez, ou seja, os Limites de Atterberg (Vargas, 1977). Foram realizadas análises de limite de plasticidade segundo a norma ABNT NBR (7180/2016), limite de liquidez segundo norma ABNT NBR (6459/2016) e limite de contração ABNT NBR (7183/1982).

#### LIMITE DE PLASTICIDADE (LP)

De acordo com a norma citada, foi realizada a partir de água acrescentada a um pouco de solo peneirado em peneira nº40 (0,42mm) e misturado até atingir uma mistura homogênea e um pouco quebradiça. Esta mistura deve formar um cilindro com espessura de 3mm e comprimento de 6 cm que apresente ranhuras.

### LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)

Foi realizado como descrito na norma citada acima. Acrescenta-se água na mistura de solo após o ensaio do limite de plasticidade e inicia-se o teste no aparelho de Casagrande. Representa o teor de umidade em porcentagem contida no solo em que esse começa a se comportar como um líquido viscoso

### LIMITE DE CONTRAÇÃO (LC)

Conforme a norma já citada, este ensaio é realizado utilizando o solo com a última umidade após o ensaio do limite de liquidez, este solo é colocado em um anel de fundo fechado e batido sobre a mesa até que saiam as bolhas de ar, depois é deixado secando ao ar e depois colocado em estufa para secar totalmente e contrair tudo. Depois de seca, a amostra de solo é colocada em mercúrio.

### ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)

O IP é expresso em porcentagem e expressa a quantidade máxima de água que pode ser adicionada, a partir do LP, sem que o solo altere o seu estado de consistência plástica (Equação 6).

O índice de plasticidade é definido pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Este representa o conteúdo de umidade do solo quando este se encontra no estado plástico (Vargas, 1977).

$$IP = LL - LP$$

**Equação 6**

### ATIVIDADE DA ARGILA

A atividade da argila é uma característica dos finos argilosos constituintes do solo, mesmo se um determinado solo tiver pouca quantidade de argila, ele pode apresentar altos limites de consistência (LL e LP), isto indica que a argila é bem ativa. Para este cálculo divide-se o Índice de Plasticidade pela porcentagem da fração argila, como mostra a Equação 7.

$$IA = IP / \% \text{ Argila}$$

**Equação 7**

### 5.2.1.3 - ANÁLISES DE DRX E FRX

Para análise da mineralogia existe um método conhecido como Difração de Raio X (DRX), este método consiste na produção dos raios X em tubos de raios catódicos e são direcionados a amostra e os raios difratados são coletados, esta radiação difratada é processada e os fótons são contados. Fazendo uma varredura angular do detector em  $2\theta$ , todas as possíveis interferências construtivas são detectadas por causa da orientação aleatória do material pulverizado. A conversão dos picos de difração para espaçamentos dos planos interatômicos permite identificar o mineral (Marcon, 2010).

Os ensaios de DRX para as trincheiras TR1, TR3 e TR9 foi realizado no Laboratório de Difração de Raios X, do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Unesp e a TR7 no Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais (LPCM) do Instituto de Física “Gleb Wataghin”. Ambos laboratórios usaram o aparelho da marca PANalytical Empyrean, e realizaram os ensaios com as amostras glicoladas e aquecidas.

Assim como os ensaios de DRX, os ensaios de Fluorescência de Raio-X (FRX) das trincheiras TR1, TR3 e TR9 foram realizados no Laboratório Fluorescência de Raios X, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Unesp, e o ensaio da TR7 foi realizado na UNICAMP, no Laboratório de Geoquímica Analítica do Instituto de Geociências.

### 5.2.2 - AMOSTRAS INDEFORMADAS

As amostras indeformadas foram retiradas diretamente em anéis metálicos para realização do ensaio de curva de retenção da água no solo, neste caso foram retiradas amostras dos horizontes “A”, “B” e “C” conforme princípios descritos acima.

Para os ensaios de permeabilidade, resistência ao cisalhamento direto e porosimetria as amostras foram retiradas somente dos horizontes “B” e “C”, pois representam as partes do perfil onde partiu-se da hipótese (baseada em dezenas de observações em campo) de que há uma descontinuidade significativa entre eles, que poderia levar ao rompimento por interagirem com a água de formas diferentes.

### 5.2.2.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os índices físicos, como o teor de umidade (Eq.11), a massa específica natural (Eq.12), a massa específica seca (Eq.13), a porosidade (Eq.14), o grau de saturação (Eq.15) e índice de vazios (Eq.16), foram calculados a partir dos anéis volumétricos, sendo realizada a média dos 3 anéis, eventualmente algum anel pode ter sido descartado por apresentar valores muito desiguais em relação aos outros.

$$w = (M_w/M) * 100 \quad \text{Equação 11}$$

$$\gamma_{nat} = M / V_t \quad \text{Equação 12}$$

$$\gamma_d = M_s / V_t \quad \text{Equação 13}$$

$$n = (V_v / V_t) * 100 \quad \text{Equação 14}$$

$$S_r = (w * \gamma_s) / e \quad \text{Equação 15}$$

$$e = V_v / V_s \quad \text{Equação 16}$$

onde:  $V_s = M_s / \gamma_s$

$$e = V_v = V_t - V_s$$

w – teor de umidade;  $M_w$  – massa de água; M – massa natural total do solo;  $M_s$  massa seca do solo;  $V_t$  – volume total do anel;  $V_v$  – volume de vazios;  $V_s$  – volume dos sólidos;  $\gamma_{nat}$  – massa específica natural;  $\gamma_d$  – massa específica seca;  $\gamma_s$  – massa específica dos sólidos; n – porosidade; SR – grau de saturação; e – índice de vazios.

### 5.2.2.2 - POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

A distribuição da porosidade do solo foi definida usando o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Neste ensaio foram usadas amostras indeformadas dos horizontes “B” e “C”, que foram retiradas nos tubos de PVC. No horizonte “A” teve a dificuldade de moldar amostras indeformadas, mesmo que o corpo de prova para este ensaio seja muito pequeno, as amostras destes horizontes não puderam ser transportadas por conta da instabilidade causada pela matéria orgânica.



A porosidade é uma característica muito importante para estudo dos solos, e ajudou na interpretação de todos os outros ensaios realizados neste trabalho.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado no Instituto de Física da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), para todas as trincheiras nos horizontes “B” e “C”. O equipamento utilizado foi o Micromeritics Pore Sizer 9320 porosímetro.

#### 5.2.2.3 - CURVA DE RETENÇÃO À ÁGUA DO SOLO

Para realização do ensaio de curva de retenção foram retiradas amostras do horizonte superficial (“A”) do horizonte intermediário (“B” mais próximo do horizonte “C”) e do horizonte mais próximo a rocha (“C”, mais próximo do “B”). Essa escolha para a retirada das amostras seguiu este procedimento por seguir a hipótese de que o rompimento muitas vezes se dá entre esses dois horizontes do solo.

O método utilizado foi o do papel filtro que consiste em colocar o papel filtro de características de retenção conhecidas (calibração realizada pelas Equações de Chandler 17 e 18) junto as amostras de solo hermeticamente fechadas. O contato do papel com o solo faz com que haja migração da umidade do solo para o papel até se estabelecer o equilíbrio de potencial entre os dois, obtendo-se a sucção matricial, como também foi realizado por Bonder (2008).

Foram necessários todos os cuidados para evitar que as amostras trocassem umidade com o ambiente, por isso elas foram muito bem acomodadas e preparadas como mostram, respectivamente, as Figuras 20 e 21. As curvas seguiram o procedimento segundo a norma americana ASTM D 5298-03 esperando sempre 7 dias para obter o equilíbrio de potencial entre o papel e o solo.

Para calcular a sucção foi utilizado o papel Watmam nº 42 para realização do ensaio, e uma balança de precisão para verificar os pesos, dos papéis e das amostras a cada início e término do procedimento.



Figura 20 - Acomodação das amostras no ensaio de curva de retenção a água com o método do papel filtro



Figura 21 - Anéis volumétricos usados para o ensaio da curva de retenção tendo uma geomembrana na base para apoiar as amostras

Foram retirados 6 anéis de cada horizonte para definir uma amostragem mínima de três amostras para a curva na trajetória de umedecimento e três para a curva na trajetória de secagem, para poder verificar a *histerese* do solo, totalizando 72 anéis.

O ensaio para alguns corpos de prova foi realizado com a retirada e o acréscimo de 2g, como o habitual. Mas as primeiras curvas ficaram com poucos pontos, dificultando uma modelagem mais precisa, por isso optou-se por realizar o procedimento das curvas (secagem e umedecimento) com variação de 1g, dando assim maior número de pontos na curva.

Para o cálculo da sucção foram utilizadas as equações de Chandler (Equação 17 e 18) para o papel Watmam nº 42, a primeira equação utilizada quando a umidade do papel for menor que 47% e a segunda quando a umidade do papel for maior ou igual a 47%.

$$S = 10^{(4,84 - (0,0622 * (wp < 47\%)))}$$

**Equação 17**

$$S = 10^{(6,05 - (2,48 * \log(wp > 47\%)))}$$

**Equação 18**

Onde:

wp = teor de umidade gravimétrica do papel filtro

S = Sucção

As curvas são apresentadas em pontos no gráfico de potencial matricial (em escala logarítmica) e a umidade do solo. Para melhor visualização da curva é realizada a modelagem matemática das curvas. Neste trabalho optou-se por utilizar a equação de Van Guenuchten (1980), Equação 19.

$$w = W_{res} + (W_{sat} - W_{res}) / [1 + (\alpha * \psi)^n]^m$$

**Equação 19**

Onde:

$W_{res}$  = Umidade gravimétrica residual (%)

$W_{sat}$  = Umidade gravimétrica de saturação (%)

$\Psi$  = Sucção (kPa)

$\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ),  $m$  e  $n$  são parâmetros independentes que devem ser estimados, ajustando os dados a partir da curva de retenção.

Para os cálculos e modelagem utilizou-se o programa Excel, assim como para organização dos dados. Os valores do teor de umidade saturada ( $w_{\text{sat}}$ ) e residual ( $w_{\text{res}}$ ) foram retirados das curvas e os demais parâmetros foram obtidos por tentativas.

A Equação 10 foi utilizada de maneira uniforme para as curvas unimodais (todos os horizontes A) e nas curvas bimodais (com diferentes entradas, ou saídas de ar, devido a distribuição dos poros) a mesma equação foi aplicada separadamente, em relação a macroporosidade, e em relação à microporosidade. Assim os valores dos parâmetros e do teor de umidade serão diferentes para cada trecho da curva.

#### 5.2.2.4 - PERMEABILIDADE

Para o ensaio de condutividade hidráulica saturada foi utilizado o permeômetro de parede rígida a carga variável, segundo a ABNT NBR14545/2000, gerando fluxo laminar. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos solos, Topografia e Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp.

Foram moldados corpos de prova, oriundos de amostras indeformadas retiradas nos tubos de PVC, nas direções, vertical e horizontal para os horizontes “B” e “C” de cada trincheira. O esquema de montagem do permeômetro pode ser observado na Figura 22.

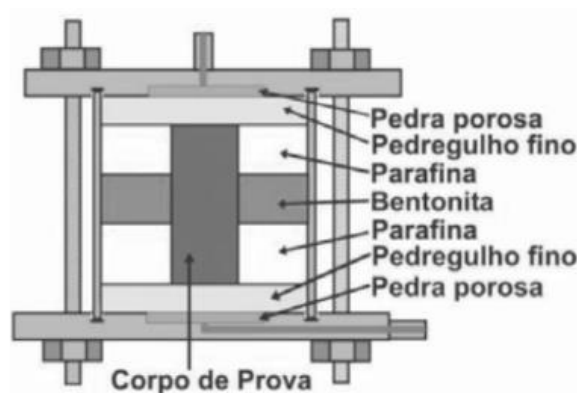


Figura 22 - Esquema de montagem do Permeômetro de Parede Rígida

Os corpos de prova retirados do permeâmetro após o ensaio (permeabilidade) podem ser observados na Figura 23. Os maiores correspondem ao ensaio vertical e os menores correspondem ao ensaio na horizontal.



Figura 23 - Foto dos corpos de prova moldados na vertical e horizontal após o ensaio de permeabilidade

#### 5.2.2.5 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de resistência ao cisalhamento direto foi realizado no Laboratório de Mecânica dos solos, Topografia e Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp.

Foram moldados anéis (dimensões) cravados em amostras indeformadas nos tubos de PVC, e depois definidas três diferentes umidades conforme valores apresentados nas curvas de retenção à água no sentido da secagem, sendo um referente à saturação, outro no ponto referente a entrada de ar nos macroporos e outro no trecho referente aos microporos, como mostra a Figura 24.

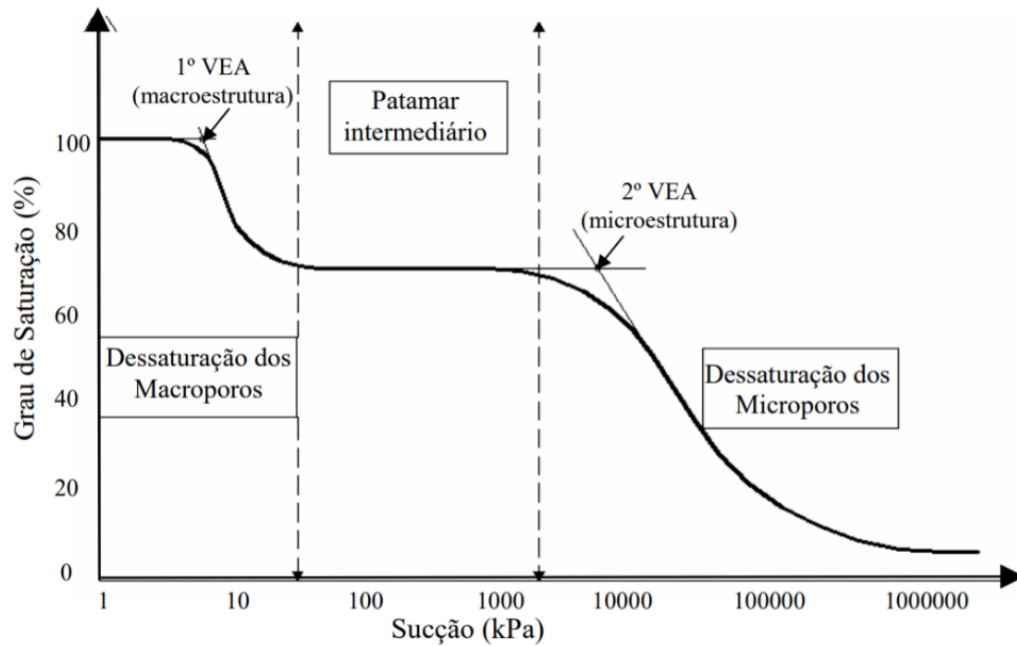


Figura 24 - Exemplo de curva de retenção a água, bimodal

Fonte: Feuerharmel (2007) VEA – vazão de entrada de ar

Estes comportamentos estão ligados à porosidade presente nos solos dos corpos de prova, sendo a primeira parte da curva representada pela macroporosidade e a segunda parte pela microporosidade.

Para o ensaio utilizaram-se três diferentes valores de tensão normal, sendo o primeiro com 50kPa, o segundo com 100kPa e o terceiro com 200kPa, o ensaio foi do tipo rápido (sem adensamento e sem drenagem) com aplicação de força cisalhante na direção horizontal que atua crescentemente até a ruptura do material.

Os ensaios foram do tipo rápido e não drenados, porque era importante definir os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito interno) para as umidades definidas previamente pelas curvas de retenção à água. Todos foram realizados em amostras indeformadas para observar como é o comportamento do solo no campo, preservando ao máximo sua estrutura, com a porosidade intacta.

As envoltórias de resistência da maioria dos solos podem ser expressas de forma simplificada e aproximada através da equação de Mohr -Coulomb (Equação 2).

## 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados para todos os ensaios físicos, hidrológicos e geotécnicos já descritos na metodologia.

### 6.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DEFORMADAS DE SOLOS

#### 6.1.1 - GEOQUÍMICA DOS SOLOS

##### 6.1.1.1 - FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Os resultados da Fluorescência de Raios X (FRX) podem ser observados nas Tabelas 3 a 6 onde foram realizadas análises para todos os horizontes das 4 trincheiras (TR1, TR3, TR7 e TR9), com amostras fundidas em matriz de borato.

A química e a mineralogia dos solos podem produzir indicadores de planos diferenciais entre os horizontes de um perfil de solo, apontando para uma possível zona de descontinuidade que pode levar à ruptura do material.

Tabela 3 - Resultados de FRX para a TR1

Amostra	TR1-A	TR1-B1	TR1-B2	TR1-B3	TR1-B/C	TR1-C
(g/100 g)						
SiO <sub>2</sub>	<b>37,88</b>	<b>39,51</b>	<b>34,79</b>	<b>34,25</b>	<b>33,50</b>	<b>26,62</b>
TiO <sub>2</sub>	2,05	2,47	2,12	2,24	2,44	2,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>24,05</b>	<b>27,70</b>	<b>31,51</b>	<b>32,10</b>	<b>30,70</b>	<b>35,79</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	<b>9,22</b>	<b>10,69</b>	<b>13,33</b>	<b>13,11</b>	<b>13,48</b>	<b>14,80</b>
MnO	0,06	0,03	0,03	0,03	0,05	0,07
MgO	0,97	0,98	0,63	0,79	2,12	0,93
CaO	1,13	0,18	0,08	0,06	0,14	0,07
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,06	0,01	0,01	0,03	0,00
K <sub>2</sub> O	1,66	1,64	0,97	0,97	1,56	0,84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,54	0,37	0,39	0,45	0,68	0,54
LOI	22,32	16,38	16,14	16,04	15,38	17,65
Total	100,01	100,01	100	100,05	100,07	100,07

Na Tabela 3 pode-se observar uma porcentagem maior de 3 elementos,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sendo que o  $\text{SiO}_2$  diminui com a profundidade e os outros dois aumentam com a profundidade. Os outros elementos estão em menor porcentagem, sendo o que têm menor concentração é o  $\text{Na}_2\text{O}$  (tendo seu maior valor no horizonte “A”, com 0,12 e o menor valor no horizonte “C” com 0).

Outros elementos alcalinos ( $\text{CaO}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) também apresentam maior porcentagem no horizonte “A”, embora tenham um comportamento mais solúvel, este horizonte tem grande presença de matéria orgânica (Anexo I), o que explica estes valores.

A porcentagem de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em detrimento de outros elementos é característica típica de solos em condições tropicais úmidas indicando, de maneira geral, o intenso intemperismo presente nestes materiais (Lima Junior, et al., 2011). Era de se esperar que a concentração de  $\text{SiO}_2$  aumentasse com a profundidade, uma vez que o processo de hidrólise quebra a ligação da Si com o alumínio transformando argilominerais 2:1 em 1:1.

Tabela 4 - Resultados de FRX para a TR3

Amostra	TR3-A	TR3-A/B	TR3-B1	TR3-B2	TR3-C
(g/100 g)					
$\text{SiO}_2$	<b>39,91</b>	<b>39,95</b>	<b>35,69</b>	<b>32,89</b>	<b>29,90</b>
$\text{TiO}_2$	2,37	2,56	2,33	2,95	3,06
$\text{Al}_2\text{O}_3$	<b>24,53</b>	<b>26,97</b>	<b>30,78</b>	<b>33,46</b>	<b>32,03</b>
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t})$	<b>10,0</b>	<b>10,86</b>	<b>13,77</b>	<b>15,95</b>	<b>15,86</b>
$\text{MnO}$	0,04	0,03	0,03	0,06	0,06
$\text{MgO}$	0,98	1,01	0,83	2,53	2,19
$\text{CaO}$	0,31	0,24	0,1	0,24	0,14
$\text{Na}_2\text{O}$	0,19	0,15	0,03	0,05	0,03
$\text{K}_2\text{O}$	1,81	1,73	1,15	1,52	1,37
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,39	0,35	0,43	0,59	0,52
LOI	19,51	16,17	14,87	9,80	14,89
Total	100,05	100,02	100	100,03	100,05

Esta trincheira segue um padrão parecido de alta porcentagem para os elementos citados ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), assim como a concentração de  $\text{SiO}_2$ , diminuindo



verticalmente no perfil, enquanto os outros dois, vão aumentando. O elemento de menor concentração nesta trincheira é o MnO. Assim como na TR1 os elementos alcalinos (CaO, Na<sub>2</sub> O e K<sub>2</sub> O) tem uma maior concentração no horizonte “A”, decorrente da concentração de vegetais na superfície.

Os valores de Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub> não são muito diferentes da TR1, mas o SiO<sub>2</sub> , aparece com uma proporção um pouco maior, esta concentração pode ser devido à localização estar no contato com o granito como foi mostrado por Gobbi (2017).

Tabela 5 - Resultados de FRX para a TR7

Amostra	TR7-A	TR7-B1	TR7-B2	TR7-C1	TR7-C2
(g/100 g)					
SiO <sub>2</sub>	<b>51,65</b>	<b>50,37</b>	<b>50,51</b>	<b>54,59</b>	<b>55,35</b>
TiO <sub>2</sub>	1,104	1,269	1,252	1,002	0,964
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>19,75</b>	<b>22,61</b>	<b>22,36</b>	<b>19,31</b>	<b>18,39</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	<b>7,74</b>	<b>9,94</b>	<b>9,84</b>	<b>7,97</b>	<b>7,66</b>
MnO	0,110	0,163	0,108	0,116	0,115
MgO	1,75	2,59	2,53	3,08	3,30
CaO	0,60	0,29	0,44	2,70	3,56
Na <sub>2</sub> O	0,48	0,45	0,60	2,81	3,30
K <sub>2</sub> O	3,29	2,98	3,20	3,13	3,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,254	0,195	0,181	0,377	0,697
P.F.(1000 °C)	13,3	8,95	8,91	4,61	3,47
Total	100,0	99,8	99,9	99,7	99,8

A TR7 foi a que apresentou os resultados mais diferenciados em relação as outras trincheiras, a porcentagem de SiO<sub>2</sub> segue uma dinâmica diferente, aumentando com a profundidade (indo de 51,65 a 55,35), com uma pequena diminuição no horizonte “B2”, o único que deu resultado para limites, por ter maior quantidade de material de textura fina (argila) que os outros horizontes.

Os elementos CaO, Na<sub>2</sub> O, apresentam um comportamento diferente das outras duas trincheiras anteriores TR1 e TR7, eles aqui têm um aumento com a profundidade, sendo

valores bem expressivos, o CaO vai de 0,60 no horizonte “A”, para 3,56 no horizonte “C2”, e o Na<sub>2</sub> O vai de 0,48 no horizonte “A” para 3,30 no horizonte “C2”. Indicando que o material mais próximo a rocha não sofreu tanto com o processo de intemperismo químico. Esta área é a parede de uma antiga cicatriz de escorregamento, e por ter tido o solo removido, esta concentração pode ter se alterado. Este comportamento pode indicar material que está se desenvolvendo *in situ*.

Tabela 6 - Resultados de FRX para a TR9

Amostra	TR9-A	TR9-B1	TR9-B2	TR9-B3	TR9-C
(g/100 g)					
SiO <sub>2</sub>	<b>47,54</b>	<b>50,13</b>	<b>46,66</b>	<b>38,26</b>	<b>44,09</b>
TiO <sub>2</sub>	1,69	1,89	1,56	1,21	1,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>22,35</b>	<b>24,49</b>	<b>27,66</b>	<b>27,32</b>	<b>27,16</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	<b>6,92</b>	<b>6,85</b>	<b>8,63</b>	<b>8,82</b>	<b>9,95</b>
MnO	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05
MgO	0,55	0,57	0,61	0,79	1,49
CaO	0,20	0,10	0,09	0,07	1,02
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,16	0,09	0,06	0,39
K <sub>2</sub> O	3,21	3,75	2,88	1,46	1,66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,40	0,34	0,29	0,29	0,73
LOI	16,97	11,71	11,52	21,70	11,67
Total	100,03	100,02	100,01	100,02	100,12

Assim como nas outras trincheiras, os elementos de maior porcentagem são, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e seguem o mesmo comportamento ao longo do perfil. Apenas o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aparece com uma concentração média menor que nas outras trincheiras. O elemento que aparece em menor porcentagem é o MnO. O comportamento das porcentagens alcalinas de Na<sub>2</sub>O e CaO nesta trincheira também se difere das TR1 e TR3, sendo maior no horizonte mais profundo (“C”), embora em valores bem menores que os da TR7, enquanto o elemento K<sub>2</sub>O segue a tendência das outras trincheiras de diminuir com a profundidade.

Regmi et al (2013), em seu trabalho fala que os teores de CaO e K<sub>2</sub>O são mais baixos em rochas alteradas que em não alteradas, isto devido ao fato de que estes

componentes são facilmente dissolvidos em água e depois transportados. A única trincheira que apresentou valores maiores foi a TR7, indicando ser o menos alterado dos perfis analisados.

As porcentagens dos óxidos de Fe e Al, nas trincheiras TR1, TR3 e TR9, vão aumentando com a profundidade, ou seja, quanto mais próximo da rocha, maior a porcentagem destes elementos, na TR7 estas porcentagens aumentam um pouco nos horizontes intermediários. A maior diferença ocorreu na TR1 (variando de 24,05 a 35,79, para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 9,22 a 14,80 para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). O mesmo resultado, de um aumento na porcentagem com a profundidade, foi encontrado no trabalho de Neumann et al (2012), que segundo eles, esta concentração reflete possivelmente o transporte vertical destes elementos na forma de complexos orgânicos.

O  $\text{SiO}_2$  tem uma porcentagem maior nos horizontes mais superiores, sendo que a trincheira 1 é a que apresenta maior diferença entre as porcentagens (variando de 37,88 “A” à 26,62 “C”). A concentração de elementos mais pesados muitas vezes acontece, não pela alta presença destes no material de origem, mas pela lixiviação de outros elementos. A TR1 é a trincheira mais próxima a área ocupada, é a que se encontra sem vegetação na parte superior e com plantação de bananeira ao redor. A localização desta trincheira pode indicar o comportamento da porcentagem diferenciada dos elementos químicos analisados. A TR7 e a TR9 são as trincheiras onde tem maior presença de  $\text{SiO}_2$  e Apollaro et al. (2019) em seu trabalho associam a diminuição deste elemento com o aumento do grau de intemperismo e conseqüentemente com o aumento da concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . E analisando a granulometria a TR7 é a que se mostra menos intemperizada, e a que tem maior porcentagem de  $\text{SiO}_2$ , seguida pela TR9.

Che et al (2012) em seu trabalho de análise de alteração de rochas basálticas em clima tropical úmido, encontraram uma perda de Ca, Na, Mg, K e Sr, enquanto que os elementos traço Ba, Zr, Y, Sc, V, Ni e Co aparecem com certo enriquecimento. Já os elementos Ti, Fe, Al, Mn, P e Ce, podem ser lixiviados em alguns níveis do perfil e concentrados em outros, e assim como nos basaltos estes elementos também podem se movimentar no perfil formado sobre outras rochas. Para rochas graníticas como as encontradas na área, Lan et al. (2015) relacionaram uma maior porcentagem dos elementos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  em granitos com biotita em granito alcalino feldspato e maior porcentagem de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e MgO em granito albita. Os maiores valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  são para as trincheiras TR1 E TR3, indicando que a área dessas trincheiras pode ter influência de biotita em granito

alcalino feldspato, enquanto que as porcentagens de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{MgO}$  não tem uma divisão tão definida em relação às trincheiras que possam indicar o tipo de granito como relacionado no trabalho citado.

O trabalho de Othman et al (2017) faz uma associação entre os componentes mineralógicos do solo e a instabilidade da encosta, mostrando que em áreas mais estáveis a concentração de elementos como o Fe e Al é maior do que em áreas instáveis. Segundo o que foi mostrado neste trabalho a trincheira com maior instabilidade seria a TR7, onde tem a menor concentração destes elementos, principalmente nos horizontes mais profundos.

#### 6.1.1.2 - DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A trincheira TR7 não foi analisada pelo mesmo laboratório que as outras, por isso sua apresentação está um pouco diferenciada.

A mineralogia mostrou resultados já esperados para os solos da região, com presença de caulinita e gibbsita indicando as altas taxas de intemperismo que levaram a formação destes minerais entre outros. Coelho (2016) concluiu em seu trabalho que a variação entre o percentual de caulinita e gibbsita (hidróxido de alumínio) depende do estado de intemperização dos solos, e que quanto mais intemperizado, maior o teor de gibbsita.

A mineralogia é uma propriedade que ajuda a entender o comportamento dos solos, e conseqüentemente relacioná-lo a estabilidade da encosta, neste sentido muitos trabalhos já foram desenvolvidos (Regmi et al, 2013; Duzgoren-Aydin e Aydin, 2006; Wen et al, 2004; Fan et al, 2017; Emeh e Igwe, 2017). Pode-se observar os gráficos do ensaio de difração de raios X para cada horizonte da trincheira TR1 na Figura 25.

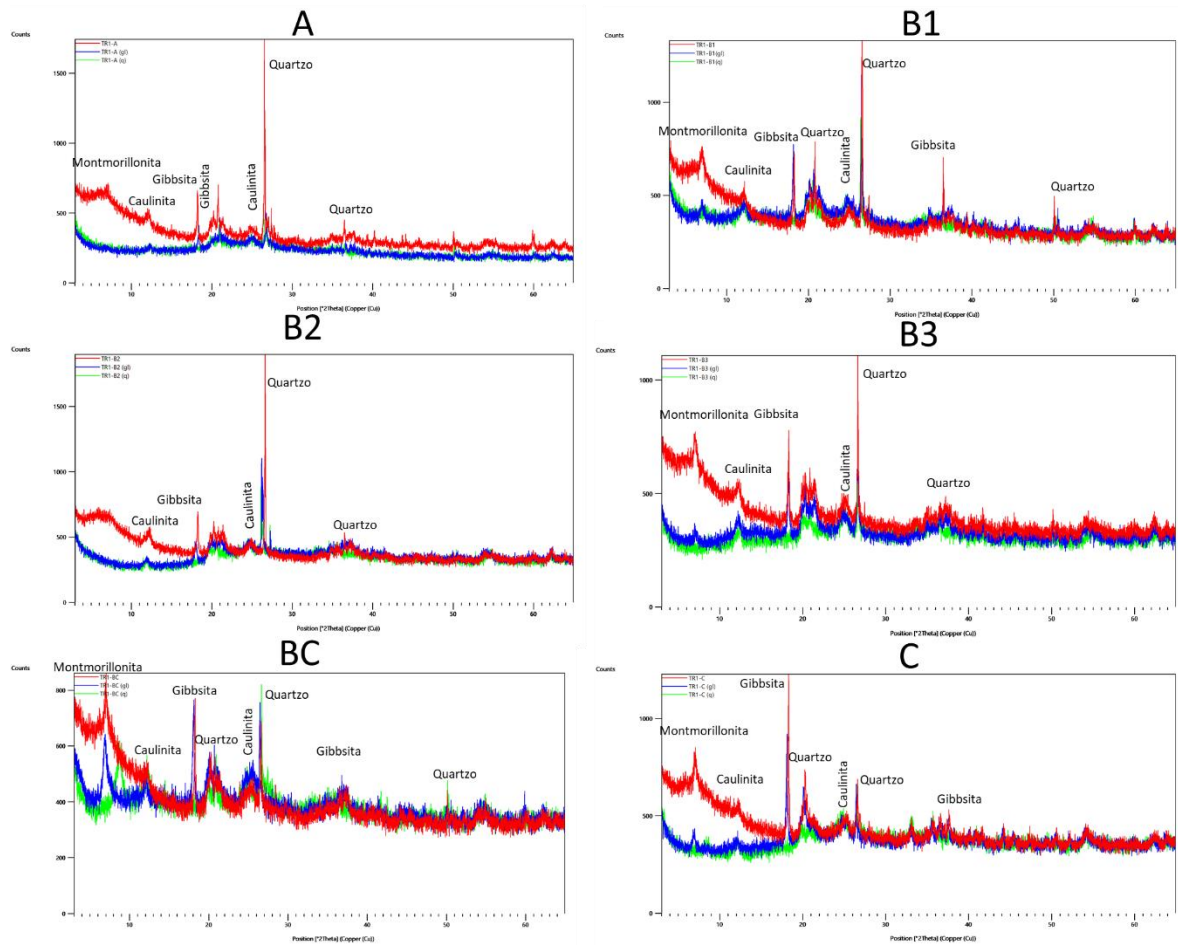


Figura 25 - Difratoograma da TR1

O difratograma do horizonte “A” está de acordo com o esperado, apresentando quartzo, caulinita e gibbsita como elementos principais. Vale lembrar que esta trincheira está localizada muito próxima a comunidade (favela), e a área é usada para plantação de bananeiras por esta população. O horizonte “B1” aparece com montmorillonita, o que não é comum em solos tropicais. Assim como no horizonte “A”, no horizonte “B2” também só aparecem quartzo, caulinita e gibbsita, sem a presença de montmorillonita, podendo entender que a presença deste mineral no horizonte superior, veio de outro lugar. Mas ele vai aparecer nos outros horizontes mais profundos também. No horizonte “B3” aparece novamente a montmorillonita e picos bem definidos de gibbsita, mostrando sim a ação do intemperismo. O horizonte “B/C” mostra um pico menor do quartzo, mas com o pico de montmorillonita bem

mais definido. Indicando um processo de intemperismo forte, mesmo em presença de argilas expansivas.

A trincheira TR1 apresenta uma composição parecida, com a presença de gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), em todos os horizontes, caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Mas também foi encontrado montmorillonita [ $\text{M}^{+1}_{0,67}(\text{Al}_{3,33}\text{Mg}_{0,67})\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ ], onde  $\text{M}^{+1}$  é um cátion monovalente (Lima Junior et al, 2011), o que não é muito comum para a área devido ao alto grau de intemperismo da região. Este argilomineral só não aparece nos horizontes “A” e “B2” desta trincheira, indicando que os horizontes mais profundos podem estar se desenvolvendo *in situ*, e o argilomineral nos horizontes superficiais já sofreu hidrólise se transformando em outro argilomineral como a caulinita (que aparece nos horizontes superiores) ou em hidróxido como a gibbsita (que também aparece nos horizontes superiores).

A montmorillonita pode ser produto do intemperismo de vários tipos de rochas, e segundo IPT (1979), a área da trincheira é de Migmatitos de Paleossomas Dominante, que são rochas heterogêneas, cuja gênese ocorre através da sobreposição de processos como metamorfismo, segregação, fusão parcial, drenagem e cristalização (Azevedo, 2019).

O horizonte “C” aparece com um pico bem definido de gibbsita em relação aos outros elementos. Este fato chama a atenção porque a gibbsita é o último estágio da hidrólise, no entanto também tem montmorillonita, que é uma argila expansiva característica por estar presente em um estágio não tão avançado do processo.

Esta trincheira está localizada próxima ao topo da encosta, e pode ter contribuição de solos da parte superior, mas analisando a mineralogia, parece que o solo tem uma influência de material coluvionar, pois, embora os elementos encontrados ao longo do perfil sejam os mesmos, a variação dos minerais expansivos em horizontes superficiais e de gibbsita no horizonte “C”, indicam material vindo de outro lugar. Apesar de parecer que há um desenvolvimento *in situ*.

A Figura 26 mostra os gráficos com os resultados de difração de raio X de cada horizonte para a trincheira TR3.

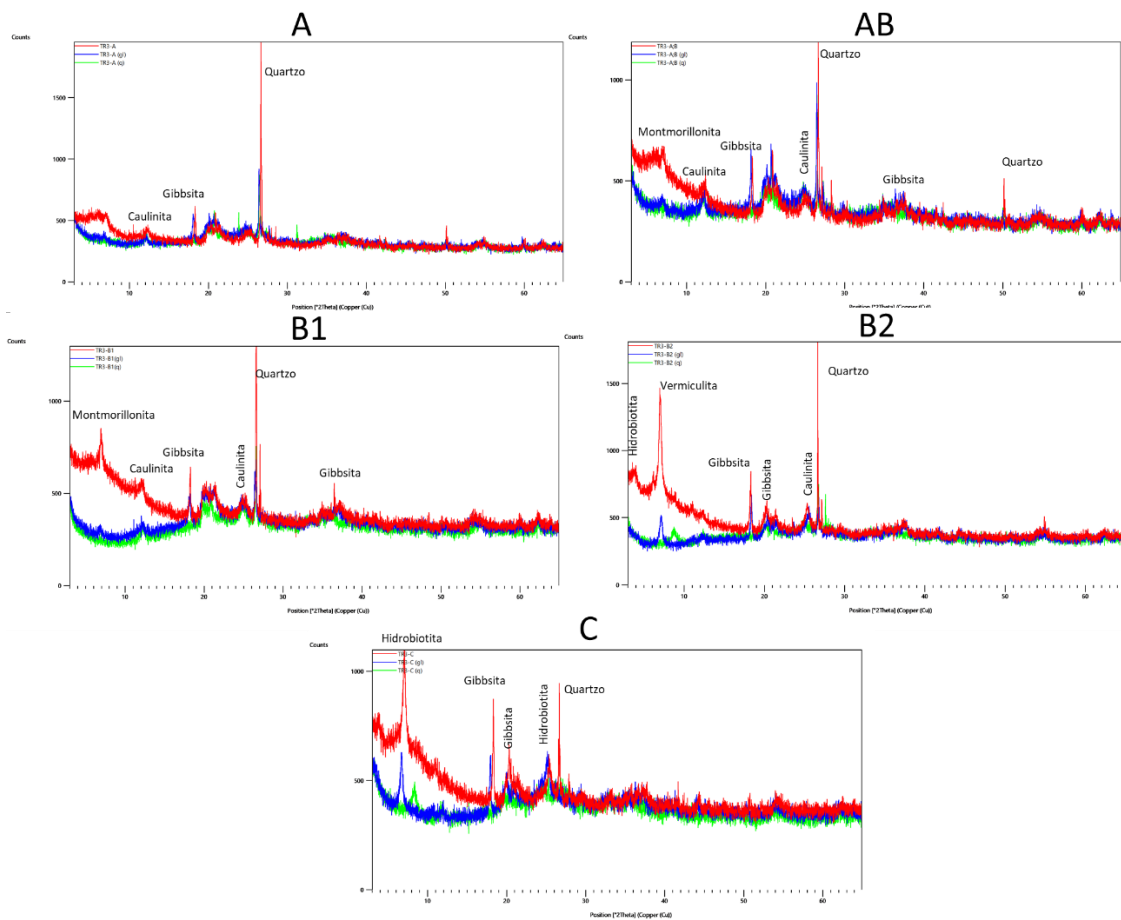


Figura 26 - Difratoograma da TR3

O horizonte “A” apresenta uma composição esperada por ser superficial. Mas, embora apareça, a montmorillonita tem pouco destaque. Não era esperado encontrar uma argila expansiva em um horizonte superficial, por conta dos processos intempéricos (físicos, químicos e biológicos) que atuam nesta parte do perfil. Ocorre uma mudança nas definições dos minerais no horizonte “A/B”, a gibbsite aparece mais definida, assim como também aparecem picos mais definidos da caulinita e montmorillonita. A maior diferenciação do horizonte “B1” para o anterior, é o pico de montmorillonita que aparece melhor definido. No horizonte “B2” aparece a vermiculita, ao invés da montmorillonita, e com um pico grande mostrando um argilomineral bem cristalinizado, assim como aparece a hidrobiotita, indicando um material primário no início do processo de intemperismo químico pela hidrólise. O horizonte “C” mostra a presença de hidrobiotita, quartzo e gibbsite, mostrando início de processo de intemperismo, e menos intenso que no anterior. A drenagem desta trincheira pode

não ser tão efetiva, o que justifica a presença de materiais primários no início da intemperização.

Esta trincheira da mesma forma que a anterior apresenta quartzo, gibbsita e caulinita na composição, assim como argilas expansivas (montmorillonita e vermiculita). Mas chama a atenção o argilomineral vermiculita e a hidrobiotita que aparece nos horizontes “B2” e “C”. Esta trincheira se encontra no contato entre Granito e Migmatito. Ela está em um pequeno platô, logo abaixo da TR1. Sua localização pode ser um indicativo de material superficial depositado, e uma drenagem deficitária nos horizontes mais profundos.

Furian, et al. (1999) em seu trabalho sobre mineralogia e os escorregamentos na região de Cunha, também encontrou a presença de gibbsita associada com minerais inalterados, indicando uma mistura de material pedogenético o qual sofreu com o processo de intemperismo em tempos diferentes. Esse material foi parcialmente associado a eventos de escorregamentos pretéritos, formando um material coluvial.

Os minerais de argila têm um efeito contrário na estabilidade de encostas, devido a seu desenvolvimento diminuir a força das rochas e que alguns minerais argilosos, como a esmectita, mudarem seu volume quando umedecidos (Regmi et al, 2013).

Esta foi a única trincheira que apresentou vermiculita e hidrobiotita na composição mineralógica, estas presenças podem estar associadas ao tipo de material e origem, e também ao processo de intemperismo com algumas características diferenciadas por conta da localização na encosta. Esta foi a trincheira que apresentou menor inclinação, e por conta de sua área, há indicação de que material de solo vindo de partes superiores da encosta possam ter sido depositados ali, indicando material coluvionar, associados principalmente aos horizontes superficiais.

Os difratogramas com os resultados da mineralogia para a TR7 estão na Figura 27.



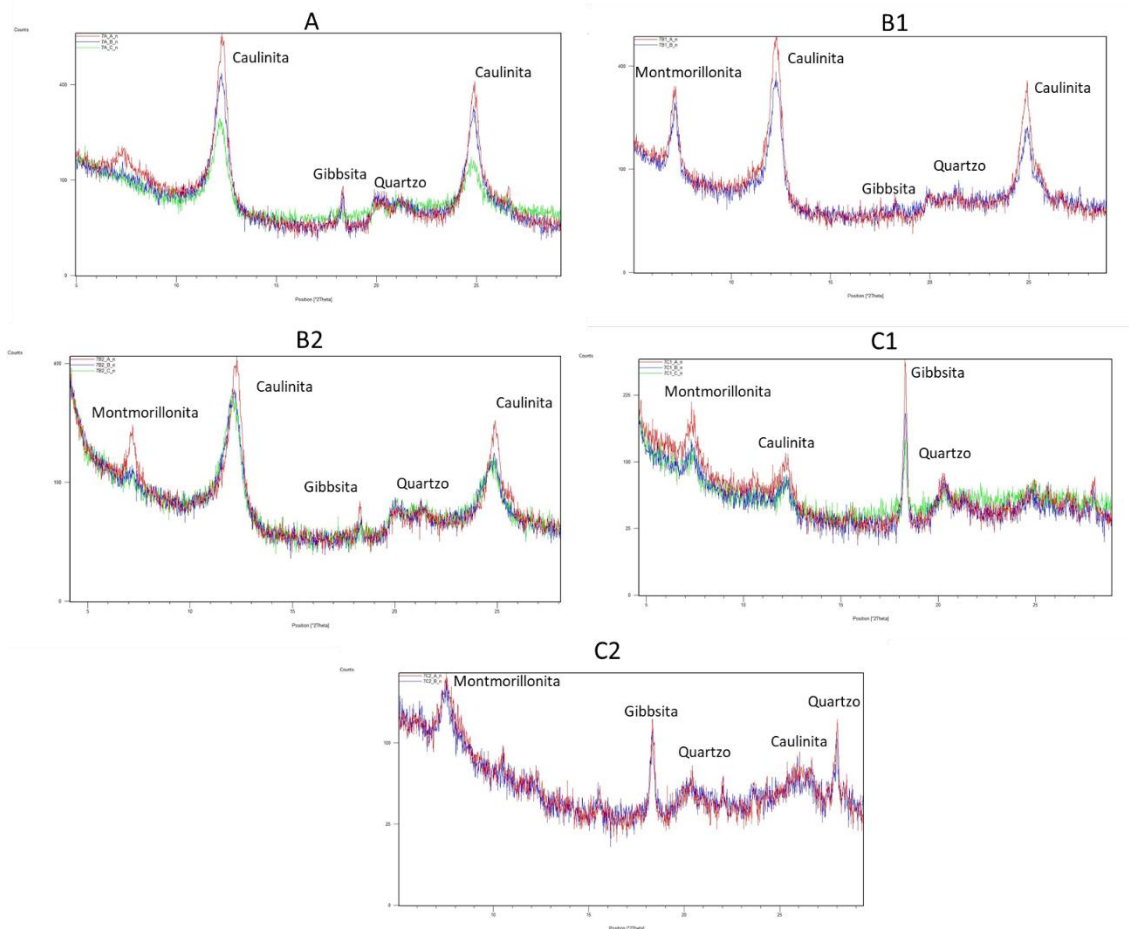


Figura 27 - Difratoograma da TR7

O horizonte “A” apresenta dois picos muito nítidos de caulinita se destacando. Aparecem também gibbsita e quartzo, todos encontrados em material em processo de intemperismo avançado. No difratograma do horizonte “B1” a caulinita continua aparecendo em destaque, embora os picos de gibbsita e do quartzo apareçam, eles são bem menores. Aqui já aparece a montmorillonita, um mineral expansivo que indica que o material não foi totalmente intemperizado. O horizonte “B2” segue com a mesma presença dos elementos dos horizontes anteriores. A caulinita continua aparecendo com picos altos. A gibbsita e o quartzo aparecem também neste horizonte, assim como a montmorillonita, que só aparece na amostra normal (não aparece na glicolada, nem na aquecida). Embora o horizonte “C1” contenha os mesmos minerais, estes se apresentam em diferentes definições. O pico da gibbsita se destaca dos outros, o pico do quartzo está mais definido do que no horizonte anterior, a caulinita só aparece na posição  $2\theta=12^\circ$ . O pico da montmorillonita aparece tanto na amostra normal, quanto na glicolada e aquecida. O difratograma do horizonte “C2” mostra o pico da

montmorillonita bem marcante, seguido de gibbsita e quartzo, o pico que menos aparece é o da caulinita. Embora tenha gibbsita este horizonte é bem típico de material próximo da rocha, em início de intemperismo.

A TR7 se encontra em área de Granito com Megacristais Orientados. Esta trincheira foi aberta na parede de antiga cicatriz de escorregamento e apresentou algumas características bem diferentes das outras trincheiras. Os difratogramas mostraram uma diferença nos picos dos minerais entre os horizontes “B2” e “C1”, com uma mudança significativa do pico da caulinita e da gibbsita. A presença de montmorillonita acontece em todo os horizontes menos no horizonte “A”, e no horizonte “B2” o pico só aparece na amostra normal. Lin et al. (2017) analisaram três diferentes materiais encontrados em Hong Kong, sendo um, o solo derivado de granito, e ao realizar a mineralogia não foi encontrado nenhum argilomineral do tipo expansivo como os encontrado neste trabalho. Hong Kong também se encontra em região tropical, como a encosta analisada. Mesmo estando em região tropical todas as trincheiras analisadas neste trabalho apresentaram argilas expansivas na sua composição, o que não é muito comum devido ao intenso processo de intemperismo para a região (altas temperaturas e muita chuva).

Os diferentes argilominerais vão influenciar em muitos aspectos do solo, entre eles os valores de CTC. Dentre todos os horizontes analisados, o horizonte “A” foi o que apresentou os valores mais baixos de todas as trincheiras, isso pode ser explicado pela ausência de montmorillonita, que segundo Lima Junior et al. (2011), os valores de CTC entre a caulinita e a montmorillonita, mostram que a caulinita apresenta baixos valores, por causa da baixa capacidade de absorção. (Os valores de CTC podem ser observados no Anexo I).

A localização da trincheira, assim como sua as propriedades de engenharia dos solos expansivos são fatores determinantes para avaliar uma possível ruptura (Jiang et al., 2013), e esta trincheira se localiza em parede de antigo escorregamento, portanto, uma área íngreme e que concentra fluxo de água, por estar em área com leve concavidade. Ela também apresenta argilomineral do tipo expansivo em sua composição mineralógica, estes fatores indicam uma probabilidade de ruptura deste material.

A Figura 28 mostra os resultados da mineralogia para todos os horizontes da TR9

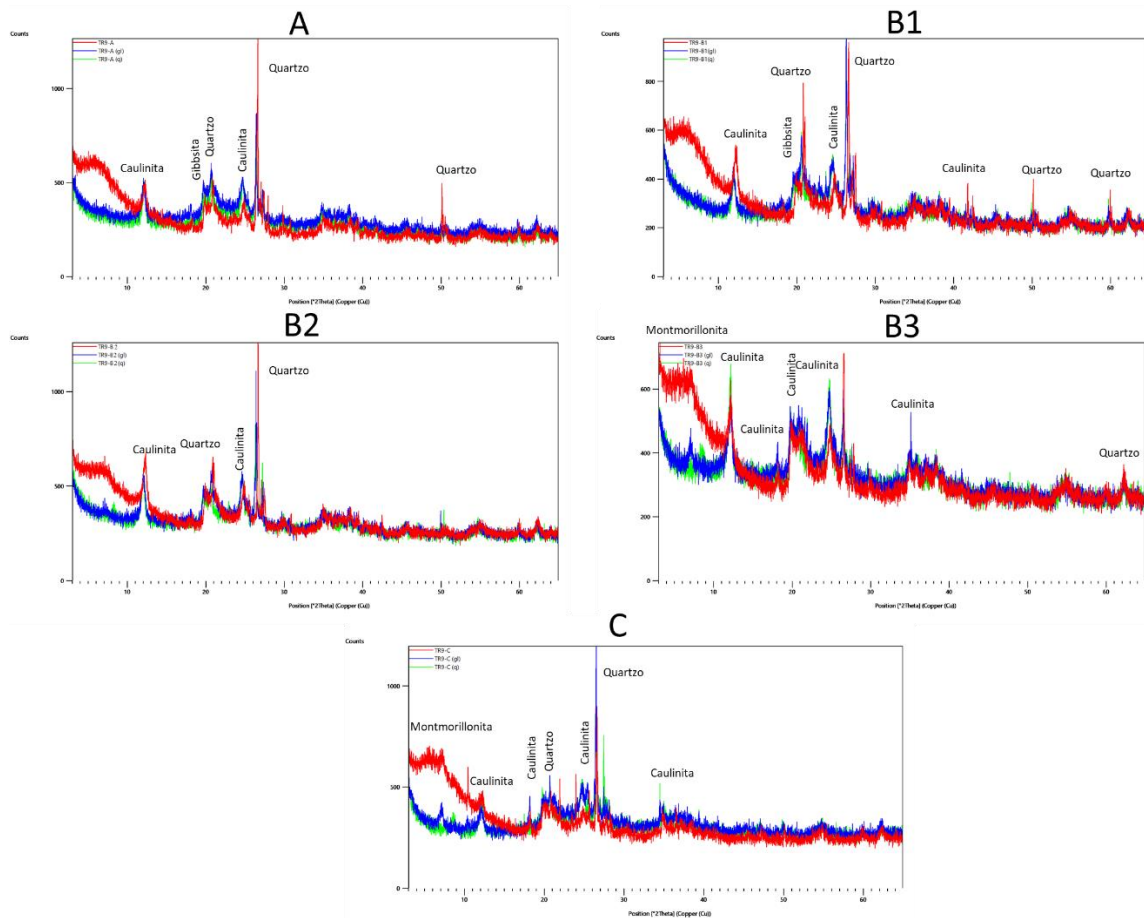


Figura 28 - Difratoograma da TR9

O horizonte “A” apresenta caulinita, gibbsita e quartzo, o que é esperado para um horizonte superior, pois entende-se que este é o horizonte que mais sofre com os processos do intemperismo. O difratograma do horizonte “B1” mostra os mesmos elementos encontrados no horizonte anterior, sendo que aparecem picos em posições diferentes, como os picos de caulinita  $2\theta=42$ , e de quartzo em  $2\theta=60$ . Difratoograma do horizonte “B2” é muito parecido com o anterior, mas com menos picos de quartzo, não aparecendo na posição  $2\theta=50$ , nem na posição  $2\theta=60$ , e também não aparece o pico da caulinita em  $2\theta=42$ . Neste horizonte também não aparece mais a gibbsita, o que indica que o processo de intemperismo não está muito avançado. O horizonte “B3” já sofreu uma mudança considerável, em relação aos elementos constituintes. Aqui aparece a montmorillonita com pico bem marcante, e a caulinita aparece com picos bem definidos nas posições esperadas para encontrar este argilomineral,  $2\theta=12$  e  $2\theta=25$ . No horizonte “C” os picos da caulinita não estão tão evidentes como no horizonte anterior, mas a constituição dos minerais é a mesma do horizonte anterior.

Esta trincheira mostrou presença de montmorillonita nos horizontes mais profundos, o que condiz com um processo de intemperismo em material que está se formando *in situ*, onde os horizontes superiores já sofreram com processo de hidrólise e argilominerais expansivos como a montmorillonita já sofreram alteração.

A TR9 assim como a TR7 se encontra em área de Granito com Megacristais Orientados. Por estarem sobre o mesmo material parental, e na mesma encosta, esperava-se que a mineralogia fosse parecida, o que de fato aconteceu, embora apresentem picos diferentes indicando que a cristalinização desses minerais não é a mesma.

Embora as trincheiras estejam localizadas em área que sofre intensamente com o intemperismo, aparecem argilominerais do tipo expansivo como a montmorillonita e a vermiculita, estes argilominerais alteram seu comportamento mecânico quando hidratados, o que não acontece com os argilominerais do grupo da caulinita, onde a água na sua estrutura é inerte e não influencia no comportamento mecânico do solo (Irfan, 1996). Assim a presença deles não vai criar uma expansão do solo criando uma deformabilidade significativa a ponto de alterar a dinâmica da água. As argilas expansivas causam grande deformabilidade no solo podendo levar ao rompimento da estrutura (Jiang et al, 2013). Mas este tipo de argilomineral aparece em quase todos os horizontes. Esta presença pode estar relacionada com os ensaios de resistência ao cisalhamento, onde nos gráficos de deformidade o solo expandiu, ao invés de contrair.

Hasegawa et al (2009) mostraram em seu trabalho que vários trechos de uma rodovia apresentaram problemas com deslizamentos e fluxos de detritos, e os resultados da DRX mostraram que estes deslizamentos tiveram uma intemperização significativa da argila na zona do solo que rompeu. Todas as trincheiras mostraram processo acelerado de intemperismo, embora tenha aparecido argilomineral expansivo, e a TR3, mostrou resultados de um material que não aparece em outras trincheiras nos horizontes mais profundos, o que indica que esta trincheira, nos horizontes mais profundos pode estar se desenvolvendo a partir da rocha, mas a presença de gibbsita já indica que este material pode ter também colúvio vindo de áreas a montante.

A mobilização de argilominerais e elementos químicos, resultantes do intemperismo químico, agem como heterogeneidades dentro dos perfis de alteração e influenciam na suscetibilidade dos mesmos aos movimentos de massa gravitacionais (Rodrigues, 2014). Neste trabalho pode-se observar a presença de diferentes argilominerais ao

longo dos perfis, podendo ter sido mobilizados ou não, mas que podem causar descontinuidades.

A presença abundante de diferentes minerais de argila (como os expansivos) pode reduzir a permeabilidade, causando uma redução na resistência ao cisalhamento, isso sob altos teores de umidade induzidos por fortes chuvas (Erginal et al, 2009). Foi constatada a presença de argilominerais expansivos em todos os horizontes “B” analisados, e nos horizontes “C”, só o da TR3 não mostrou este tipo de argilomineral, apresentando apenas hidrobiotita, que na presença de água não se altera mecanicamente por ser do tipo 1:1 (Brindley et al., 1983).

A presença de gibbsita no solo pode ser um indicativo de área com fragilidade para desencadear movimentos gravitacionais de massa como foi descrito por Furian et al. (1999), Silos et al. (2011) e Silva et al. (2016). E sua presença nos horizontes “C” também indicam que o material pode ter sido depositado de solos da parte a montante da encosta, e o desenvolvimento do solo pode estar acontecendo em conjunto, da rocha com material de solo coluvionado. Neste sentido, apenas a TR9 aparenta ter um desenvolvimento sem interferência de material coluvionar, pois não tem gibbsita nos horizontes mais profundo, e tem presença de montmorillonita, argilomineral indicativo de processo intempérico não tão acelerado.

#### 6.1.2 - ANÁLISES FÍSICAS DO SOLO

Para realizar outras análises (cálculos como volume de sólidos e grau de saturação) é necessário primeiro caracterizar fisicamente os solos estudados, para isso o ensaio de massa específica dos sólidos deve ser realizado. Os valores de massa específica dos sólidos ( $\gamma_s$ ) e de umidade do campo ( $w$ ) podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa específica dos sólidos e teor de umidade das amostras deformadas de solo para cada horizonte das trincheiras analisadas

Trincheiras	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)
TR1-A	2,62	34,01
TR1-B	2,78	32,13
TR1-C	2,83	25,58
TR3-A	2,56	43,44
TR3-B2	2,81	22,34
TR3-C	2,76	11,95
TR7-A	2,66	20,97
TR7-B2	2,75	27,93
TR7-C1	2,85	29,71
TR9-A	2,66	25,58
TR9-B3	2,76	26,10
TR9-C	2,98	24,17

Sendo:  $\gamma_s$  - a massa específica dos sólidos; w - o teor de umidade quando foi feito o ensaio de massa específica dos sólidos

Quando se analisam as massas específicas dos sólidos, no perfil, o horizonte “A” é o que têm menor valor, pois seus constituintes são mais leves (matéria orgânica). Sbroglia (2015) associa em seu trabalho os altos valores de massas específicas de sólidos a presença de grandes quantidades de óxidos de ferro, tendo encontrado em seu trabalho valores de 3,03 g/cm<sup>3</sup> e 3,21 g/cm<sup>3</sup>. O maior valor encontrado nos ensaios deste trabalho (2,98 g/cm<sup>3</sup>) foi para

o horizonte “C” da TR9, indicando a ausência de grandes quantidades de óxido de ferro nestes perfis. A massa específica do solo vai ser influenciada pela massa específica dos sólidos.

#### 6.1.2.1 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica tem grande importância no estudo dos movimentos de massa, pois influenciam diretamente seu comportamento em relação a água (Bini, 2012; Godois, 2011; Suradi, 2015; Wang, 2003; MacKenna, 2012).

As curvas granulométricas para cada horizonte das 4 trincheiras estão apresentadas nas Figuras 29 a 32, e seus respectivos percentuais das frações de argila, silte e areia (fina, média e grossa) nas Tabelas 8 a 11.

As curvas que mostram a granulometria para cada horizonte nos ensaios com e sem defloculante podem ser analisadas no Apêndice I.

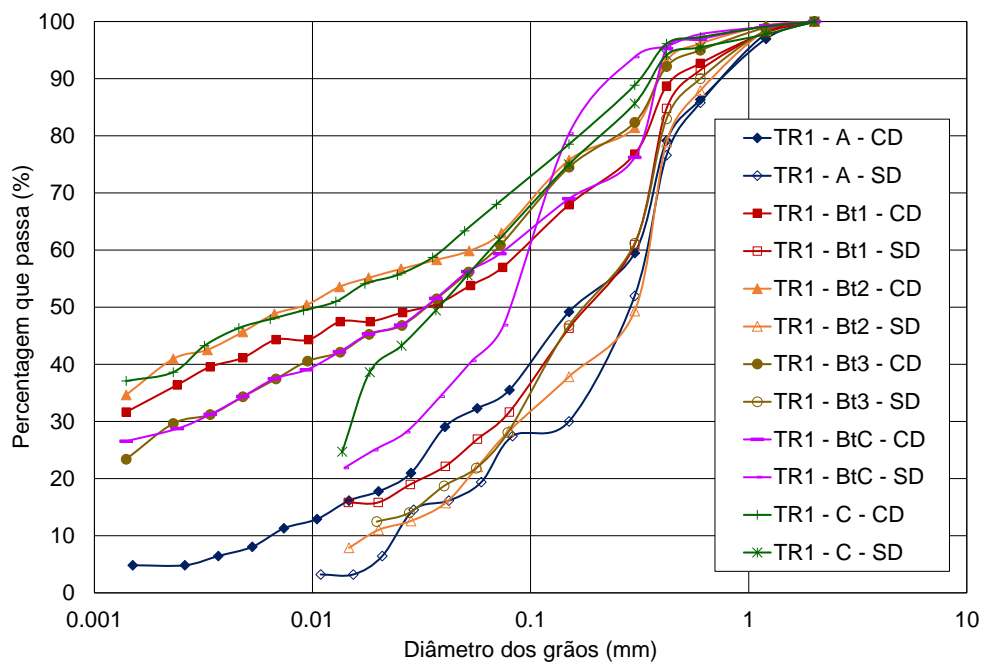


Figura 29 - Curvas granulométricas dos horizontes da TR1 nos ensaios com e sem defloculante

Tanto para o ensaio com defloculante quanto para o ensaio sem defloculante, pode-se observar as curvas para os ensaios com defloculante bem próximas, menos o horizonte superficial (“A”), que têm um comportamento diferenciado devido à baixa porcentagem da fração argila em sua composição. Para o ensaio sem defloculante os

horizontes que mais se distanciam dos outros são o “B/C” e “C”, pois estes apresentam maior quantidade de silte, sendo que o “B/C” tem também uma maior quantidade de areia fina, o que pode ser observado no comportamento da curva deste horizonte.

A Tabela 8 mostra os resultados de porcentagem das frações (argila, silte e areia-fina, média, grossa e pedregulho) para cada horizonte da TR1, a partir das curvas granulométricas.

Tabela 8 - Distribuição granulométrica com e sem defloculante da TR1

TR1												
	A		Bt1		Bt2		Bt3		Bt-C		C	
(%)	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD
Argila	4,6	0	34,9	0	39,4	0	27,9	0	27,9	0	37,9	0
Silte	28,1	10,7	20,3	18,4	22,2	23	30,5	16,6	29,7	35,9	27,8	58,5
Fina	21,7	31,4	17,6	35,8	17,2	20,1	20,7	38,4	14,6	53,7	19	22,8
Média	32,1	44,3	20	37,3	17,4	45,1	16	35,2	24,9	8,2	12,8	14,4
Grossa	13,5	14	7,2	8,4	3,7	11,8	4,9	9,8	2,9	2,3	2,5	4,4
Pedregulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ao analisar a Tabela 8, referente aos dados da granulometria das amostras coletadas na TR1, nota-se que os resultados das amostras de solo ensaiadas sem o uso do defloculante mostram microagregação tendo uma porcentagem maior na parte de areias fina e média. A argila não aparece em nenhum horizonte dessas amostras, e a porcentagem de silte aumenta nos horizontes mais profundos (“B/C” e “C”).

Para as amostras de solo ensaiadas com o uso de defloculante existe uma porcentagem maior de argila nos primeiros horizontes (“B1” e “B2”), diminuindo nos horizontes seguintes (“B3” e “B/C”) e aumentando novamente no último horizonte (“C”), sendo que no horizonte superficial (“A”), a porcentagem é bem baixa. As areias também têm maior porcentagem na porção fina e média.





A trincheira TR3 também não apresentou argila nas amostras sem defloculante. A porção de silte também foi menor nos primeiros horizontes (variando de 4,9% a 13,6%), mas teve um aumento nos últimos dois (“B2” 43,7% e “C” 49,1%). Em relação às areias, essas amostras apresentaram maior porcentagem em todos os horizontes, mas principalmente nas porções de areia fina e média, indicando forte microagregação das partículas.

As amostras com defloculante apresentaram valores consideráveis para a porção de argila e silte, sendo a maior porcentagem de argila no horizonte “B1” (53,1%) e de silte no “A” (que no ensaio sem defloculante tinha 4,9% e no ensaio com defloculante foi para 27,6%). As areias tiveram uma diminuição considerável nos primeiros horizontes (“A”, “A/B” e “B1”) e uma diminuição mais discreta nos últimos (“B2” e “C”).

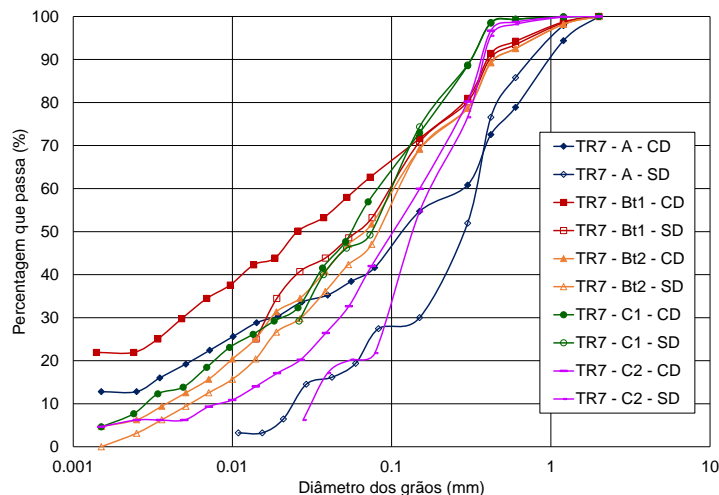


Figura 31 - Curvas granulométricas dos horizontes da TR7 nos ensaios com e sem defloculante

De todas as trincheiras esta é a que apresenta o gráfico com maior diferença no comportamento, sendo bem mais arenosa e mostrando no ensaio com defloculante uma quantidade de argila maior nos primeiros horizontes, diminuindo bastante nos horizontes mais profundos. Este mesmo comportamento foi encontrado por Vieira et al (2015) em uma das cicatrizes de escorregamentos estudadas em Caraguatatuba.

No ensaio sem defloculante as curvas que mostraram menor porcentagem de finos foram as do horizonte “A” e “C2”. O horizonte que mais se destaca neste ensaio é o “B2”, pois aparece uma pequena porcentagem de argila.

A Tabela 10 mostra os resultados de porcentagem das frações do solo para cada horizonte da TR7, a partir das curvas granulométricas.

Tabela 10 - Distribuição granulométrica com e sem defloculante da TR7

TR7										
	A		Bt1		Bt2		C1		C2	
(%)	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD
Argila	12,3	0	21,5	0	5,2	1,6	6	0	5,8	0
Silte	27,1	25,1	37,8	46,7	42,1	42,4	45,5	42,6	30	15,4
Fina	18,5	33	17,6	29,5	27,3	30,7	30,4	40,7	35,9	52,8
Média	21,1	23,3	17,5	17,4	18	18,1	17,5	16,1	27,4	30,2
Grossa	20,9	18,6	5,6	6,3	7,3	7,2	0,6	0,5	1	1,6
Pedregulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A TR7 foi a trincheira que apresentou menor quantidade de argila, tanto nas amostras com defloculante quanto nas amostras sem defloculante, chamando a atenção para o horizonte “B2” que mesmo tendo uma quantidade pequena de argila no ensaio com defloculante (5,2%), ele apresentou também argila (1,6%) no ensaio sem defloculante, foi o único horizonte de todas as trincheiras estudadas que apresentou argila no ensaio sem defloculante.

A quantidade de silte aparece com certo equilíbrio entre os dois ensaios, sendo que somente no horizonte “C2” aparece uma desigualdade maior. Nas areias, o que chama mais atenção é a fração de areia fina, tendo maior porcentagem no ensaio sem defloculante. As outras frações apresentam resultados próximos nos dois ensaios, tendo um valor bem baixo para areia grossa.



A TR9 não apresenta a fração argila no ensaio sem defloculante, mas apresenta uma porção considerável no ensaio com defloculante demonstrando forte microagregação dessas partículas, sendo maior nos horizontes intermediários (“B2” e “B3”), caindo novamente no horizonte “C”. A fração silte também tem uma porcentagem maior no ensaio com defloculante para os horizontes mais superficiais (“A”, “B1” e “B3”). Provavelmente a argila e o silte agregados tem um comportamento de areia fina, pois é a que aparece com maior quantidade no ensaio sem defloculante. A areia média aparece um pouco acima no ensaio sem defloculante, menos no horizonte “C”, já a areia grossa aparece acima em todos os horizontes neste mesmo ensaio.

Em estudo de solos não saturados, Satyanaga et al. (2013) avaliou a relação entre curva de retenção de água no solo e as propriedades físicas, como a granulometria, mostrando a importância destas propriedades. Eles descrevem a importância do fluxo de água nos solos, principalmente relacionadas aos eventos de chuvas, que podem levar a instabilidade da encosta.

A distribuição granulométrica interfere diretamente na dinâmica da água no interior dos solos. Ao observar todas as curvas granulométricas das trincheiras nota-se que há uma diferença textural entre os horizontes “B” e “C”. Os horizontes “B” se apresentam mais argilosos (maior quantidade de finos, principalmente argilas), enquanto os horizontes “C” tendem a ter materiais mais grossos, maior quantidade de areias, podendo indicar uma descontinuidade entre eles. Todos os horizontes apresentaram microagregação da argila nos ensaios sem defloculante.

Em um estudo realizado por Colângelo (1995) foi apontada uma forte descontinuidade textural entre os horizontes “B” e “C”, sendo que estas fortes discrepâncias estão vinculadas às proporções de silte e argila. O horizonte “C” se apresenta mais siltoso e arenoso o que indica uma menor coesão deste material em relação ao horizonte “B”.

Vieira et al. (2015) encontraram resultados similares para outra região da Serra do Mar, Caraguatatuba, em que com o aumento da profundidade houve também um aumento da fração areia em uma das três trincheiras estudadas. Nas outras duas houve uma certa continuidade nos valores da fração argila em todo o perfil. Neste estudo os perfis estudados foram em cicatrizes de escorregamentos, portanto este resultado pode ser comparado com a TR7, que também mostra valores muito próximos de argila para os horizontes mais profundos (“B2”, “C1” e “C2”), e valores um pouco maiores para os horizontes mais superficiais (“A” e “B1”), mostrando um aumento da fração areia com a profundidade.

A diferença das frações granulométricas apresentadas pelos horizontes dos solos das 4 trincheiras, nos ensaios com e sem o uso do defloculante, mostram a microagregação, resultado do intenso processo pedogenético que ocorre em regiões tropicais, onde a chuva levemente ácida pode eliminar as bases do perfil, mantendo os agentes cimentantes, como os óxidos e hidróxidos de alumínio.

A microagregação do solo pode interferir no comportamento da água nos solos, podendo influenciar a drenagem da água, uma vez que estes solos vão apresentar uma granulometria mais grossa na condição natural do perfil, a água pode ter sua drenagem facilitada.

#### 6.1.2.1.1 - CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL

As porcentagens das frações do solo das Tabelas de 8 a 11 foram utilizadas no triângulo textural para a classificação dos horizontes mostrados nas Tabelas de 12 a 15. Onde observa-se a diferença na classificação para cada ensaio.

Tabela 12- Porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante, com as respectivas classificações texturais para a TR1

Trincheira TR1- Horizonte	Com Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	67,3	28,1	4,6	Franco-Arenosa
B1	44,8	20,3	34,9	Franco-Argilosa
B2	38,4	22,2	39,4	Franco-Argilosa
B3	41,5	30,5	27,9	Franco-Argilosa
B-C	42,4	29,7	27,9	Franco-Argilosa
C	34,3	27,8	37,9	Franco-Argilosa
Trincheira TR1- Horizonte	Sem Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	89,7	10,7	0	Areia-Franca
B1	81,6	18,4	0	Areia-Franca
B2	77,0	23,0	0	Areia-Franca
B3	83,4	16,6	0	Areia-Franca
B-C	64,1	35,9	0	Franco-Arenosa
C	64,1	35,9	0	Franco-Arenosa

As amostras para os ensaios com defloculante e sem defloculante mostram uma diferença na classificação textural para todos os horizontes, sendo para os ensaios sem defloculante o comportamento mais arenoso, pois para este ensaio não aparece nenhuma porcentagem da fração argila, enquanto que no ensaio com defloculante esta fração aparece com porcentagens consideráveis, menos no horizonte A, dando um comportamento mais argiloso para os horizontes.

A fração correspondente de silte também tem um aumento para o ensaio com defloculante, o que também altera a classificação final. A fração areia nesta classificação não tem uma separação (fina, média, grossa e cascalho), sendo computada toda junta. Nota-se que no campo o comportamento do solo vai se dar em relação ao ensaio sem defloculante, e neste ensaio a classificação sofre uma alteração do horizonte “B” para o “C”, mostrando uma diferença em relação a dinâmica da água, onde ela vai drenar mais facilmente na condição de campo (sem defloculante).

Tabela 13 - Porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante com as respectivas classificações texturais para a TR3

Trincheira TR3- Horizonte	Com Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	45,4	27,6	27,0	Franco-Argiloarenosa
A-B	47,0	18,6	34,4	Franco-Argiloarenosa
B1	26,3	20,6	53,1	Argila
B2	31,7	40,9	27,4	Franco-Argilosa
C	33,4	39,5	27,1	Franco-Argilosa
Trincheira TR3- Horizonte	Sem Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	95,1	4,9	0	Areia
A-B	90,2	9,8	0	Areia
B1	86,4	13,6	0	Areia-Franca
B2	56,3	43,7	0	Franco-Arenosa
C	50,9	49,1	0	Franco-Arenosa

Na trincheira TR3, também há uma diferença na classificação textural para os ensaios sem e com defloculante. No ensaio com defloculante todos os horizontes têm uma textura mais argilosa, com o aumento da fração argila e da fração silte, menos para os dois

últimos horizontes que na fração silte, para os ensaios com defloculante tem uma ligeira queda. Chama a atenção o horizonte “B1” que no ensaio com defloculante aparece com uma concentração muito alta de argila (mais de 50%), e que no ensaio sem defloculante aparece com 0% mudando de Areia-franca para Argila.

Os horizontes “A” e “A/B” se classificam como areias para o ensaio sem defloculante, mudando para franco-argiloarenosa para o ensaio com defloculante. Nos horizontes mais profundos “B2” e “C”, a mudança nas concentrações das frações ocorre praticamente em relação a fração areia e argila, a fração silte quase não se altera, indicando que esta argila quando agregada, tem comportamento de areia.

Tabela 14 - Porcentagem das frações granulométricas com e sem defloculante com as respectivas classificações texturais para a TR7

Trincheira TR7- Horizonte	Com Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	60,5	27,1	12,3	Franco-Arenosa
B1	40,7	37,8	21,5	Franca
B2	52,6	42,1	5,2	Franco-Arenosa
C1	48,5	45,5	6,0	Franco-Arenosa
C2	64,3	30,0	5,8	Franco-Arenosa
Trincheira TR7- Horizonte	Sem Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	74,9	25,1	0	Areia-Franca
B1	53,3	46,7	0	Franco-Arenosa
B2	56,0	42,4	1,6	Franco-Arenosa
C1	57,4	42,6	0	Franco-Arenosa
C2	84,6	15,4	0	Franco-Arenosa

Esta trincheira foi a única que manteve a classificação em três horizontes, sendo diferente somente nos horizontes “A” mudando de areia franca no ensaio sem defloculante para franco-arenosa no ensaio com defloculante, e “A/B” mudando de franco-arenosa no ensaio sem defloculante para franca no ensaio com defloculante, indicando que nos horizontes seguintes não há uma quantidade significativa de argila no ensaio com defloculante e a variação de silte é muito pequena.

Em relação a areia a maior variação foi no horizonte “C2” que no ensaio sem defloculante aparece com a porcentagem de 84,6% e no ensaio com defloculante aparece com



64,3%, mas esta variação não vai alterar a classificação deste horizonte, permanecendo como franco-arenosa

Esta foi a única trincheira que apresentou argila no ensaio sem defloculante, para o horizonte “B2”, indicando que esta argila está menos agregada que nos outros horizontes, embora sua porcentagem seja bem pequena, como apareceu no ensaio com defloculante (5,2%).

Tabela 15 - Porcentagens de frações granulométricas com e sem defloculante com as respectivas classificações texturais para a TR9

Trincheira TR9- Horizonte	Com Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	47,5	37,8	14,8	Franca
B1	52,6	23,8	23,5	Franco-Argiloarenosa
B2	44,4	16,0	39,6	Franco-Argilosa
B3	40,4	19,6	40,1	Franco-Argilosa
C	61,6	24,2	14,2	Franco-Arenosa
Trincheira TR9- Horizonte	Sem Defloculante			Classificação textural
	% Areia	% Silte	% Argila	
A	79,9	20,1	0	Areia-Franca
B1	77,2	22,8	0	Areia-Franca
B2	74,6	25,4	0	Areia-Franca
B3	87,0	13,0	0	Areia-Franca
C	73,0	27,0	0	Areia-Franca

A trincheira TR9 também apresentou diversidade na classificação dos ensaios com e sem defloculante, sendo a maior quantidade de argila nos horizontes medianos (“B1”, “B2” e “B3”). No ensaio sem defloculante não aparece argila e a porcentagem de silte é baixa, por isso todos ficaram como Areia-Franca na textura.

A classificação dos solos é um indicativo de como estes solos vão se comportar em relação a drenagem da água, sendo esta facilitada em solos mais arenosos, como os encontrados nas trincheiras TR7 e TR9. Embora todas as classificações tenham alteração para os ensaios com e sem defloculante.

Outro fator que vai influenciar no comportamento da água no solo, é a sua interação com os constituintes da fase sólida, principalmente as argilas. Para entender o

quanto as argilas são reativas, existe um índice a ser calculado, chamado de Índice de Atividade da argila.

### 6.1.3 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os limites de consistência indicam a quantidade de água necessária no solo para este modificar seu estado de comportamento, como está sendo apresentado abaixo. Como os movimentos da água no interior dos solos, as propriedades geotécnicas mudam de acordo com os constituintes dos solos, e com a natureza e organização dessas formações superficiais da vertente, assim como o comportamento da água nelas é de fundamental importância para este estudo (Luiz, 2003). Os resultados dos ensaios de limite de consistência se encontram na Tabela 16.

Tabela 16 - Limites de consistência de todos os horizontes das 4 trincheiras

TR1	LC (%)	LP (%)	LL (%)	IP (%)
A	NP	NP	NP	NP
B1	11,72	32,4	49,6	17,2
B2	22,36	37,6	68,3	30,7
B3	10,07	40,5	60,1	19,6
B-C	<b>43,60</b>	36,0	48,0	12,0
C	18,77	39,9	54,5	14,6
TR3				
A	NP	NP	NP	NP
A-B	14,42	36,0	54,1	18,1
B1	31,66	38,6	72,0	33,3
B2	22,12	42,3	66,9	24,6
C	19,79	42,4	58,0	15,7
TR7				
A	NP	NP	NP	NP
B1	NO	34,7	36,2	1,5
B2	NP	NP	NP	NP
C1	NP	NP	NP	NP
C2	NP	NP	NP	NP
TR9				
A	NP	NP	NP	NP
B1	18,78	30,4	45,7	15,3
B2	14,57	30,4	45,7	15,3
B3	17,64	34,1	60,2	26,1
C	NP	NP	NP	NP

LC -limite de contração; LP-limite de plasticidade; LL-limite de liquidez; IP-índice de plasticidade; NP- não plástico; NO- não obtido (problemas com a amostra ao secar na estufa)

Os estados de consistência indicam a mudança na propriedade dos solos finos (passantes na malha 40, com diâmetro de 0,42mm) em função das condições de umidade. Os limites de consistência são os teores de umidade gravimétrica que se situam entre as fronteiras dos estados de consistência. O limite de contração mostra o teor de umidade que além dele, o solo não se contrai mais (mesmo que perca água, seu volume não se altera). Sendo que o maior valor encontrado foi no horizonte “B1” da TR3. O resultado do horizonte “B/C” da TR1 foi desconsiderado por estar apresentando valor maior que o limite de plasticidade.

Todos os valores de limites de plasticidade e liquidez, estão de acordo com a granulometria, tendo valores mais altos nos horizontes onde têm maior porcentagem de material fino (argila e silte), por isso a necessidade de maior quantidade de água para atingir estes limites. O horizonte com maior valor de IP (33,3%) é o “B1” da TR3, o que apresentou maior quantidade de argila no ensaio com defloculante, seguido do horizonte “B2” da TR1 (30,7%), os outros tiveram valores abaixo de 30%.

Os horizontes “A” de todas as trincheiras deram NP (não plástico), influenciado por não ter material da fração argila suficiente para o ensaio (Figura 33). Ribeiro e Souza (2018) verificaram em seu trabalho que a matéria orgânica não influenciou nos resultados de Limites de plasticidade e liquidez. O fato de todos os solos dos horizontes “A” terem dado NP foi relacionado a fração areia em maior quantidade nestes horizontes. Os horizontes “C” das trincheiras TR1 e TR3 apresentaram plasticidade, embora mais baixos, e nas trincheiras TR7 e TR9, não foi possível realizar o ensaio.

A trincheira TR7, foi um caso em que mesmo apresentando materiais finos na granulometria, não foi o suficiente para realização do ensaio, somente um horizonte deu resultado de limites (“B1”), sendo todos outros NP (não plástico). E o horizonte que deu resultado apresentou um IP (Índice de plasticidade) muito abaixo dos outros (1,5%), mostrando uma trincheira com solos de textura arenosa.



Figura 33 - Foto da tentativa de realizar o ensaio no horizonte A da TR9

Vargas (1999) descreve o solo do topo do Mont Serrat em Santos, com um limite de liquidez (LL) com valores entre 45% e 33% e limite de plasticidade (LP) entre NP (não plástico) e 13%. Estes valores estão bem abaixo dos encontrados neste estudo, onde os valores de LL variaram entre 36,2% e 72% e os valores de LP entre 30,4% e 42,4%, indicando um solo com maior quantidade de material fino, mesmo sendo morros residuais na parte insular, muito próximos um do outro.

Parizoto (2014) encontrou em seu trabalho valor de umidade natural próxima ao limite de liquidez (a amostra foi coletada em um período muito chuvoso) e é exatamente este processo de aproximação do valor de umidade que se deve observar, pois a mudança do estado de plástico para o líquido é um dos fatores que podem condicionar os escorregamentos. Para o horizonte “B” da TR1 o valor de umidade do campo foi de 32,13%, abaixo do limite de plasticidade e para o horizonte “C” foi de 25,58%, também abaixo do limite de plasticidade. Na TR3 o horizonte “B” teve 22,34%, abaixo do limite de plasticidade e um pouco acima do limite de contração, e o horizonte “C” 11,95%, valor bem abaixo do limite de contração (19,79%). A TR7 apresentou-se NP para estes horizontes e na TR9 obteve-se 26,10% para o “B” abaixo do limite de plasticidade, mas acima do limite de contração e o “C” foi NP (estes valores do teor de umidade são as correspondentes a Tabela 7).

Embora esta região seja bem úmida, apenas um horizonte apresentou valor de umidade acima do limite de plasticidade, todos os outros mostraram valores mais baixos, esta tendência indica que estes solos têm boa drenagem, não retendo muito a água, o que está de acordo com a microagregação dos solos observada nos ensaios de granulometria, pois esta condição leva o solo a se comportar como silte ou areia no campo. Os aglomerados de solos

formam granulações maiores, assim os poros também ficam maiores, o que leva a uma drenagem mais eficiente e menor retenção.

### 6.1.3.1 - ATIVIDADE DA ARGILA

O Índice de Atividade da argila (que é um indicativo do quanto a argila do solo pode se alterar com a presença de água) pode ser observada na Tabela 17. Este cálculo só foi possível para os horizontes que deram resultado para os ensaios de Limites de Atterberg, pois é necessário o valor do IP (Índice de Plasticidade).

Tabela 17 - Atividade das argilas para todos os horizontes das trincheiras estudadas

Horizontes e Trincheiras	IP %	Argila (%)	IA
TR1 – B1	17,2	34,9	0,49
TR1 – B2	30,7	39,4	0,78
TR1 – B3	19,6	27,9	0,70
TR1 – B/C	12	27,9	0,43
TR1 – C	14,6	37,9	0,38
TR3 – A/B	18,1	34,4	0,52
TR3 – B1	33,3	53,1	0,63
TR3 – B2	24,6	27,4	0,90
TR3 – C	15,7	27,1	0,58
TR7 – B1	1,5	21,5	0,07
TR9 – B1	15,3	23,5	0,65
TR9 – B2	26,1	39,6	0,66
TR9 – B3	15,3	40,1	0,38

Valores menores que 0,75 indicam argilas inativas, valores entre 0,75 e 1,25 argilas normais e valores acima de 1,25 argilas ativas

IP – Índice de Plasticidade; IA – Índice de Atividade

A atividade da argila indica o quanto as argilas presentes no solo podem ser reativas. Podendo alguns solos ter altos teores de argila, mas estas não serem reativas (valores abaixo de 0,75) entretanto pode-se ter solos com baixas porcentagens de argila e estas serem mais reativas. Este comportamento é importante pois vai influenciar a dinâmica da água.

A atividade da argila pode servir como indicação da maior ou menor influência das propriedades mineralógicas e químicas-coloidal, da fração argila, nas propriedades geotécnicas de um solo. Mesmo que se tenha um solo com elevado teor de argila este pode ter índices mais baixos do que aqueles com pequenos teores de argila, isso ocorre por causa da composição mineralógica dos argilominerais. O cálculo do índice de atividade é feito dividindo-se o índice de plasticidade pela porcentagem da fração argila (Pinto, 2006)

Os resultados mostraram que nenhuma argila reativa foi encontrada, ou pelo menos, a quantidade de argila com reatividade não é suficiente para alterar o comportamento do solo. Somente dois horizontes apresentaram argilas normais (com valores maiores que 0,75), o horizonte “B2” da TR1 (0,78) e o horizonte “B2” da TR3 (0,90).

## 6.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS

Os valores de massa específica do solo natural ( $\gamma_{\text{nat}}$  g/cm<sup>3</sup>), massa específica seca ( $\gamma_d$  g/cm<sup>3</sup>), teor de umidade (w%), índice de vazios (e), porosidade (n%) e grau de saturação (SR%) podem ser observados nas Tabelas 18 e 19, tanto para a trajetória de secagem quanto para a trajetória de umedecimento, que mostram também a massa de solo, a tara do anel e o volume correspondentes, necessários para os cálculos realizados.

Tabela 18 - Caracterização das amostras de solo para cada horizonte na trajetória de secagem

Trincheiras	Massa (g)	Tara anel	Volume (cm <sup>3</sup> )	W (%)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	n (%)	SR (%)
TR1-A	57,67	48,78	40,80	37,53	2,627	1,41	1,02	1,56	60,86	63,18
TR1-B	59,18	47,52	37,72	36,95	2,780	1,56	1,14	1,43	58,88	71,88
TR1-C	61,73	47,34	37,33	34,54	2,834	1,65	1,22	1,31	56,61	74,01
TR3-A	52,53	46,71	38,88	54,65	2,561	1,35	0,87	1,94	65,76	72,85
TR3-B2	61,46	47,26	38,29	37,65	2,815	1,60	1,16	1,40	58,42	75,18
TR3-C	61,60	47,76	36,70	33,90	2,765	1,67	1,25	1,21	54,67	77,72
TR7-A	56,53	48,32	39,49	28,76	2,662	1,43	1,11	1,40	58,09	54,46
TR7-B2	58,79	49,10	39,45	34,91	2,759	1,49	1,10	1,50	59,89	64,12
TR7-C1	58,13	47,32	39,12	22,75	2,857	1,48	1,21	1,36	57,62	47,83
TR9-A	43,32	49,21	40,02	55,14	2,663	1,08	0,69	2,70	74,32	51,45
TR9-B3	69,74	47,49	39,24	29,28	2,766	1,77	1,37	1,01	50,30	80,03
TR9-C	70,84	47,94	39,44	27,64	2,980	1,79	1,40	1,11	52,78	73,70

Sendo: w (%) a umidade natural de campo;  $\gamma_s$  a massa específica dos sólidos;  $\gamma_{nat}$  a massa específica natural;  $\gamma_d$  a massa específica seca; e o índice de vazios; n (%) a porosidade calculada e SR (%) o grau de saturação.

Os valores apresentados nas tabelas mostram os cálculos utilizados nos corpos de prova usados no ensaio de curva de retenção para a trajetória de secagem e umedecimento. Os valores mostrados são referentes a média obtida através dos 3 anéis utilizados para cada horizonte (em cada trajetória), sendo que os corpos de prova que apresentaram valores muito diferentes foram descartados.

Tabela 19- Caracterização das amostras de solo para cada horizonte na trajetória de umedecimento

Trincheiras	Massa (g)	Tara anel	Volume (cm <sup>3</sup> )	W (%)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	n (%)	SR (%)
TR1-A	49,55	48,54	39,26	38,09	2,627	1,26	0,91	1,88	65,22	53,50
TR1-B	62,73	48,21	38,82	35,99	2,780	1,61	1,18	1,34	57,33	74,48
TR1-C	60,43	46,95	36,93	36,25	2,834	1,63	1,20	1,36	57,62	75,52
TR3-A	40,96	47,61	39,11	24,74	2,561	1,04	0,84	2,05	67,19	30,78
TR3-B2	58,48	48,51	39,15	17,94	2,815	1,49	1,26	1,22	55,00	41,31
TR3-C	50,59	48,13	37,81	14,29	2,765	1,33	1,17	1,36	57,65	29,02
TR7-A	41,57	50,04	39,77	4,69	2,662	1,04	0,99	1,66	62,48	7,52
TR7-B2	53,89	49,48	39,01	30,16	2,759	1,38	1,06	1,59	61,53	52,03
TR7-C1	57,11	48,19	39,45	22,03	2,857	1,44	1,18	0,99	58,48	44,71
TR9-A	56,53	48,05	39,09	37,13	2,663	1,44	1,05	1,52	60,39	64,84
TR9-B3	71,21	47,25	38,14	29,35	2,766	1,86	1,44	0,91	47,75	89,23
TR9-C	70,92	49,04	39,95	28,26	2,980	1,77	1,38	1,15	53,53	72,99

Sendo: w (%) a umidade natural de campo;  $\gamma_s$  a massa específica dos sólidos;  $\gamma_{nat}$  a massa específica natural;  $\gamma_d$  a massa específica seca; e o índice de vazios; n (%) a porosidade calculada e SR (%) o grau de saturação.

Nas Tabelas 18 e 19 observa-se que as umidades (w %), são sempre maiores nos horizontes “A”, de cada trincheira, menos para a TR7 onde os valores são bem menores, principalmente na trajetória de umedecimento, o que pode ser explicado pela presença de matéria orgânica, que é capaz de reter mais umidade neste horizonte. A TR7 por estar na parede de antigo escorregamento pode não ter quantidade de matéria orgânica suficiente que influencie no comportamento da água. O índice de vazios e a porosidade, ambos relacionados também com a quantidade de matéria orgânica constituinte deste solo, tendem a diminuir com a profundidade, e novamente a TR7 apresenta valores um pouco diferentes. O grau de saturação apresenta valores maiores para os horizontes com maiores quantidades de finos, geralmente os horizontes “B”.



Quando se analisa as massas específicas dos sólidos, no perfil, o horizonte “A” é o que têm menor valor, pois seus constituintes são mais leves (matéria orgânica). O maior valor encontrado nos ensaios deste trabalho ( $2,98 \text{ g/cm}^3$ ) foi para o horizonte “C” da TR9, indicando a ausência de grandes quantidades de óxido de ferro nestes perfís. A massa específica do solo vai ser influenciada pela massa específica dos sólidos, seguindo a mesma tendência. Somente o horizonte “B” da TR9 não apresenta valor correspondente, sendo um valor maior que o do horizonte “C”, embora a massa específica de sólidos seja menor.

Os valores de grau de saturação mais baixos também foram para o horizonte “A”, ou seja, é o horizonte que satura mais rapidamente. Chama a atenção a TR7 “A” que têm o menor valor de SR (7,52%) para a trajetória de umedecimento, este valor pode ser explicado pela grande variação e dificuldade de absorção da água (que não seja por contrapressão) da matéria orgânica, no horizonte superficial, que também vai influenciar na granulometria, pois na trajetória de secagem o valor de SR vai para 54,46%. A trincheira que apresenta valores mais uniformes para o SR é a TR1, indicando que esta trincheira retém a água de forma mais homogênea, sem que um horizonte sature mais que o outro, deixando de criar uma zona de saturação de um horizonte para outro, evitando assim uma descontinuidade de retenção entre os horizontes, o que poderia levar ao rompimento.

Os maiores valores de índice de vazios encontrados são dos horizontes “A”, menos para a trincheira TR7 (trajetória de secagem). Este índice vai ter uma influência da concentração de areia na granulometria e que no ensaio de limite todos deram NP, o que está de acordo com a situação sugerida por Feuerhamel (2007), que descreve, que o índice de vazios maior, indica um solo que apresenta um percentual maior de macroporos do que de microporos, enquanto que, quando o solo apresenta índice de vazios menor, o percentual de macroporos é menor que o de microporos, sendo que a dimensão e a conexão entre os vazios menores mostra uma estrutura que se apresenta mais homogênea e fechada. Assim quanto maior o índice de vazios do solo, menor será sua capacidade de retenção da água.

A caracterização das amostras dos solos tem grande importância para entender como este solo vai se comportar em relação a dinâmica da água, assim como a porosimetria.

### 6.2.1 - POROSIMETRIA

Os ensaios de porosimetria foram realizados para todas as trincheiras e os gráficos montados em relação ao diâmetro do poro e o Log diferencial do volume. Os gráficos da Figura 34 mostram os resultados para estes horizontes, podendo assim comparar melhor um

com o outro. Nestes gráficos pode-se observar dois principais picos, um entre  $0,01\mu\text{m}$  e  $0,1\mu\text{m}$ , representando os microporos, e outro pico próximo a  $10\mu\text{m}$ , representando os macroporos.

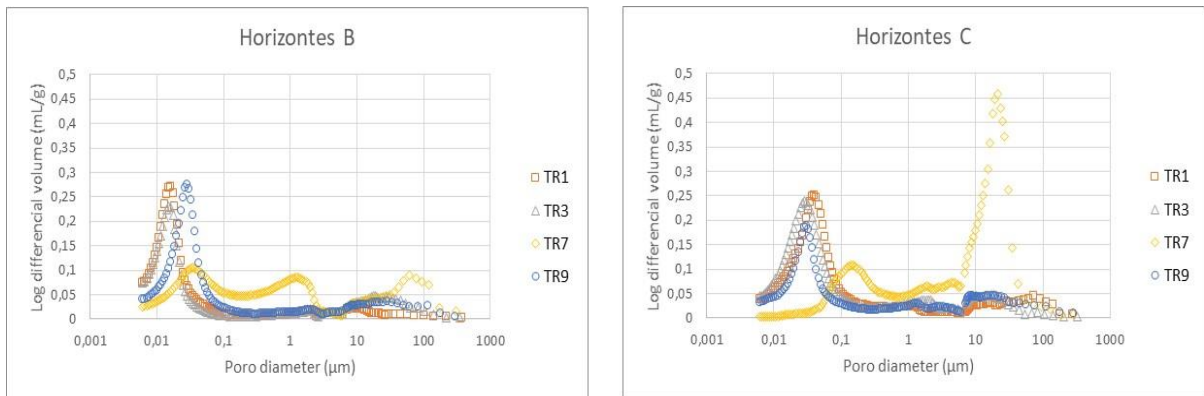


Figura 34 - Diâmetro dos poros dos horizontes B e C de todas as trincheiras

As trincheiras TR1, TR3 e TR9 seguem um padrão muito próximo em relação a distribuição dos poros, apresentando maior frequência de microporos (onde no gráfico aparecem os maiores picos, entre  $0,01$  e  $0,1$  micrometros) e uma frequência menor de macroporos (onde no gráfico aparece um pico menor entre  $10$  e  $100$  micrômetros). Apenas a trincheira TR7 aparece com um comportamento diferente, sendo no horizonte “C” o maior pico entre  $10$  e  $100$  micrometros, mostrando uma maior frequência de macroporos e uma frequência um pouco menor, próximo de  $0,1$  micrometros. No horizonte “B”, esta trincheira mostra uma melhor distribuição da porosidade, com picos em  $0,04\mu\text{m}$ ,  $1,5\mu\text{m}$  e  $82\mu\text{m}$

A trincheira TR9, embora apresente a mesma distribuição para os intervalos, no horizonte “B”, em relação à microporosidade, tem um leve deslocamento, mostrando poros um pouco maiores do que nas trincheiras TR1 e TR3 (a TR7 mostrou resultados diferentes das outras). No horizonte “C”, o pico dos microporos está menor que os outros, mostrando um horizonte com material mais grosso, como mostrou a granulometria, pois para solos mais arenosos, o tamanho dos poros tende a ser maior, como foi observado neste ensaio.

Kong et al (2017) mostram que a distribuição dos tamanhos dos poros influenciou nas propriedades geotécnicas levantadas do estudo, que tinha como objetivo relacioná-las com o intemperismo, e sua influência na ocorrência de movimentos gravitacionais de massa.

Pode-se observar também estas diferenças nos gráficos de porcentagem total de mercúrio introduzido e os tamanhos dos poros, como mostra a Figura 35. Novamente as curvas da TR7 se distanciaram das outras, mostrando um comportamento diferente.

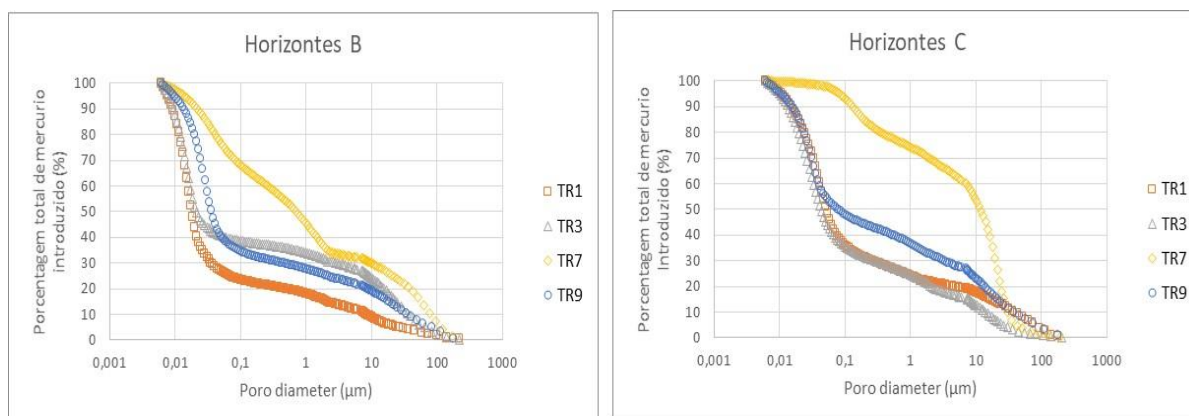


Figura 35 - Gráficos com a porcentagem total de mercúrio introduzido e o tamanho dos poros para os horizontes B e C de todas as trincheiras

O comportamento das curvas de intrusão de mercúrio, mostra uma maior quantidade de macroporos para a TR7, mas especialmente no horizonte “C”. Sun et al. (2016), em seu trabalho relata a relação entre a distribuição da porosidade e as curvas de retenção a água do solo, mostrando que ao mudar a umidade do solo, acontece uma mudança na estrutura dos agregados de argila, o que leva a uma mudança nos poros inter-agregados. Neste sentido as trincheiras que sofreriam maior mudança, seriam a 1 e a 3, pois foram as que se mostraram mais argilosas.

Cerri et al. (2020) relatam a importância da compreensão da porosidade do solo nos estudos sobre a capacidade de drenagem dos solos, e encontrou no seu trabalho um padrão de distribuição dos poros, onde os horizontes “A” e “B” apresentam maior quantidade de macroporos, indicando maior eficiência no fluxo de água, enquanto o horizonte “C” tem uma concentração maior de microporos, levando a uma maior probabilidade de saturação destes solos. Estes resultados diferem dos encontrados neste estudo, embora tenham sido realizados na Serra do Mar, no litoral de São Paulo.

## 6.2.2 - ÁGUA NO SOLO INDEFORMADO

### 6.2.2.1 - PERMEABILIDADE

Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para os fluxos horizontal e vertical para os horizontes “B” e “C” de cada trincheira (TR1, TR3, TR7 e TR9) são apresentados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Valores de condutividade hidráulica do fluxo vertical para os horizontes B e C de todas as trincheiras

	TR1	TR3	TR7	TR9
B Vert	$2,34 \times 10^{-7}$ m/s	$4,08 \times 10^{-4}$ m/s	$1,42 \times 10^{-4}$ m/s	$1,05 \times 10^{-4}$ m/s
C Vert	$1,36 \times 10^{-4}$ m/s	$2,25 \times 10^{-4}$ m/s	$1,45 \times 10^{-3}$ m/s	$2,24 \times 10^{-3}$ m/s

Tabela 21 - Valores de condutividade hidráulica do fluxo horizontal para os horizontes B e C de todas as trincheiras

	TR1	TR3	TR7	TR9
B Hor	$1,62 \times 10^{-5}$ m/s	$1,02 \times 10^{-3}$ m/s	$4,54 \times 10^{-4}$ m/s	$7,26 \times 10^{-6}$ m/s
C Hor	$6,60 \times 10^{-6}$ m/s	$6,21 \times 10^{-4}$ m/s	$1,89 \times 10^{-4}$ m/s	$5,90 \times 10^{-4}$ m/s

A trincheira TR1 foi a que apresentou menores valores de condutividade hidráulica em ambos os fluxos (vertical e horizontal), principalmente no horizonte “B” para o fluxo vertical ( $2,34 \times 10^{-7}$  m/s), indicando uma maior dificuldade de a água infiltrar neste horizonte. No horizonte seguinte (“C”) desta mesma trincheira (TR1), acontece o contrário, a água se movimenta mais rapidamente na vertical do que na horizontal.

Somente os horizontes “C” da TR3 e “B” da TR7 apresentam isotropia, ou seja, fluxos com a mesma ordem de grandeza para as direções vertical e horizontal. Todos os

outros horizontes são anisotrópicos, apresentam fluxos com valores diferentes em relação a permeabilidade para as direções vertical e horizontal. A TR1 foi a que apresentou a maior diferença nas condutividades hidráulicas para a direção vertical e horizontal, esta diferença pode estar relacionada a depósitos coluvionares, pois camadas de solos depositadas em diferentes momentos podem ter criado esta condição, principalmente no horizonte “B”, que não está tendo influência da rocha como no horizonte “C”.

O ensaio do horizonte “B” desta trincheira (TR1) demorou mais de uma semana para saturar, a granulometria do horizonte não mostrou no ensaio sem defloculante presença de argila ou grande porcentagem de silte. Pode ter acontecido uma deformação do corpo de prova na hora de moldá-lo, que explicaria a maior dificuldade do fluxo de água, mas quando desenhado não apresentou nenhuma deformidade como mostra a foto da Figura 36.

Esta anisotropia da TR1 pode estar sendo influenciada pela presença de moradores da região, que além de plantar bananeiras, tentam construir casas (como invasão), o que estava ocorrendo no dia de trabalho de campo, em que fomos coletar amostras e haviam alguns moradores cortando o talude para construção de moradias irregulares. A granulometria desta trincheira mostrou microagregação no ensaio sem defloculante e no ensaio com defloculante mostrou maior quantidade de argila no horizonte “C”, que deveria levar a uma drenagem mais deficiente neste horizonte, o que não acontece, este horizonte tem uma condutividade hidráulica melhor do que o horizonte “B”. A porosimetria mostra que no horizonte “B” o pico de microporos se apresenta com diâmetros menores, o que justifica esta diferença em relação à condutividade. E na Figura 35, os gráficos da porcentagem total de mercúrio introduzido, o horizonte “B” da TR1 é o que mostra a maior dificuldade de introdução deste mercúrio, mostrando uma porosidade com maior dificuldade de fluxo.



Figura 36 - Corpo de prova do ensaio de condutividade hidráulica do horizonte B da TR9

A condutividade hidráulica observada na TR3 mostra que para o horizonte “B” o comportamento do fluxo da água é o mesmo que na TR1, sendo que os valores nas duas direções são diferentes, anisotrópicos (tanto o fluxo na vertical  $4,08 \times 10^{-4}$  m/s, como na horizontal,  $1,02 \times 10^{-3}$  m/s, são maiores na TR3), mas é um horizonte em que a água tem uma velocidade de infiltração horizontal mais rápida do que na vertical.

O horizonte “C” já apresenta um comportamento um pouco diferente do outro tendo um valor um pouco menor na infiltração, sendo que a ordem de grandeza não muda ( $10^{-4}$  m/s). A granulometria desta trincheira não sofre grande mudança entre os horizontes “B” e “C”, o que está de acordo com a condutividade hidráulica que é um pouco maior apenas no horizonte “B” na direção vertical. A porosimetria desta trincheira não se apresenta muito diferente entre os dois horizontes analisados, apenas um pequeno deslocamento no diâmetro dos microporos para o horizonte “C” (diâmetro um pouco maior). Mostrando maior uniformidade entre os horizontes, que está de acordo com os valores encontrados nesta trincheira.

A TR7 também apresenta no horizonte “C” uma condutividade hidráulica maior na vertical mostrando uma maior infiltração do que deslocamento horizontal da água (anisotrópico), sendo que a diferença entre os fluxos é um pouco menor que na TR1. Já o horizonte “B” não tem alteração na grandeza ( $10^{-4}$  m/s), sendo isotrópico, mas a velocidade é um pouco menor na vertical (1,42) que na horizontal (4,54), que mesmo sendo muito pouca a diferença segue o mesmo comportamento das trincheiras TR1 e TR3. A granulometria e a porosimetria desta trincheira são as mais diferentes, é a trincheira mais arenosa, e a única que

na porosimetria apresentou uma inversão em relação ao diâmetro dos poros, ou seja, o maior pico (maior quantidade de poros) está localizado nos poros de maior diâmetro (macroporos). Somente analisando a distribuição da porosidade e a granulometria, os valores de condutividade hidráulica deveriam ser maiores que nas outras trincheiras, o que não ocorre.

A TR9 apresenta no horizonte “B”, uma permeabilidade maior no sentido vertical ( $1,05 \times 10^{-4}$  m/s) do que no sentido horizontal ( $7,26 \times 10^{-6}$  m/s), diferente do que acontece nos outros horizontes “B”, das outras trincheiras. O horizonte “C” tem um valor maior da condutividade hidráulica na direção vertical ( $2,24 \times 10^{-3}$  m/s), mostrando que a infiltração é facilitada em relação ao deslocamento horizontal da água ( $5,90 \times 10^{-4}$  m/s). A ordem de grandeza deste horizonte é igual à do horizonte “C” da TR7 ( $10^{-4}$  m/s na horizontal, e  $10^{-3}$  m/s na vertical). A TR7 e o horizonte “C” da TR9 foram os solos mais arenosos, e quanto maior a granulometria, maior a macroporosidade, como pode ser observado no ensaio de porosimetria, e esta constituição do solo facilita a drenagem, e dificulta a retenção da água.

As amostras de solo do horizonte “C” (de todas as trincheiras) foram mais rapidamente saturadas que as amostras do horizonte “B” (de todas as trincheiras), sendo que a trincheira TR1 foi a que mais demorou para saturar e apresentou maior variação no tempo. O que está de acordo com a granulometria encontrada, com um material mais arenoso nestes horizontes, principalmente para as trincheiras TR7 e TR9.

A ordem de grandeza tem uma variabilidade grande nas trincheiras TR1 e TR9, e as trincheiras TR3 e TR7 não tem uma variabilidade significativa embora elas apresentem diferenças na granulometria, o que demonstra que só a textura não define a permeabilidade, mas tem que se levar em conta a porosimetria do solo (distribuição dos poros). Todos eles apresentaram uma significativa microagregação das partículas o que faz com que este solo se comporte mais como areia do que como argila, no campo, isso explica a ordem de grandeza média baixa para a área ( $10^{-4}$  m/s). Vogt (2012) encontrou resultados para a permeabilidade em seu trabalho no Paraná (na região da Serra do Mar Paranaense), da ordem de grandeza de  $10^{-3}$  m/s, indicando uma permeabilidade melhor para a área estudada por ele, do que a encontrada neste trabalho.

As declividades das trincheiras variaram de 12% a 75% (TR1-25%; TR3-12%; TR7-75%; TR9-70%) A TR1 está em local com uma forma levemente côncava, a TR3 em um platô, a TR7 está em local com forma convexa e a TR9 localizada em uma parte da vertente levemente côncava. A declividade e a forma da vertente influenciam nos seus processos como já foi levantado por Bogaart (2006), Passarela et al (2008) e Nery (2009).

Em relação ao ângulo de inclinação Huat et al (2006) observaram que a infiltração da água diminui com o aumento da declividade da encosta, pois assim a água teria um movimento lateral grande. Neste estudo as trincheiras com maior declividade foram a TR7 e a TR9, mas a trincheira que apresentou maior valor para o fluxo na horizontal foi a TR3, a que tem menor inclinação. O ensaio de mineralogia mostrou que este material é coluvionar, e por ser um material removido, sua estrutura se alterou o que leva a variações na interconectividade dos poros, e conseqüentemente na dinâmica da água. Rosso (2006), em seu trabalho, esclarece que a geometria e as propriedades do solo da vertente são mais importantes nos processos que envolvem as taxas de saturação do que o próprio evento de chuva.

Em estudo realizado por Fonseca (2017), onde foram confeccionados mapas temáticos, um deles indica que a área da bacia onde a cobertura vegetal está menos degradada, representa a área com maior condutividade hidráulica. Sendo caracterizada por ter também, maior infiltração e menor taxa de escoamento superficial. Este comportamento também é percebido neste trabalho, porque a trincheira TR1, se encontra na área mais desmatada, próxima a casas e com plantio de bananeira espalhadas, e é a trincheira que apresenta os menores valores de condutividade hidráulica (variando da ordem de grandeza de  $10^{-4}$  m/s a  $10^{-7}$  m/s).

Liu et al (2017) estudaram a influência dos fluxos da água na instabilidade de encostas e os resultados encontrados demonstraram que os processos de escorregamentos estão estritamente relacionados com a condutividade hidráulica, indicando a importância de seu entendimento. E neste trabalho podemos observar o quanto a condutividade hidráulica pode variar, no perfil e ao longo da encosta. Silva et al. (2014) mostraram, em trabalho realizado sobre a influência das propriedades físicas sobre os escorregamentos, que a diferença de condutividade hidráulica encontrada entre duas porções diferentes de solo estudados pode levar a formação de lençol suspenso com fluxo paralelo à superfície, contribuindo para a instabilidade da encosta. Neste sentido o horizonte “C” de todas as trincheiras estudadas neste trabalho, apresentou infiltração mais rápida (sentido vertical) do que o movimento horizontal, podendo formar uma frente de saturação nestes horizontes.

Embora a granulometria tenha mostrado a TR7 como uma trincheira mais arenosa, o seu comportamento em relação à permeabilidade não é muito diferente das outras trincheiras. A interligação entre os poros pode estar influenciando na condutividade hidráulica, uma vez que poros interligados auxiliam nesta dinâmica (neste caso teria que ter um estudo micromorfológico do solo para poder verificar esta condição). Esta trincheira está



em área de granito, mesmo material de origem do trabalho de Chapuis e Aubertin (2010) que fizeram uma discussão sobre a influência das propriedades do solo originado de granito intemperizado na permeabilidade do solo, indicando um risco de mobilidade das partículas de silte e argila do solo se moverem pelos poros, causando uma instabilidade deste solo. Não foi notado neste trabalho que houve mobilização de argila que estivesse interferindo na condutividade hidráulica. Foi observado solo mobilizado ao longo da encosta e nos perfis analisados.

Quando há o predomínio da fração areia ao longo do perfil de solo, existe um favorecimento da drenagem vertical da água, que percolaria mais facilmente até alcançar a rocha alterada. Assim, mesmo durante eventos de chuvas intensos, a frente de infiltração não levaria ao desenvolvimento de poro-pressões positivas, pois nestas condições não haveria formação de lençol freático suspenso (Coelho, 2017). Neste sentido as trincheiras TR7 e TR9 não formariam uma frente de infiltração. Pode-se observar pela classificação que os solos analisados, quando não submetidos ao defloculante (estão no estado que se encontram no campo) tem uma concentração maior na fração areia, o que faz com que estes solos se comportem favorecendo a drenagem da água de chuva, deixando de formar um lençol suspenso.

Os resultados mostram que o horizonte “B” de todas as trincheiras tem uma permeabilidade horizontal maior do que a vertical, este movimento da água indica uma dificuldade maior de formação da frente de umedecimento neste horizonte, o que impede a formação de uma poropressão positiva, que leva a perda da coesão aparente do solo. Sendo assim estes são solos menos propensos aos escorregamentos causados pela perda desta coesão aparente. Há uma diferença entre a permeabilidade dos horizontes “B” para os horizontes “C”, de todas as trincheiras, resultando em uma possível descontinuidade em relação ao movimento desta água entre eles. A TR7 e TR9 foram as que apresentaram melhor drenagem nos horizontes inferiores (“C”), o que está de acordo com a granulometria mais grossa que eles apresentaram, sendo anisotrópicos, com maior condutividade hidráulica na direção vertical.

#### 6.2.2.2 - CURVA DE RETENÇÃO

Para cada horizonte foram analisados em média três corpos de prova, sendo que em alguns casos houve mais de três, gerando assim, diferentes curvas. A curva resultante para

cada horizonte, nas diferentes trajetórias, foi gerada a partir da média das 3 ou mais curvas obtidas com os corpos de prova. As curvas foram realizadas para a umidade volumétrica (%) e a sucção matricial (kPa), as curvas com os valores de umidade gravimétrica (%), grau de saturação (%) e umidade volumétrica por trincheira (%) podem ser observadas no Apêndice II.

Silva (2005), em seu trabalho de desenvolvimento de um banco de dados de curva de retenção, chama a atenção para o crescimento do número de pesquisas em ambiente acadêmico que utilizam a curva de retenção para a análise dos parâmetros de resistência e percolação dos solos. Estes dois parâmetros citados influenciam diretamente nos processos de escorregamentos.

As diferentes trajetórias de secagem e de umedecimento estão representadas em gráficos para cada horizonte da trincheira correspondente, conforme indicam as Figuras 37 a 41. Nos gráficos estão os pontos experimentais e as curvas modeladas de cada trajetória, mostrando assim a *histerese* para cada horizonte.

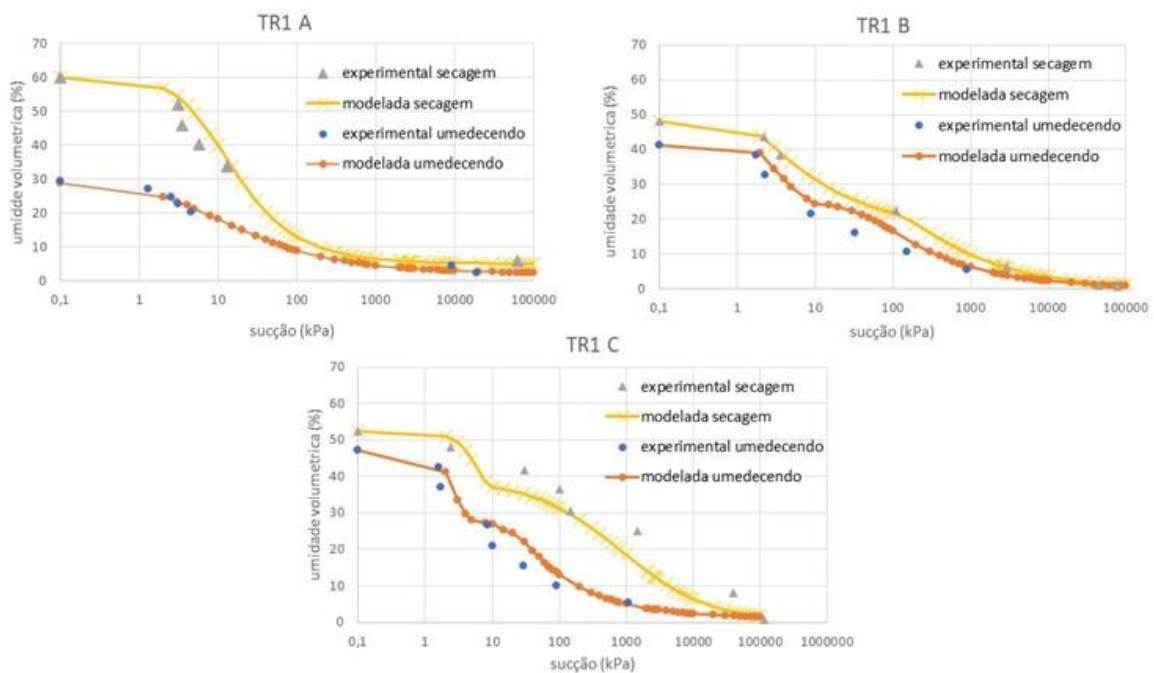


Figura 37 - Curvas de retenção a água de amostras da TR1 para secagem e umedecimento

Os gráficos correspondem a cada horizonte de solo, o gráfico A ao horizonte A, o gráfico B ao horizonte B e o gráfico C ao horizonte C. Nos gráficos, as curvas estão representadas em teor de umidade volumétrico (%) por sucção (kPa). Sendo o valor máximo até 70% de umidade.

Observa-se na Figura 37 um comportamento diferenciado para o horizonte “A”, que é unimodal. As curvas das trajetórias diferentes (de secagem e umedecendo) têm o comportamento de *histerese*, em que o valor de umidade de saturação é bem distante um do outro (curva de secagem próximo a 60% e curva de umedecimento próximo a 30%). O que pode explicar esta diferença é a presença de matéria orgânica, como é um horizonte superficial, a matéria orgânica vai se comportar diferente em relação ao que é absorvido de água diretamente da atmosfera. A curva de secagem começa a perder água nos macroporos e a de umedecimento a ganhar água, perto de 2 kPa e se aproximam em torno de 100 kPa, em 300kPa elas seguem praticamente juntas não havendo mais *histerese*.

As curvas do horizonte “B” são bimodais, e o comportamento em relação a saturação é diferente do horizonte anterior, os valores estão próximos (em torno de 50% para a curva de secagem e 40% para a curva de umedecimento). As curvas começam a perder água próximo a 2 kPa, como o horizonte “A”, a trajetória de umedecimento começa a ganhar água nos macroporos próximo a 10kPa e nos microporos próximo a 70kPa. Para a trajetória de secagem a primeira entrada de ar (macroporos) também vai acontecer próximo a 2kPa, mas a segunda entrada de ar (microporos) só vai acontecer próximo a 100kPa, retendo mais água nesta trajetória. As curvas só se encontram próximo a 10000kPa, ou seja, necessitam de uma sucção maior para não ter mais *histerese*. As curvas não se afastam muito uma da outra, mostrando que a *histerese* não é expressiva para este horizonte. A granulometria sem defloculante mostrou uma porcentagem maior de areia fina e silte para este horizonte, e assim como nos outros ensaios (sem defloculante) não apresentou argila, e por apresentar microagregação do material deveria ter uma drenagem mais eficiente e uma retenção não muito boa.

A porosimetria mostra uma distribuição dos poros com maior presença de microporos do que de macroporos, mas esta distribuição não está afetando muito a retenção da água para as diferentes trajetórias, uma vez que a *histerese* que ocorre não é tão expressiva. A água na trajetória de umedecimento consegue ser bem adsorvida por este horizonte como foi mostrado no gráfico B da Figura 37.

No horizonte “C” as curvas têm um comportamento parecido com o horizonte “B”, elas são bimodais, sendo os valores de saturação muito próximos (52% para a curva de secagem e 47% para a curva de umedecimento). Na curva de secagem só começa a entrar ar nos macroporos próximo a 3kPa, enquanto na curva de umedecimento o ar sai dos macroporos, perto de 2kPa. A maior *histerese* acontece na segunda parte de perda da curva

quando ocorre a entrada de ar (secagem) ou saída de ar (umedecimento) nos microporos, onde a curva de secagem começa a perder água próximo a 100kPa enquanto a outra começa perto de 10kPa. Isto indica que, este solo tem comportamento bem diferente em relação a água de chuva, retendo menos, drenando mais, enquanto que ele saturado retêm mais no intervalo entre 10kPa e 1000kPa. A granulometria deste horizonte mostrou maior porcentagem de argila para o ensaio com defloculante, o que está de acordo com a maior capacidade de retenção mostrada nas curvas. A maior *histerese* mostra que este solo mesmo tendo maior quantidade de material da fração argila, não consegue absorver a água gotejada tão bem quanto o horizonte anterior. A porosimetria mostra os microporos com um diâmetro um pouco maior do que no horizonte anterior, mas que segue a mesma distribuição, o que muda é a quantidade de material da fração argila como foi mostrado na granulometria com defloculante.

As curvas de retenção à água “B” e “C”, mostradas na Figura 37 têm um comportamento condizente com a porosimetria, onde há uma frequência maior de microporos do que macroporos, indicando curvas bimodais como as apresentadas. Ao observar os gráficos de introdução de mercúrio (Figura 35), o horizonte “B” é o que mostra maior dificuldade de passagem, embora tenha menor quantidade de material fino do que o horizonte “C”. Este também foi o horizonte que mostrou a maior dificuldade de permeabilidade, o que condiz com estes resultados.

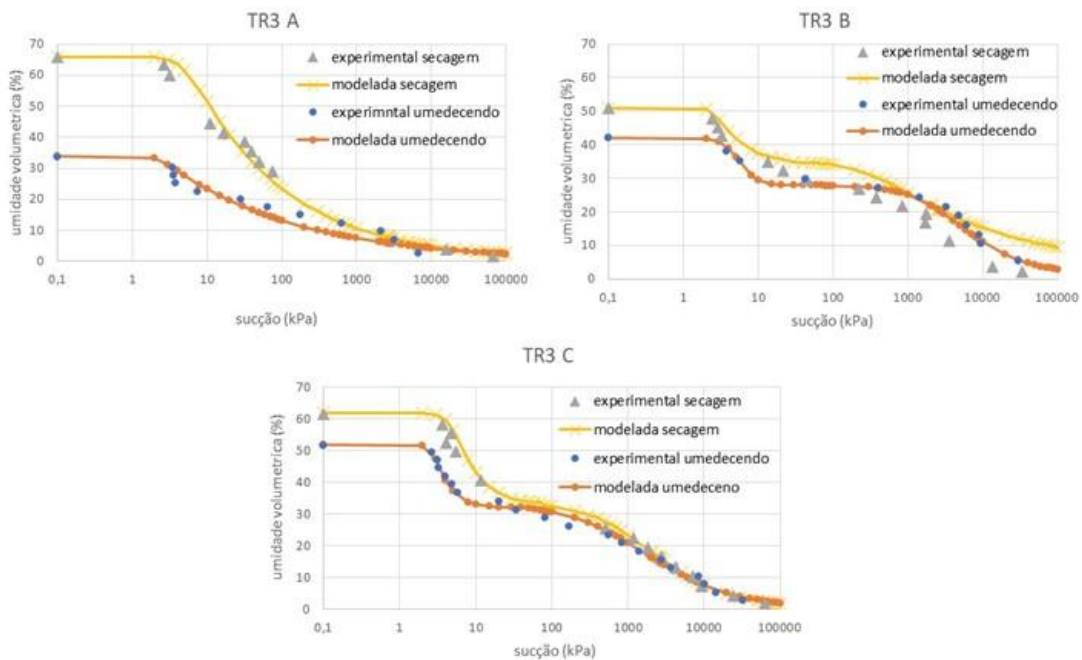


Figura 38 - Curvas de retenção a água de amostras da TR3 para secagem e umedecimento

Os gráficos correspondem a cada horizonte de solo, o gráfico A ao horizonte A, o gráfico B ao horizonte B e o gráfico C ao horizonte C. Nos gráficos, as curvas estão representadas em teor de umidade volumétrica (%) por sucção (kPa). Sendo o valor máximo até 70% de umidade.

O horizonte “A” mostra uma disparidade significativa entre as curvas até próximo a 100kPa onde elas se encontram e seguem juntas. Este horizonte é unimodal, e esta diferença de saturação (curva de secagem a 66% e curva de umedecimento a 34%), pode ser explicada pela presença da matéria orgânica neste horizonte superficial. Este foi o horizonte que apresentou o maior valor de saturação de todas as trincheiras. As curvas na trajetória de secagem começam a perder água próximo a 5kPa e na trajetória de umedecimento a ganhar água 2kPa, e se juntam perto de 100kPa, onde acaba a *histerese*.

Tanto o horizonte “B” quanto o “C” tiveram comportamentos muito próximos, sendo que no “B” a saturação se distanciou um pouco (curva de secagem 44% e de umedecimento 33%), enquanto que no gráfico “C” a diferença de saturação é bem menor. No horizonte “B” a curva de secagem começa a perder água nos macroporos próximo a 2kPa (entrada de ar) assim como a curva de umedecimento (saída de ar) elas se aproximam próximo a 800kPa, e se afastam novamente próximo a 10000kPa, onde se apresenta a *histerese*. No horizonte “C” a *histerese* acontece nas baixas sucções, como nas outras curvas (Figuras 37, 39 e 40), elas se juntam próximo a 30kPa. Os dois horizontes têm curvas

bimodais, sendo o horizonte “C” o que apresenta valores de saturação maiores, mas perde água mais rapidamente em menores sucções (nos macroporos), até aproximadamente 10kPa, depois deste valor de sucção, o horizonte “B” é capaz de reter melhor a água, embora a granulometria destes horizontes sejam muito parecidas, ao observar a porosimetria existe um pequeno deslocamento do pico dos microporos no horizonte “C”, mostrando que estes poros têm um diâmetro maior que no horizonte “B”.

O horizonte A foi o que teve a menor capacidade de reter água em altas sucções matriciais, mas foi o que teve maior retenção para a curva de secagem nas baixas sucções (água retida nos macroporos). Seguido do horizonte “C” e depois pelo horizonte “B”, comparando a mesma sucção matricial, com valores baixos. Para valores altos de sucção, há um rearranjo dos horizontes em relação a retenção, sendo o horizonte “A” o que tem a drenagem facilitada, seguido do horizonte “C” e por fim o “B”. Resultados de acordo com a porosimetria, que mostraram maior microporosidade para os horizontes “B” e “C”, embora não tenha resultado de porosimetria para o horizonte “A”, sabe-se que este tem a influência da matéria orgânica, e com o horizonte “B” apresentando diâmetros menores para a microporosidade, justificando sua maior retenção, embora a granulometria com defloculante seja bem parecida.

A drenagem para os horizontes “B” e “C” não é muito eficiente em relação a curva de umedecimento, como acontece com todas as amostras, por conta da dificuldade da água gotejada de expulsar o ar entre os poros, e mesmo que o material esteja microagregado, como foi mostrado na análise de granulometria sem defloculante, as curvas estão próximas (pequena *histerese*), ou seja, estes horizontes, principalmente em relação à microporosidade, conseguem reter bem a água da chuva (seria a retenção relativa a curva de umedecimento), pois a água gotejada simula a água da chuva ao chegar no solo, por isso, mesmo o solo não estando saturado totalmente, ele não tem capacidade de absorver mais a água e começa a drenar.

A comparação entre as curvas pode ser observada no Apêndice II, onde os gráficos das curvas com umidade volumétrica e gramimétrica são mostrados por trincheira comparando o comportamento entre os diferentes horizontes do perfil.

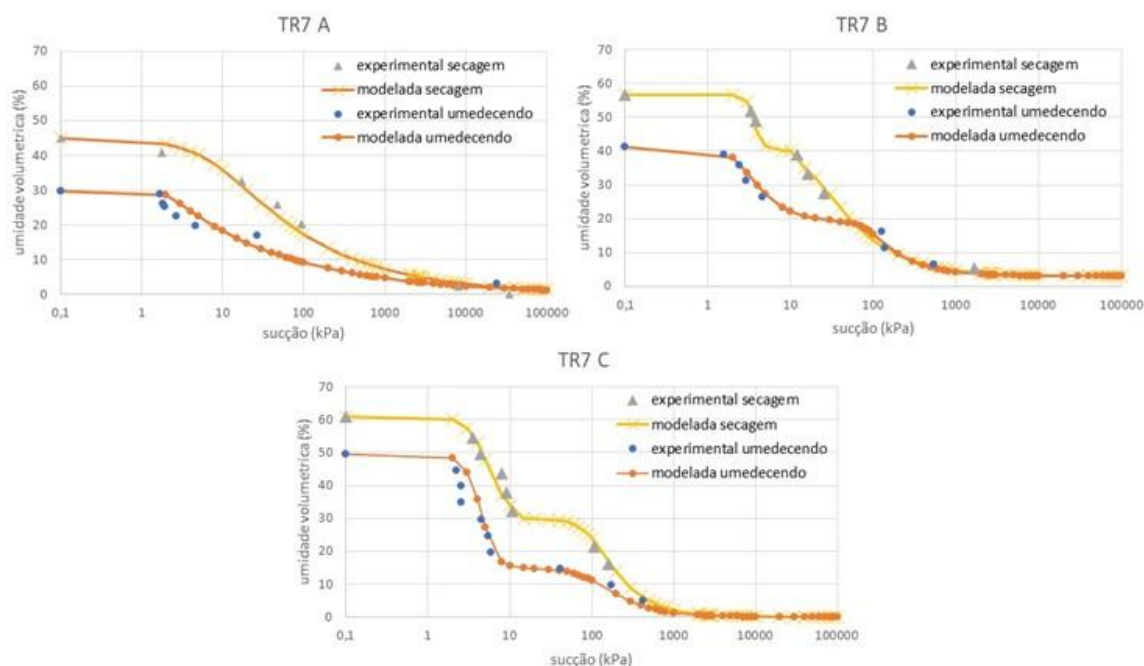


Figura 39 - Curvas de retenção a água de amostras da TR7 para secagem e umedecimento

Os gráficos correspondem a cada horizonte de solo, o gráfico A ao horizonte A, o gráfico B ao horizonte B e o gráfico C ao horizonte C. Nos gráficos, as curvas estão representadas em teor de umidade volumétrica (%) por sucção (kPa). Sendo o valor máximo até 70% de umidade.

Esta trincheira foi a que apresentou valores com maior diferença para as curvas em relação as outras (Figuras 37, 38 e 40). O horizonte “A” foi o que teve a menor diferença de saturação em relação as outras trincheiras (curva de secagem próximo a 40% e curva de umedecimento próximo a 30%) e também mostrou os menores valores em relação aos outros horizontes da TR7, mostrando que a matéria orgânica não está influenciando muito, o que está de acordo com o ensaio de química de rotina realizado por Gobbi (2017) no Anexo I. A curva de secagem começa a perder água próximo a 2kPa e a curva de umedecimento têm a entrada de ar nos macroporos também próximo a este valor de 2kPa. As curvas se juntam perto de 2000kPa. As curvas são unimodais, e a *histerese* não é tão expressiva quanto nos outros horizontes.

O horizonte “B” foi o que apresentou maior *histerese* entre as curvas de secagem e umedecimento. A entrada de ar nos macroporos para a curva de secagem e a saída de ar para a curva de umedecimento ocorrem antes dos 5kPa, mas a maior diferença ocorre com a perda de água no segundo momento da curva (entrada e saída de ar dos microporos). Para a curva de secagem acontece próxima a sucção de 10kPa e a de umedecimento próxima a 100kPa. A

saturação da curva de secagem ficou perto de 57% e a curva de umedecimento ficou perto de 40%, e elas se juntam perto de 70kPa, a partir deste valor a *histerese* finda. Este horizonte foi o que apresentou as curvas com comportamentos mais distintos. As curvas são bimodais, mostrando que mesmo o material sendo mais arenoso, como mostrou a granulometria, ainda tem material fino suficiente para mostrar curvas com entrada (ou saída) de ar nos microporos, ou seja, são bimodais. Este resultado está de acordo com as curvas de porosimetria, em que este horizonte mostrou uma distribuição dos poros bem uniforme (Figura 34), com um pico na porosidade intermediária (tamanho médio de poros). A drenagem na condição de campo para este horizonte parece facilitada, embora a saída (e entrada de ar) aconteçam em sucções diferentes, pode-se observar que a curva de secagem é capaz de reter melhor a água do que a curva de umedecimento, o que mostra que em um evento de chuva, este solo tem baixa capacidade de retenção da água.

O horizonte “C” foi o que apresentou maior queda no primeiro momento (entrada de ar na trajetória de secagem e saída de ar na trajetória de umedecimento), em baixa sucção matricial, ambas próximas ao valor de 2kPa, sendo que a curva de secagem varia de 60% a 30% de umidade e a curva de umedecimento varia de 50% a 18% de umidade. Este comportamento das curvas em relação a entrada de ar (secagem) e saída de ar (umedecimento) em baixas sucções condiz com a granulometria (bem arenosa) e porosimetria (com o maior pico de distribuição dos poros, na macroporosidade) deste horizonte, por isso há uma concentração maior de macroporos do que de microporos. As curvas só vão se encontrar próximo a 700kPa e são bimodais. Mostrando que mesmo que tenha apresentado maior quantidade de macroporos, o material fino (fração argila) é suficiente para a curva ter este formato (bimodal). Este horizonte apresenta boa drenagem na curva de umedecimento, o que está de acordo com a granulometria mais arenosa desta trincheira.

Esta trincheira está localizada na borda de antiga cicatriz de escorregamento, e foi a que mostrou um comportamento mais diferenciado entre as curvas de retenção, assim como foi na granulometria, sendo a trincheira mais arenosa, na porosimetria com uma regularidade da distribuição no horizonte “B”, uma inversão na distribuição dos poros (tamanho) para o horizonte “C” e deu NP (não plástico) para os horizontes analisados nas curvas de retenção a água.



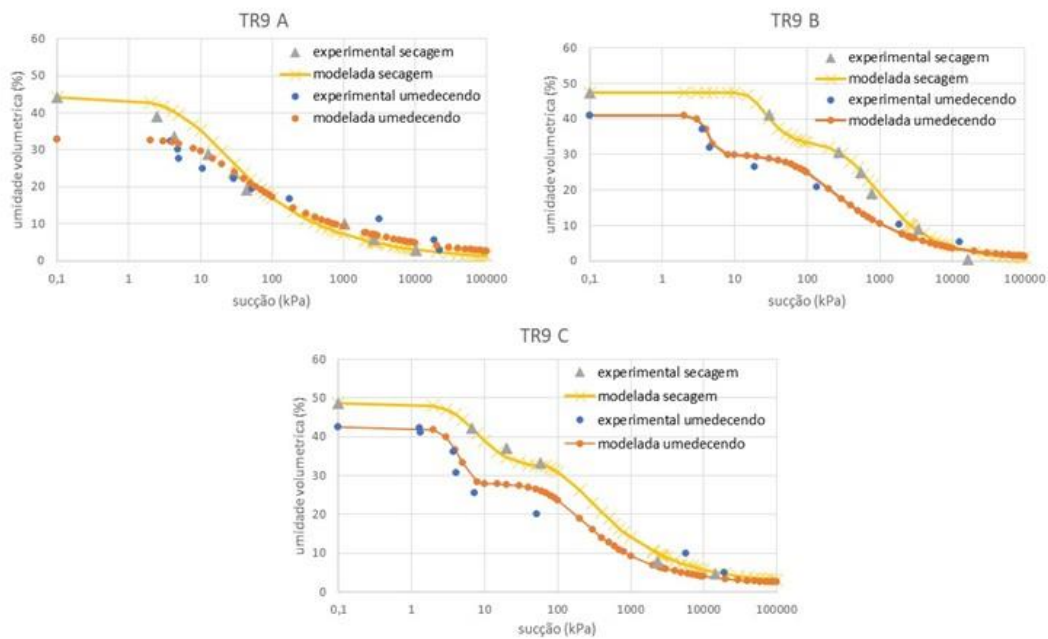


Figura 40 - Curvas de retenção a água de amostras da TR9 para secagem e umedecimento

Os gráficos correspondem a cada horizonte de solo, o gráfico A ao horizonte A, o gráfico B ao horizonte B e o gráfico C ao horizonte C. Nos gráficos, as curvas estão representadas em teor de umidade volumétrica (%) por sucção (kPa). Sendo o valor máximo até 60% de umidade.

O horizonte “A” foi o que teve maior diferença nos valores de saturação (curva de secagem próximo a 44% e curva de umedecimento perto de 33%) e novamente por ser o horizonte superficial têm-se a influência da matéria orgânica atuando (Anexo I), a influência é menor que nas trincheiras TR1 e TR3, mas é maior que na trincheira TR7. São curvas unimodais que começam a perder água (curva de secagem) e ganhar água (curva de umedecimento) nos macroporos, próximo a 3kPa de sucção e se juntam próximo a 40kPa. Comportamento parecido com o mesmo horizonte “A” da TR7. A *histerese* não é tão expressiva quanto nas TR1 e TR3 para este horizonte (“A”), devido a menor concentração de matéria orgânica que estas trincheiras.

No horizonte “B” as curvas saturam com valores de umidades próximos (secagem 47% e umedecimento 41%), ocorre uma diferença em relação às duas curvas para as sucções menores, onde a curva de secagem consegue reter água até 20kPa, quando começa a entrar ar, enquanto a curva de umedecimento perde água bem antes, perto de 3kPa. As curvas só vão se juntar perto de 7000kPa. São curvas bimodais. A curva de secagem, assim como nos outros horizontes consegue reter mais a água, mas neste horizonte em baixa sucção esta retenção se

mostrou bem mais eficaz. A granulometria deste horizonte mostrou grande quantidade de material da fração argila (Tabela 11), o que está de acordo com a retenção maior da água.

No horizonte “C” a *histerese* é menos expressiva e ele satura em ambas as curvas com valores muito próximos (secagem 49% e umedecimento 42%), são curvas bimodais, onde a curva de secagem tem a entrada de ar nos macroporos próximo a 3kPa, enquanto a curva de umedecimento tem a saída de ar nos macroporos próximo a 2kPa. As curvas vão se juntar próximo a 10000kPa de sucção. Embora seja um horizonte bem arenoso, a porosimetria mostrou microporos, embora seja um pico um pouco menor que as trincheiras TR1 e TR3, o que comprova o comportamento bimodal da curva de retenção. A drenagem não mostra uma discrepância tão grande entre as curvas, o que pode ser explicado pela granulometria, que se mostrou mais arenosa, não tendo assim uma quantidade de material da fração argila que possa estar influenciando no comportamento microagregado, levando a uma drenagem mais eficiente na curva de umedecimento.

As amostras do horizonte “A”, em todas as trincheiras foram as que mais sofreram deformações ao serem secas, tendo perda do volume total dentro do anel (Figura 41), mesmo tendo o cuidado de secar em estufa a 60° para evitar a queima da matéria orgânica. Também foram as amostras que mostraram maior diversidade no comportamento das curvas nos gráficos, estas variações se devem à quantidade de matéria orgânica presente nestes horizontes.

A maioria das curvas apresentou altos valores de sucção (as curvas que apresentaram menores valores, não chegando a 100kPa foram as do horizonte “C” da TR7, a trincheira com menor quantidade de argila). Assim como no trabalho de Bora (2015), que também obteve curva de retenção com o método do papel filtro em Morretes/PR, que faz parte da cadeia de montanhas da Serra do Mar, e encontrou valores altos de sucção, o que é uma característica comum em solos argilosos e siltosos.

Na TR7, a granulometria não mostrou grande diferença entre os horizontes “B” e “C”, mas a porosimetria mostrou uma diferença na distribuição dos poros que provavelmente está influenciando nos diferentes comportamentos das curvas, onde no horizonte “C” há uma menor retenção da água (maior quantidade de macroporos). A TR9 mostrou a porosimetria um pouco diferente em relação a TR1 e TR3, e esta distribuição dos poros, assim como a microagregação influenciam nas curvas de retenção da água, apresentando uma drenagem mais eficiente no horizonte “C” desta trincheira.



Figura 41 - Foto de um anel do horizonte A da TR3, utilizado para a curva de umedecimento

Os horizontes “B” e “C” foram os que tiveram maior coerência no comportamento das curvas em relação a granulometria, com exceção de TR3 “B” (na verdade a diferença está entre as amostras que foram coletadas em diferentes momentos) e TR7 “B” para secagem e TR1 “C” para umedecimento. No fenômeno da *histerese*, as curvas de secagem se apresentam sempre acima das curvas de umedecimento, por conta da capacidade de absorção (retenção) da água nas diferentes trajetórias.

A TR7 foi a que apresentou maiores diferenças nas curvas de retenção, e também foi a mesma trincheira que apresentou maior quantidade de areia na granulometria, além de ter sido a única com resultados distintos na porosimetria, apresentando uma melhor distribuição dos poros (microporo, mesoporo e macroporo) no horizonte “B”, e apresentou uma inversão na distribuição dos poros no horizonte “C”, sendo o maior pico nos macroporos, e por isso só foi possível ter resultados para limites em um horizonte (“B1”). Quando se tem uma granulometria mais arenosa, os poros são em menor número e de maior tamanho, e quanto maior o diâmetro dos poros, mais baixa será a sucção desenvolvida (Heidemann, 2015).

Futai (2002) em seu trabalho sobre o comportamento de solos tropicais não-saturados, obteve curvas de retenção da água nos horizontes “B” e “C” e aponta vários pontos de mudanças na curva, associando-os a distribuição granulométrica e composição química e mineralógica. Ele indica que as características argilosas do horizonte “B” fazem com que este

solo retenha mais água, assim como observado neste trabalho onde os solos mais argilosos foram os que mostraram maior retenção.

A mineralogia mostrou a presença de argilominerais do tipo expansivo em quase todos os horizontes estudados, indicando que somente sua presença (a análise feita foi qualitativa, e não quantitativa), não está justificando o comportamento das curvas de retenção.

O estudo da curva característica da água para entender a dinâmica da retenção da água nos solos e associá-los aos movimentos de massa já vem sendo usado há algum tempo, como no trabalho de Wolle e Carvalho (1989). E apresenta resultados muito importantes na compreensão do comportamento da água no solo, por isso também, optou-se por usar estas análises, de curva de retenção da água neste trabalho.

A variação da poropressão causada pelos eventos de chuvas intensos está fortemente associada com os horizontes de solos, e a interface entre estes horizontes pode ter uma função crucial para a instabilidade da vertente (Liu et al, 2017). Assim como a variação da poro-pressão, a *histerese* do solo também tem influência na resistência ao cisalhamento de solos não saturados, resultados do trabalho de Ma et al. (2011) sugerem que o comportamento da *histerese* afeta a distribuição do conteúdo de água no solo da encosta, assim como a distribuição de poros, afetando a resistência do solo.

### 6.2.3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

As Figuras 42 a 47 mostram as envoltórias de resistência ao cisalhamento, no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal”, e os gráficos de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” e de “deslocamento vertical X deslocamento horizontal”, para as três diferentes umidades dos horizontes “B” e “C” da TR1. Com o gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” foram obtidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno).

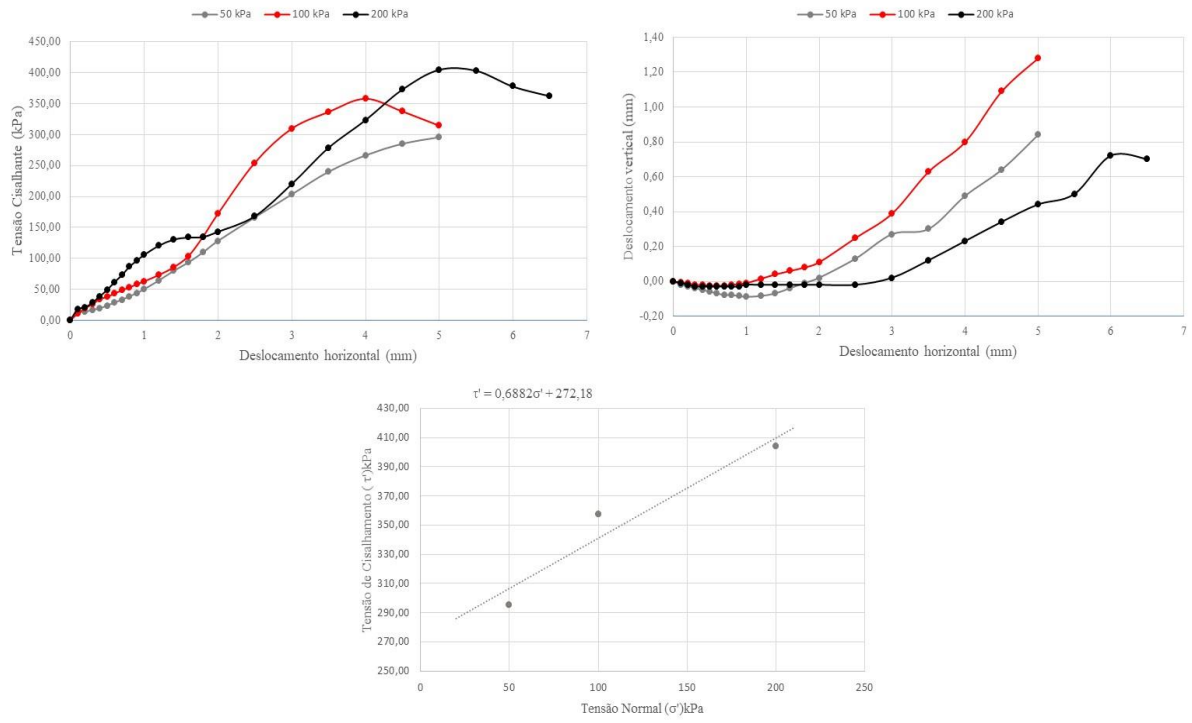


Figura 42 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 B 25%

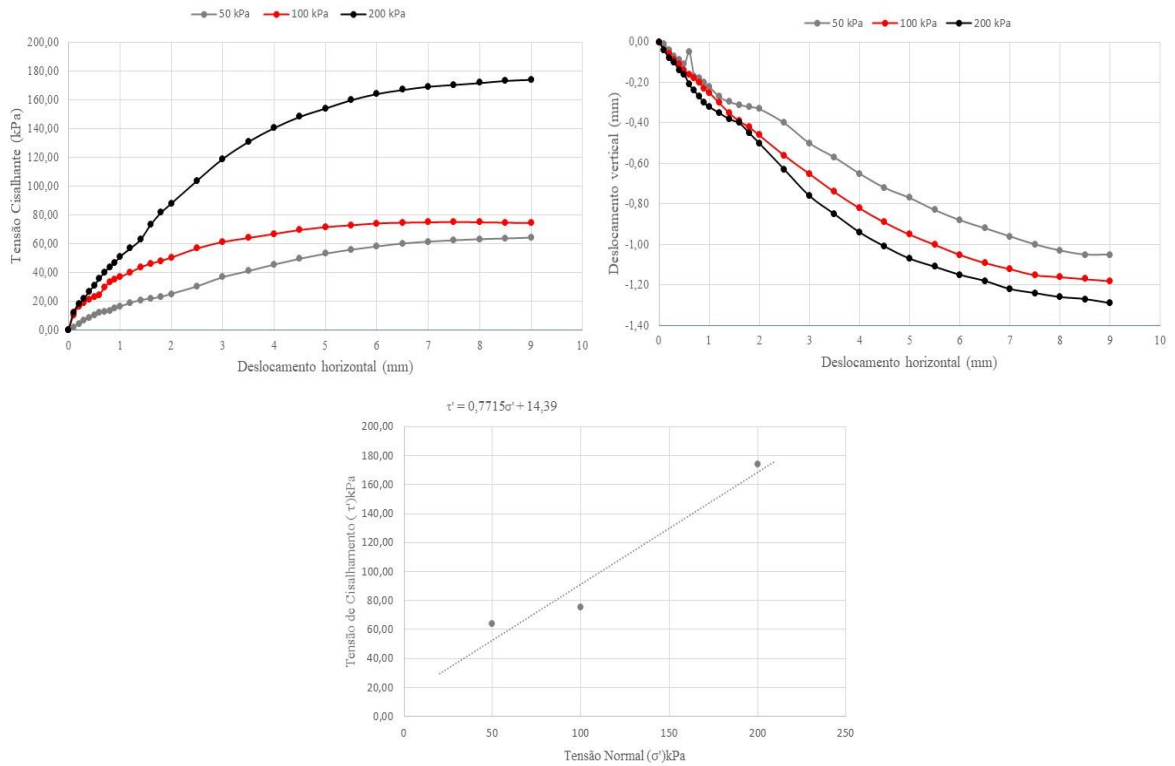


Figura 43 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 B 35%

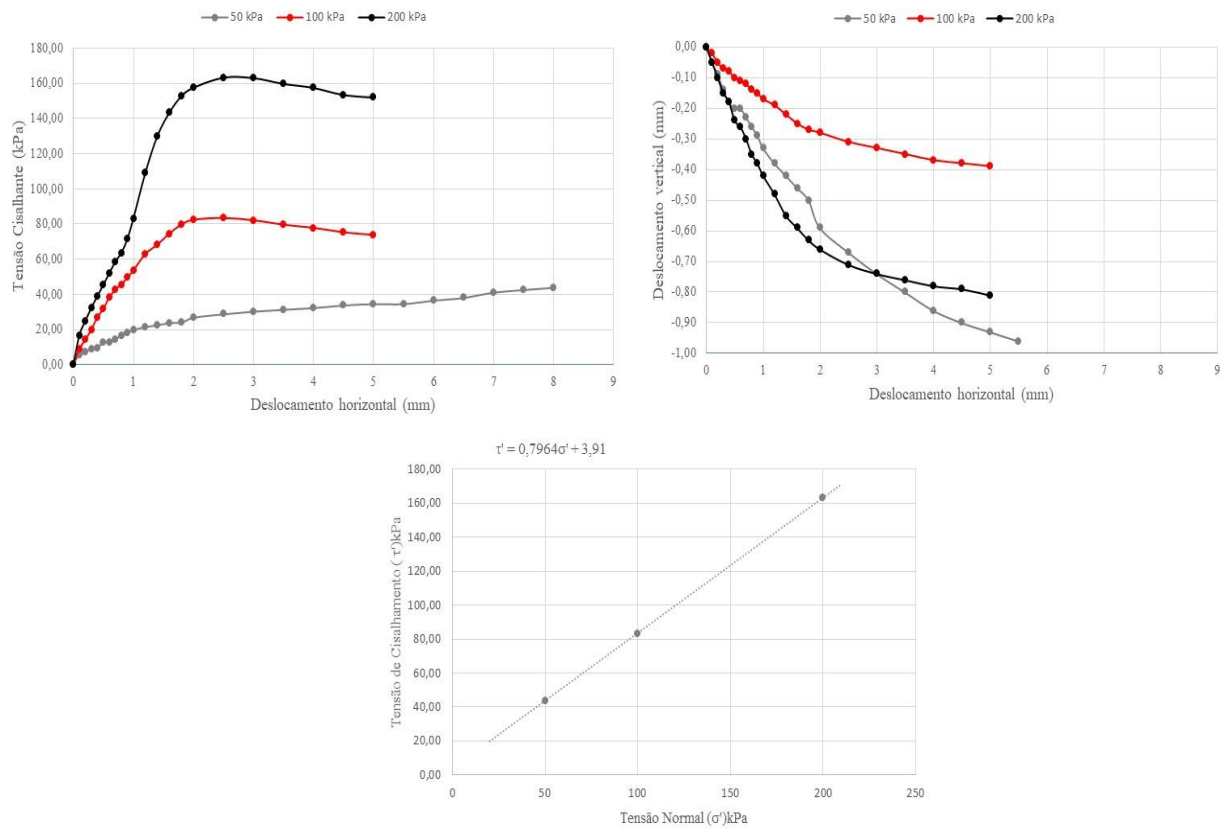


Figura 44 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 B Sat

Chama a atenção no ensaio com 25% de umidade, a coesão muito alta (272,18) em relação às outras umidades. No gráfico de “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” o solo mostra expansividade, ao invés de contração, isto acontece devido ao rearranjo dos grãos do solo ao perder água, este horizonte apresentou argila expansiva na sua composição, que ao ser desidratada contrai, diminuindo o índice de vazios deste solo. Assim, quando submetido ao cisalhamento, os seus grãos se encontravam fortemente ligados, tendendo a rolarem uns sobre os outros, acarretando numa expansão que aumenta a tensão capilar (sucção matricial), representada pela coesão aparente. A umidade de 25% está bem abaixo do limite de plasticidade, e provavelmente no limite de contração (um erro ocorreu durante o ensaio e o resultado deste limite teve que ser descartado), pois o resultado do limite de contração para os outros horizontes desta trincheira foi abaixo de 25% de umidade. O gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostra a curva do ensaio de 200kPa com valores não esperados para o ensaio, embora a tensão máxima atingida esteja de acordo com o valor esperado em relação às outras curvas. As curvas dos ensaios de 100kPa e 200kPa tem uma ruptura residual, enquanto que o ensaio com 50kPa apresenta uma ruptura plástica.

Esta diferença também está relacionada com a contração significativa do solo ao perder água (umidade baixa), mostrando que os argilominerais expansivos presentes estão em quantidades suficientes para modificar a estrutura do solo (contraíndo significativamente) quando este perde umidade.

Diferente do ensaio anterior (25% de umidade) neste (35% de umidade), as curvas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentaram contração para as tensões aplicadas. O teor de umidade maior não permitiu contração do solo e sim expansão antes do cisalhamento, mantendo um índice de vazios maior do que a condição de 25% de umidade. Além disso, a tensão capilar se apresenta menor com o aumento do teor de umidade. Assim os grãos quando submetidos ao cisalhamento encontraram vazios para se acomodarem, sem aumento expressivo da tensão capilar (coesão aparente), ocasionando compressão do solo até a ruptura. A reta (linha de tendência) no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra um resultado de coesão bem menor do que para o ensaio com a umidade menor (25%). As curvas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento do solo. A linha com valor maior de tensão cisalhante é a linha com maior tensão normal aplicada (200kPa), esta linha se destaca das outras, mostrando que nesta tensão normal o solo tem um comportamento diferenciado, assim como no ensaio com a umidade de 25%, onde a linha representativa de 200kPa também teve um comportamento diferenciado em relação às outras. Todas as linhas têm uma ruptura plástica, ou seja, se deformam sem atingir um pico.

Assim como no ensaio anterior (35%), no ensaio saturado as curvas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” mostram a contração do solo, e o ensaio com a normal de 50kPa teve um comportamento um pouco diferente do esperado (apresentando maiores valores para o deslocamento vertical, à medida que aumenta o deslocamento horizontal), pois a tensão vertical aplicada sobre o solo é menor, mas está mostrando que foi mais adensado que o ensaio com a normal maior (100kPa). A linha de tendência do gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” coincide exatamente com os pontos. E as linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o comportamento esperado para o solo, com a tensão cisalhante maior, para a linha com maior tensão normal (200kPa) seguida pela linha de 100kPa e depois a linha de 50kPa, com as tensões máximas mostrando o ponto de rompimento do solo, onde as linhas com as tensões de 100kPa e 200kPa tem uma ruptura residual, enquanto a linha de 50kPa apresenta uma ruptura

plástica. A coesão verdadeira deste solo foi de 3,91kPa, como mostra a envoltória de resistência ao cisalhamento, no ensaio com o corpo de prova saturado. Quando saturado, a tensão capilar é nula e, conseqüentemente, a coesão aparente. A coesão obtida é somente representada pela coesão verdadeira, devido a presença de partículas finas e/ou cimentações naturais.

A granulometria não apresentou quantidade muito grande de material da fração argila. Mas este horizonte quando tem sua umidade reduzida (25%), valor abaixo do limite de plasticidade (36%) tem uma resistência ao cisalhamento considerável, e quando umedecido ele perde rapidamente sua resistência. Aumentando apenas 10% da umidade gravimétrica, o solo tem uma queda de coesão aparente de 272,18kPa para 14,39kPa, uma queda significativa que pode indicar o quanto este solo é suscetível a perda desta resistência, devido à tensão capilar nula (poropressão positiva), ocasionada pelo aumento da umidade.

Este horizonte apresenta montmorillonita na sua composição mineralógica, o que está influenciando no comportamento do ensaio com 25% de umidade gravimétrica, aumentando consideravelmente sua resistência, com o aumento da coesão aparente, porque o ângulo de atrito interno praticamente não se altera. Quanto menor o teor de umidade, maior a contração do solo, menor o seu índice de vazios e maior a tensão capilar (coesão aparente) durante o cisalhamento. As Figuras 45 a 47 mostram os resultados da resistência ao cisalhamento para o horizonte “C” da TR1.



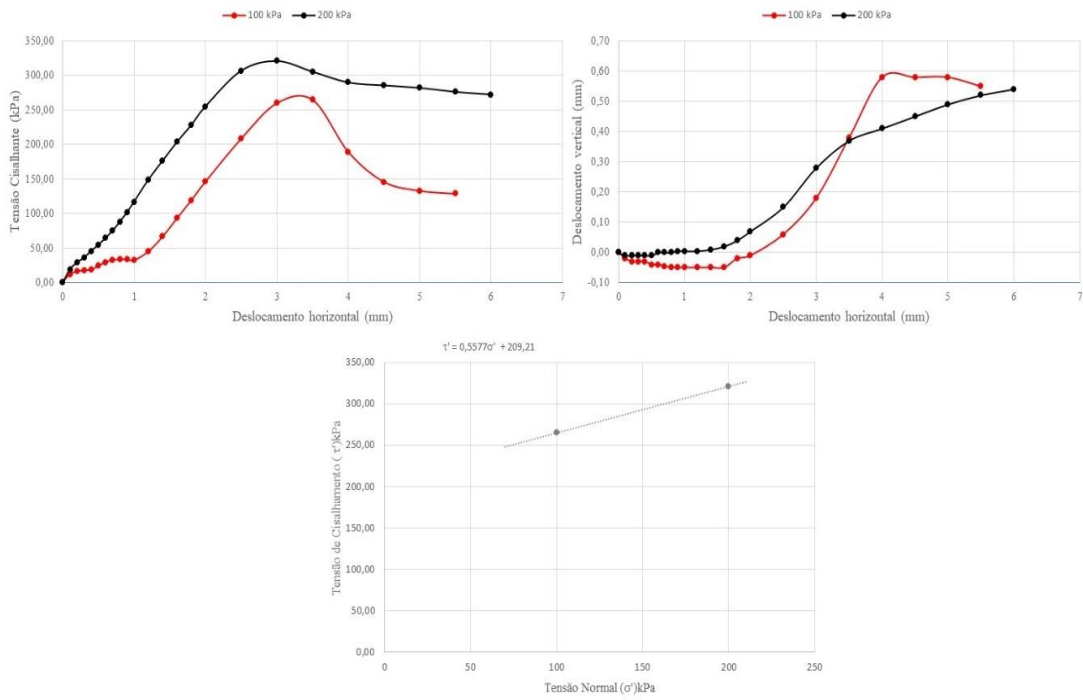


Figura 45 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 C 25%

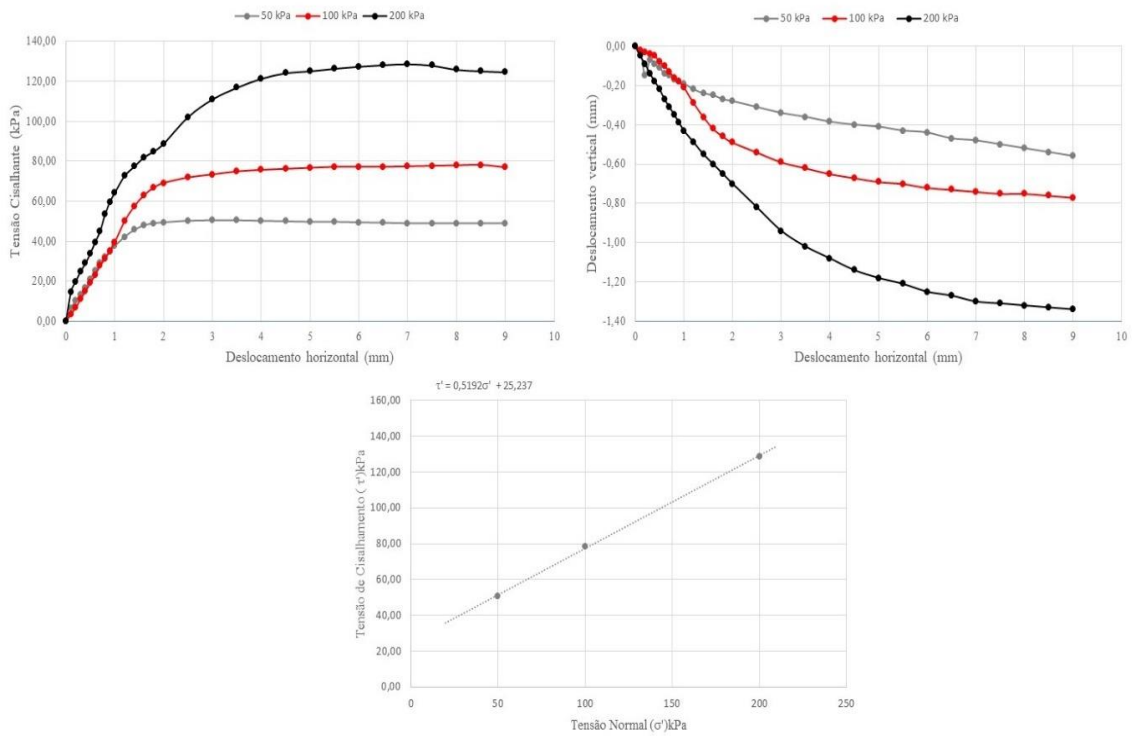


Figura 46 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR1 C 35%

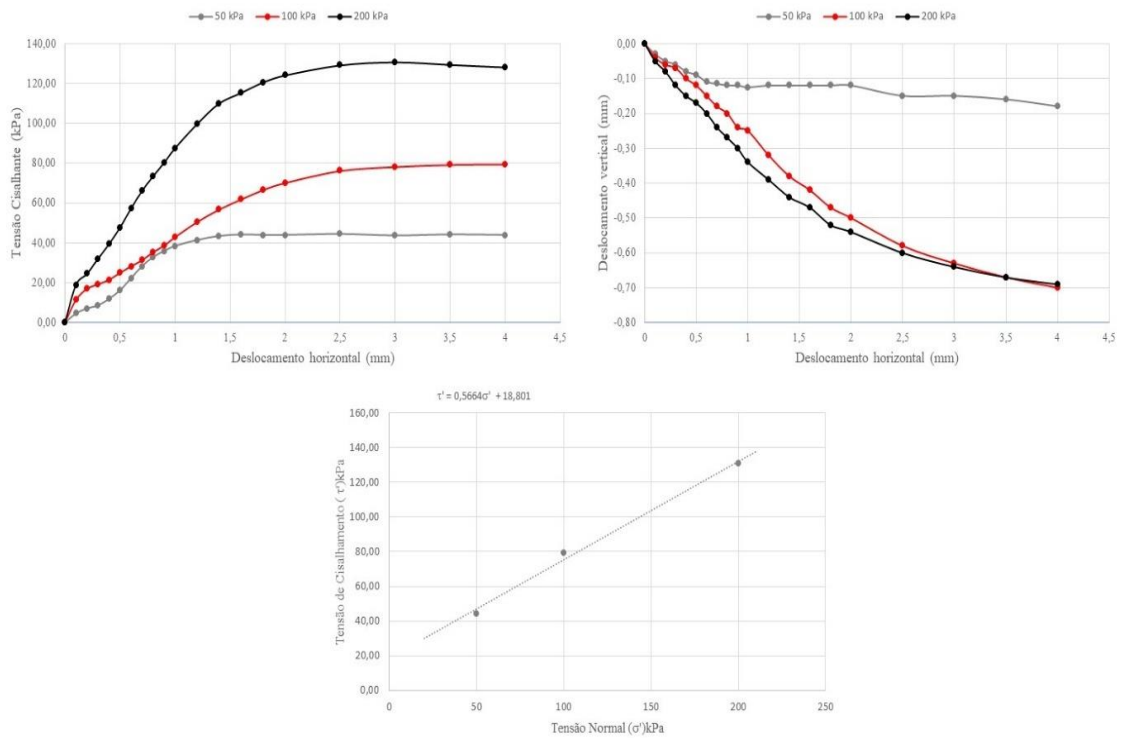


Figura 47 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR1 C Sat

Assim como ocorreu no horizonte “B” para a umidade mais baixa, o valor de coesão foi muito alto na menor umidade (25%), como pode ser observado no gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal”. Este ensaio também mostrou expansibilidade, sendo que a linha da tensão normal de 100kPa está atingindo valores maiores para o deslocamento vertical do que a linha da tensão normal de 200kPa. Neste ensaio o corpo de prova com a tensão normal de 50kPa foi desconsiderado por apresentar valor muito diferente dos outros. Assim como no horizonte anterior esta expansão se deve a diminuição dos vazios do solo, fazendo com que os grãos fiquem muito próximos uns dos outros, e ao cisalhar estes grãos não tiveram espaços para se acomodar, rolando um sobre o outro levando a expansão, ao invés da contração. Este efeito aumenta a tensão entre os grãos, aumentando a coesão aparente. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram ruptura residual. Este horizonte apresentou no ensaio de granulometria uma maior quantidade de material da fração argila do que o horizonte “B”, assim como também apresentou montmorillonita na composição mineralógica. Este argilomineral é expansivo, e na ausência de água tem uma contração significativa, o que neste caso altera a estrutura do solo e faz com que ele sofra expansão quando submetido ao ensaio de resistência ao cisalhamento (por conta

da diminuição do espaço poroso), como observado. Este comportamento do solo indica a presença de uma quantidade expressiva deste tipo de argilomineral.

Diferente do ensaio anterior (25% umidade) neste (35% umidade), as curvas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentaram contração mostrando um adensamento deste solo quando submetido a tensão aplicada. Este aumento da umidade não gerou diminuição do espaço poroso como o ensaio anterior, mas sim uma expansão que manteve o índice de vazios maior que no ensaio com 25% de umidade. Com esta expansão por conta da presença da água a tensão capilar diminui, pois aumenta o espaçamento entre os grãos. Assim, quando o solo é submetido ao cisalhamento os grãos têm espaço para se acomodarem, não aumentando significativamente a tensão capilar, contraindo o solo até a ruptura. No gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” a linha de tendência mostra uma coesão aparente bem menor do que a do ensaio anterior, mostrando que este solo quando umedecido perde muito da sua resistência (em relação a coesão aparente). As curvas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento plástico do solo (não existe um pico e depois uma queda), com os valores maiores para a tensão de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa e depois da tensão de 50kPa.

Assim como no ensaio anterior (35% umidade) as linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” para a amostra saturada, mostram contração do solo, e o ensaio com a tensão normal de 100kPa se aproxima muito da linha que representa a tensão normal de 200kPa, mostrando que quando umedecido este solo se deforma (adensa), ou invés de expandir, e esta aproximação mostra que quando saturado este solo tem uma deformação parecida a partir de uma certa tensão. Quando saturado, o corpo de prova tem a tensão capilar nula, portanto sua coesão é a verdadeira (relacionada a partículas finas e/ou cimentações naturais), não apresentando coesão aparente. A linha de tendência no gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” coincide com os pontos, mostrando uma queda do valor de coesão em relação aos ensaios anteriores, mas com valor próximo ao ensaio com 35% de umidade. O valor da coesão verdadeira (feito com o corpo de prova saturado) não é tão baixo, estando mais uma vez relacionado com a presença de montmorillonita, e grande quantidade de material da fração argila na granulometria. E as linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” tem os valores máximos mostrando o ponto de rompimento plástico do solo e a linha com a normal de 200kPa com o valor maior e a linha com a normal de 50kPa com o valor menor.

As umidades definidas para os horizontes “B” e “C” são praticamente iguais (mudando somente no valor saturado). Para o horizonte “C”, assim como no horizonte “B” o ensaio com 25% mostrou uma coesão aparente muito alta em relação às outras, estes valores estão relacionados com a presença de montmorillonita e a grande quantidade de material da fração argila, pois na menor umidade a presença deste argilomineral vai influenciar na contração do solo, diminuindo o espaço poroso, aumentando assim a tensão capilar (coesão aparente).

A queda da resistência quando aumenta a umidade é bem significativa, caindo de 272,18kPa para 14,39kPa para o horizonte “B” e, de 209,21kPa para 25,23kPa para o horizonte “C” em apenas 10% de umidade gravimétrica. O ponto relativo à tensão normal de 50kPa foi desconsiderado (no ensaio 25% do horizonte “C”) por apresentar uma divergência muito grande. Por ser um horizonte “C”, ou seja, mais próximo a rocha pode ter sido moldado um corpo de prova com interferência de amostras da rocha não intemperizada que deu esta diferença.

A Tabela 22 mostra os resultados destes parâmetros para os horizontes “B” e “C” da TR1.

Tabela 22 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR1

Parâmetros	TR1 - B			TR1 - C		
	25	35	42	25	35	43
Teor de umidade (%)	25	35	42	25	35	43
Coesão c (kPa)	272,19	14,38	3,91	209,21	25,24	18,8
Ângulo de atrito interno $\phi$ (°)	34,54	37,65	38,53	29,15	27,44	29,53

Os valores de coesão apresentados na Tabela 22 mostram a tendência de diminuição com o aumento da umidade, com valores muito altos para os ensaios de menor umidade, no horizonte “B” cai de 272,19kPa (25%) para 14,38kPa (35%) e com o corpo de prova saturado teve 3,91kPa (42%), sendo esta a coesão verdadeira do solo. Os valores de ângulo de atrito interno tiveram um leve aumento.

Para o horizonte “C” o solo teve um comportamento muito parecido, tendo apresentado 209,21kPa (25%), caindo para 25,24kPa (35%) e quando saturado teve 18,8kPa

(43%), sendo a coesão verdadeira do solo. O ângulo de atrito interno teve uma leve queda no valor para 35% e depois aumentou.

Esta trincheira tem sua resistência diminuída com o aumento da umidade, chamando a atenção para a coesão aparente que tem seu valor aumentado significativamente na menor umidade, correspondente a umidade de entrada de ar nos microporos na curva de retenção à água. E apresenta valor de coesão aparente maior para o horizonte “C”, o que condiz com a granulometria, que neste horizonte tem maior quantidade de material fino (fração argila). A mineralogia não está influenciando nesta diferença (valor da coesão aparente), entre os dois horizontes, pois os dois apresentam argila expansiva na sua composição. Os resultados de limites também mostram a maior necessidade de água para mudança no comportamento do horizonte “C” em relação ao horizonte “B”

As Figuras 48 a 50 mostram as envoltórias de cisalhamento para as três diferentes umidades do horizonte “B” da TR3.

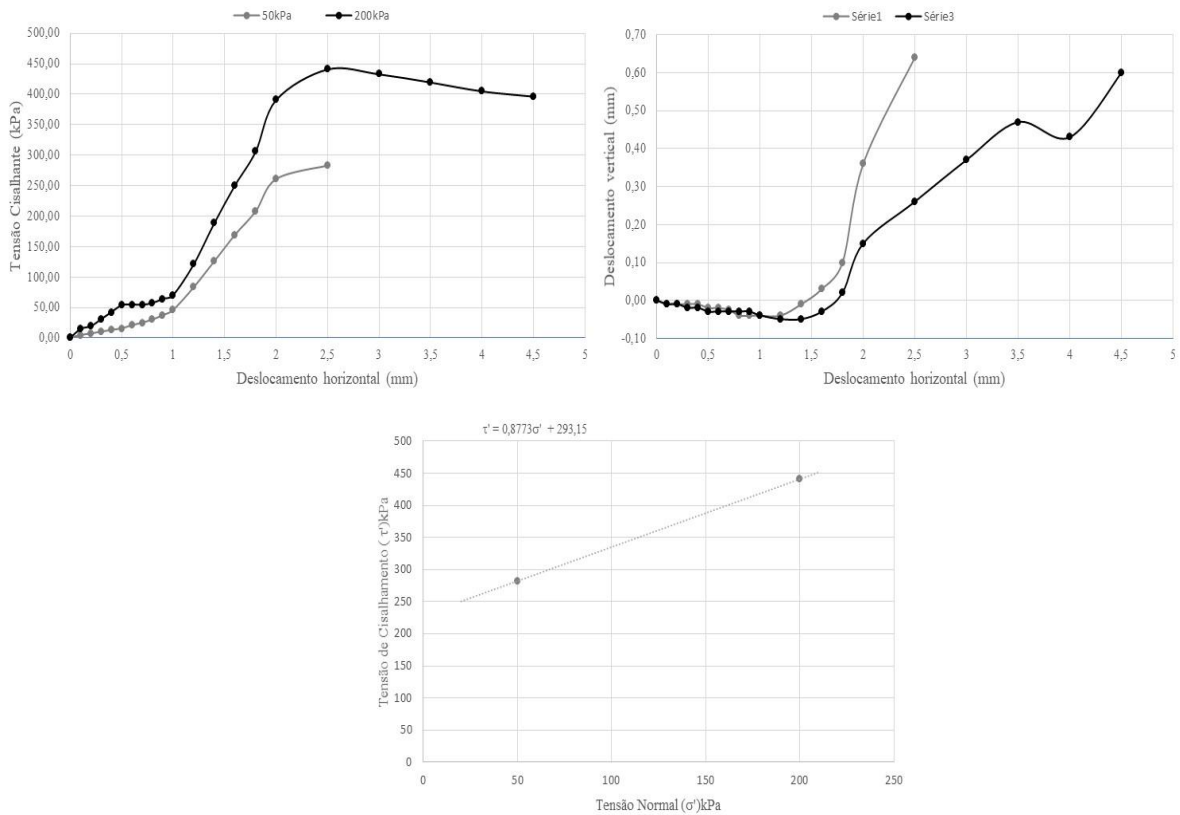


Figura 48 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 B 25%

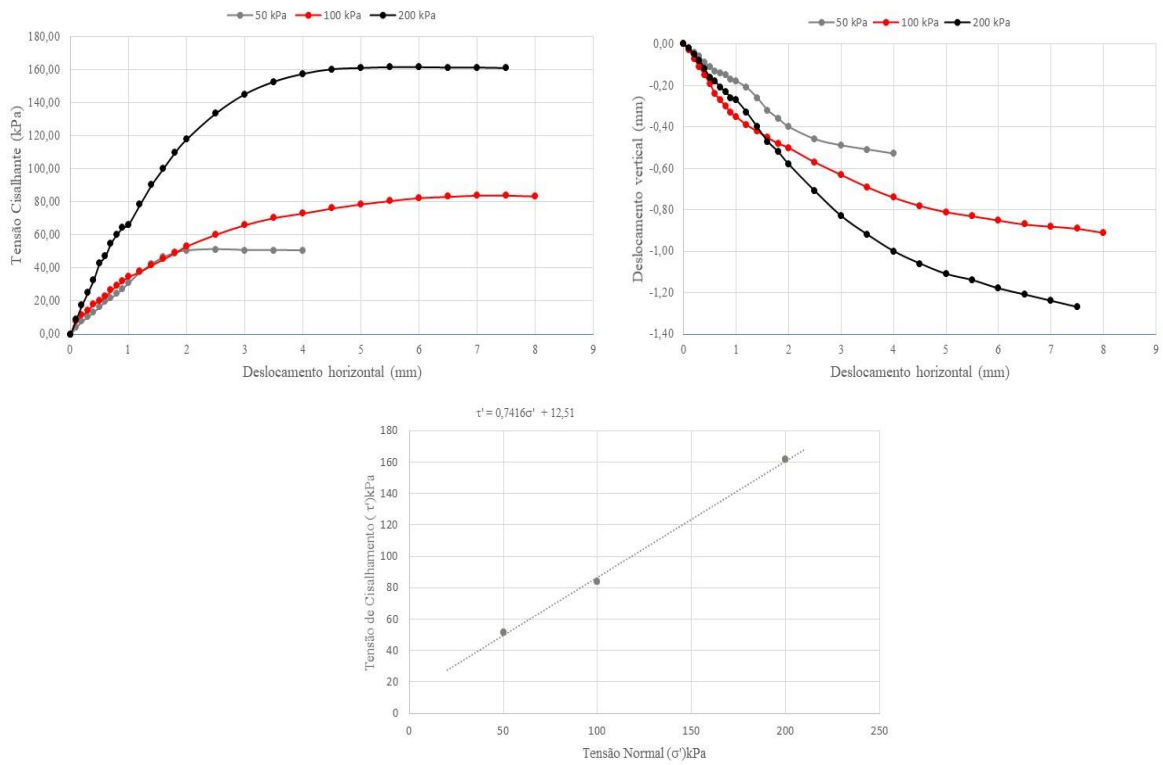


Figura 49 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR3 B 38%

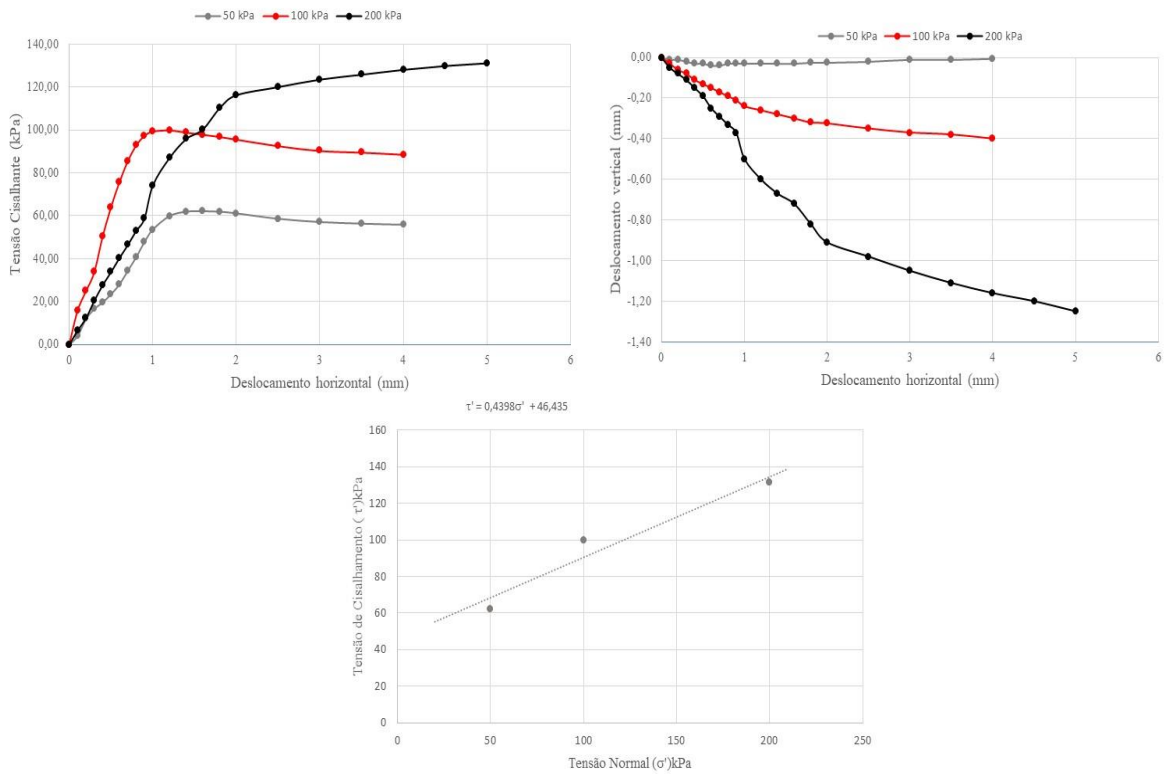


Figura 50 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 B Sat

Este solo mostrou um comportamento diferente para as curvas mostradas, sendo que no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” (25%) a linha que representa a tensão vertical de 100kPa apresenta um valor de tensão cisalhante maior que a tensão de 200kPa, o que não seria o esperado (quanto maior a tensão normal aplicada, maior deveria ser a tensão cisalhante necessária para seu rompimento) e tem uma queda acentuada após o rompimento para depois estabilizar, apresentando uma ruptura residual. Assim como ocorreu na TR1, este ensaio para a menor umidade gravimétrica (25%), apresentou um valor muito alto de coesão aparente (229,45kPa). E assim como nos outros ensaios, as curvas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentaram expansibilidade, e a linha correspondente a tensão normal de 100kPa foi retirada por ter apresentado comportamento muito distinto dos outros. Este horizonte apresentou na sua mineralogia, argilomineral do tipo expansivo, diferente das outras trincheiras, esta apresentou o tipo vermiculita, mas em termos de comportamento mecânico, os dois tipos são iguais, expandem quando umedecidos e contraem quando secos. E assim como ocorreu na TR1, na menor umidade, nesta trincheira também houve expansão, pois quando seco, o solo se contraiu significativamente, o que causou essa expansão no ensaio de resistência ao cisalhamento por conta do rearranjo estrutural do solo quando seco. Este novo arranjo estrutural diminuiu o índice de vazios, não deixando espaço poroso para que os grãos se acomodassem, gerando uma sobreposição dos grãos gerando uma expansão deste solo quando cisalhado.

Diferente do ensaio anterior (25% umidade) neste (38% umidade), as curvas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentaram contração no ensaio, chamando a atenção a curva da tensão 50kPa por ter terminado com pouco deslocamento. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos estão alinhados. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento do solo, e novamente se destaca a linha que representa a tensão normal de 50kPa, todas apresentaram ruptura plástica. Este ensaio está apresentado aqui, mas foi desconsiderado por ter apresentado resultado muito baixo para a coesão aparente, infelizmente não foi possível repetir o ensaio por conta da impossibilidade de voltar a campo, uma vez que não tinha amostra restante para moldar novo corpo de prova.

Neste horizonte houve um pequeno problema, o ensaio saturado apresentou maior coesão do que o ensaio com a umidade intermediária (38% umidade), o que não está correto, pois com o aumento da umidade, a tensão capilar diminui (ficando nula quando o solo está

saturado), o que leva a perda da coesão aparente. Neste ensaio, assim como no anterior, o gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentou contração para as tensões aplicadas, mostrando que em presença de água este solo é capaz de se deformar (existe espaço poroso para que os grãos se acomodem). As curvas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento do solo, com os valores maiores para a tensão de 200kPa, com uma ruptura plástica seguido da tensão de 100kPa e depois da tensão de 50kPa, com ruptura residual. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos não estão totalmente alinhados. Assim como o ensaio anterior (com umidade de 38%) este ensaio saturado foi desconsiderado da análise final, pois deveria ter sido repetido, mas foi impossibilitado por conta da pandemia, e não tinha mais amostra possível para moldagem de corpo de prova no anel necessário para o ensaio.

Como a TR3 “B” apresenta o mesmo comportamento que a TR1 em relação ao teor de umidade, é possível usar as mesmas explicações quanto a expansibilidade, sendo que a presença de argilomineral expansivo em baixa umidade causou uma contração no corpo de prova, levando a uma diminuição do espaço poroso. Esta diminuição não deixou espaço para que os grãos se acomodassem ao sofrer uma tensão cisalhante. Os problemas com os corpos de prova impediram resultados confiáveis para traçar as envoltórias, mas a indicação de comportamento parecido mostrou que este horizonte (TR3 “B”) pode seguir a mesma linha de raciocínio que os horizontes da TR1.

As Figuras 51 a 53 mostram as envoltórias de cisalhamento para as três diferentes umidades do horizonte “C” da TR3.



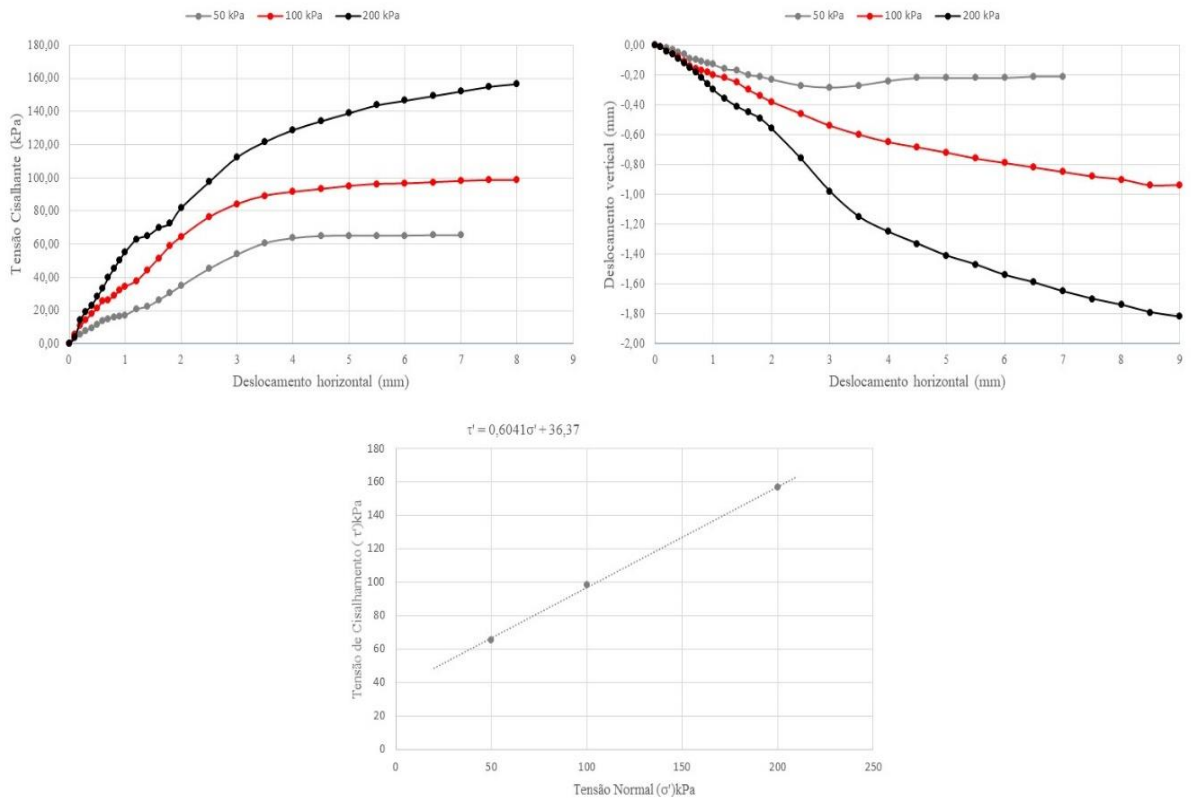


Figura 51 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 C 25%

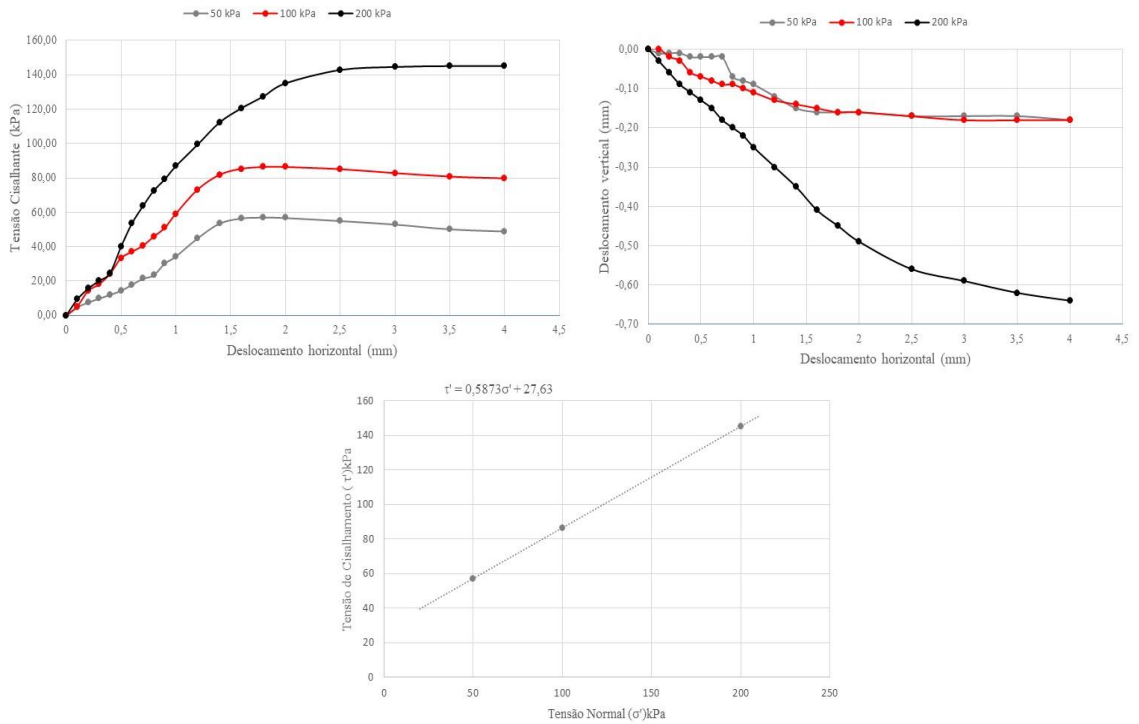


Figura 52 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR3 C 35%

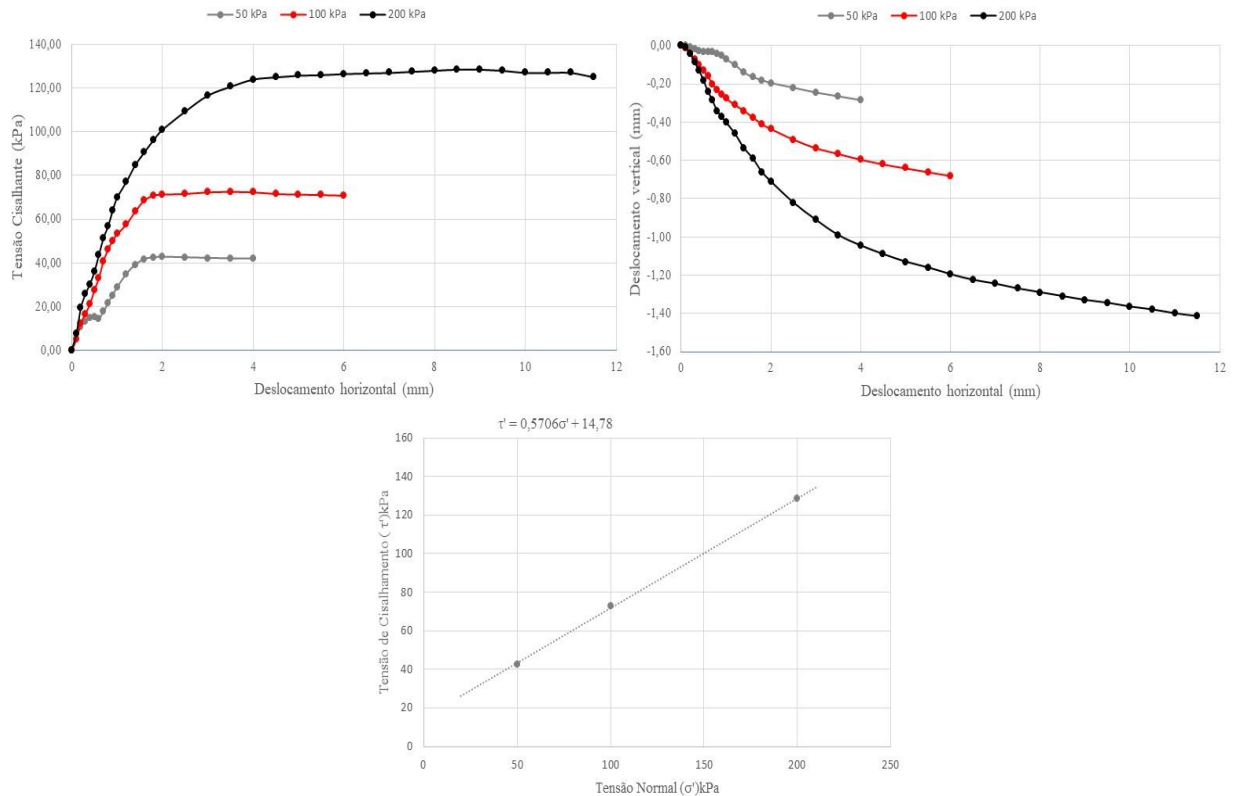


Figura 53 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR3 C Sat

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (25% umidade) apresentaram contração para as tensões aplicadas. Diferente dos ensaios anteriores, este não mostrou expansão para o ensaio de menor umidade, isto porque neste horizonte não tem argilomineral do tipo expansivo, neste horizonte foi encontrado hidrobiotita (do tipo 1:1, Brindley et al., 1983) este material não se contrai a ponto de alterar a estrutura do solo, não influenciando no seu comportamento mecânico na presença ou ausência de água no solo. Logo não houve alteração do espaço poroso, e os grãos quando sofreram uma tensão cisalhante tiveram espaço suficiente para se acomodarem. A tensão capilar atribuída à expansão por conta do rearranjo dos grãos não se aplicou neste horizonte.

A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos estão alinhados, e o valor de coesão não é tão grande como nos outros ensaios, a diferença não é influenciada pela quantidade de material da fração argila (pois os dois horizontes estudados desta trincheira têm uma quantidade quase igual desta fração granulométrica do solo), sua influência está relacionada a ausência de material expansivo. As

curvas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento plástico do solo, com os valores maiores para a tensão de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa e depois da tensão de 50kPa. Neste caso não aconteceu um pico das tensões de cisalhamento e depois uma queda e estabilidade, aqui houve uma deformação crescente que depois foi se estabilizando.

Assim como no ensaio anterior (25% umidade) as linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (35% umidade) mostram uma contração do solo, a linha da tensão normal de 100kPa está se confundindo com a linha da tensão normal de 50kPa, mostrando que para estas tensões os deslocamentos não sofrem grandes variações. A linha de tendência do gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” coincide exatamente com os pontos e apresenta coesão aparente menor que o ensaio anterior, o que está de acordo com o aumento da umidade, diminuindo a coesão aparente (diminuição da tensão capilar). E as linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram os valores máximos como os pontos de rompimento plástico do solo e a linha com a normal de 200kPa com o valor maior, seguida da linha de 100kPa e da linha com a normal de 50kPa com o valor menor.

No ensaio saturado a coesão diminui (é a coesão verdadeira do solo), diferente dos outros resultados já apresentados, os valores de coesão aparente deste horizonte não são tão distantes, fato que foi influenciado pela ausência de argilominerais do tipo expansivo (que causaria uma diminuição do índice de vazios, gerando aumento da tensão capilar). As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentaram contração para as tensões aplicadas, o ensaio com a tensão de 50kPa chama a atenção por ter terminado com pouco deslocamento (como na TR3 “B” com 38%). A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos estão alinhados, e com uma coesão verdadeira com valor não muito distante dos ensaios com as outras umidades. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento plástico do solo.

A Tabela 23 mostra os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para os horizontes “B” e “C” da TR3. Os resultados do horizonte B estão em vermelho para destacar que foram desconsiderados.

Tabela 23 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR3

Parâmetros	TR3 - B			TR3 - C		
	Teor de umidade (%)	25	38	43	25	35
Coesão c (kPa)	229,45	12,51	46,44	36,37	27,63	14,78
Ângulo de atrito interno $\phi$ (°)	41,3	36,56	23,74	31,14	30,43	29,71

O horizonte “B” teve um resultado não coerente com o aumento da coesão, o ensaio com a umidade de saturação (43% - 46,44kPa) apresentou resultado de coesão maior do que com a umidade menor (38% - 12,51). O ângulo de atrito foi diminuindo com o aumento da umidade, indo de 41,3° para a umidade de 25% para 23,74° para a saturação. Estes resultados foram desconsiderados, por não apresentarem as condições esperadas em relação ao aumento da umidade. Pois o aumento da umidade causaria uma diminuição da tensão capilar, diminuindo também a coesão aparente, sendo que no ensaio saturado a tensão capilar seria nula, mostrando a coesão verdadeira do solo.

Para o horizonte “C” o solo apresentou o comportamento esperado, sendo o maior valor de resistência com a menor umidade (25% - 36,37kPa), e o menor valor para a saturação (44% - 14,78kPa). O ângulo de atrito interno teve uma leve queda com o aumento da umidade. Assim como na trincheira anterior que apresentou valores muito altos de coesão aparente para a menor umidade, esta trincheira também apresentou valor alto para a menor umidade do horizonte “B” (229,45kPa). Este horizonte (“C”) não teve argila expansiva na sua composição como os outros que tiveram uma coesão aparente muito alta em baixos valores de umidade.

As Figuras 54 e 59 mostram as envoltórias de cisalhamento para as três diferentes umidades dos horizontes “B” e “C” da TR7.

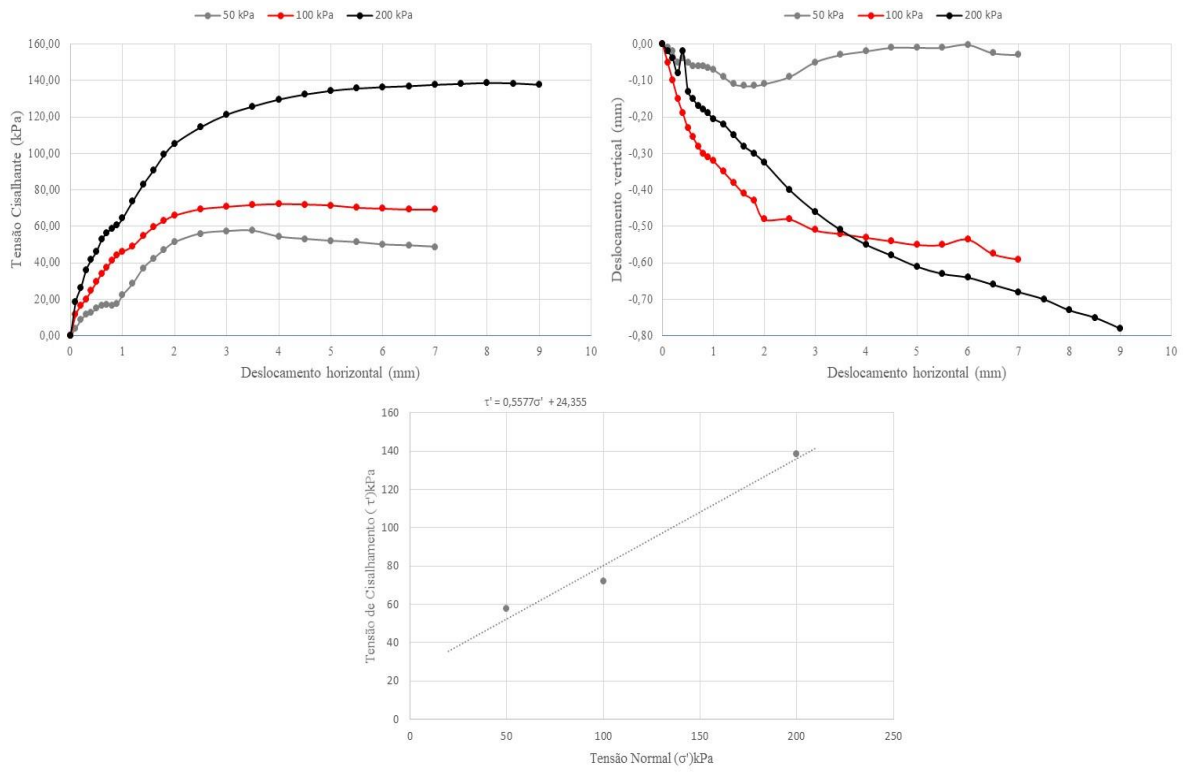


Figura 54 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 B 38%

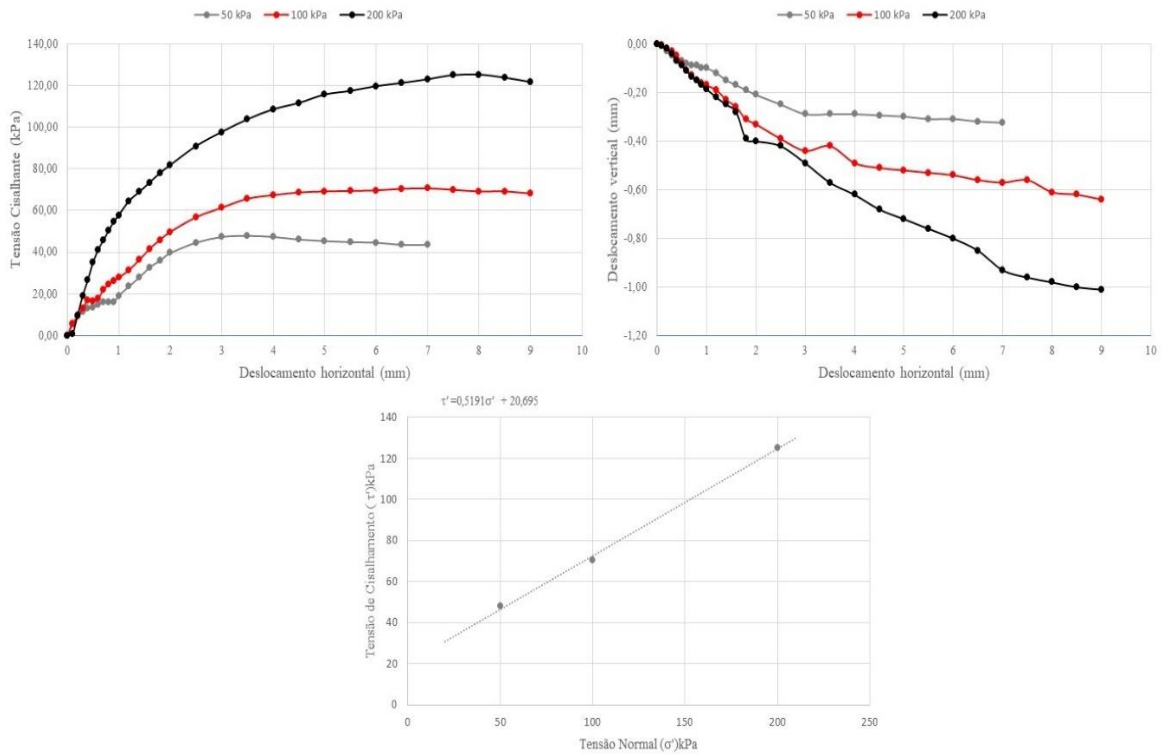


Figura 55 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 B 42%

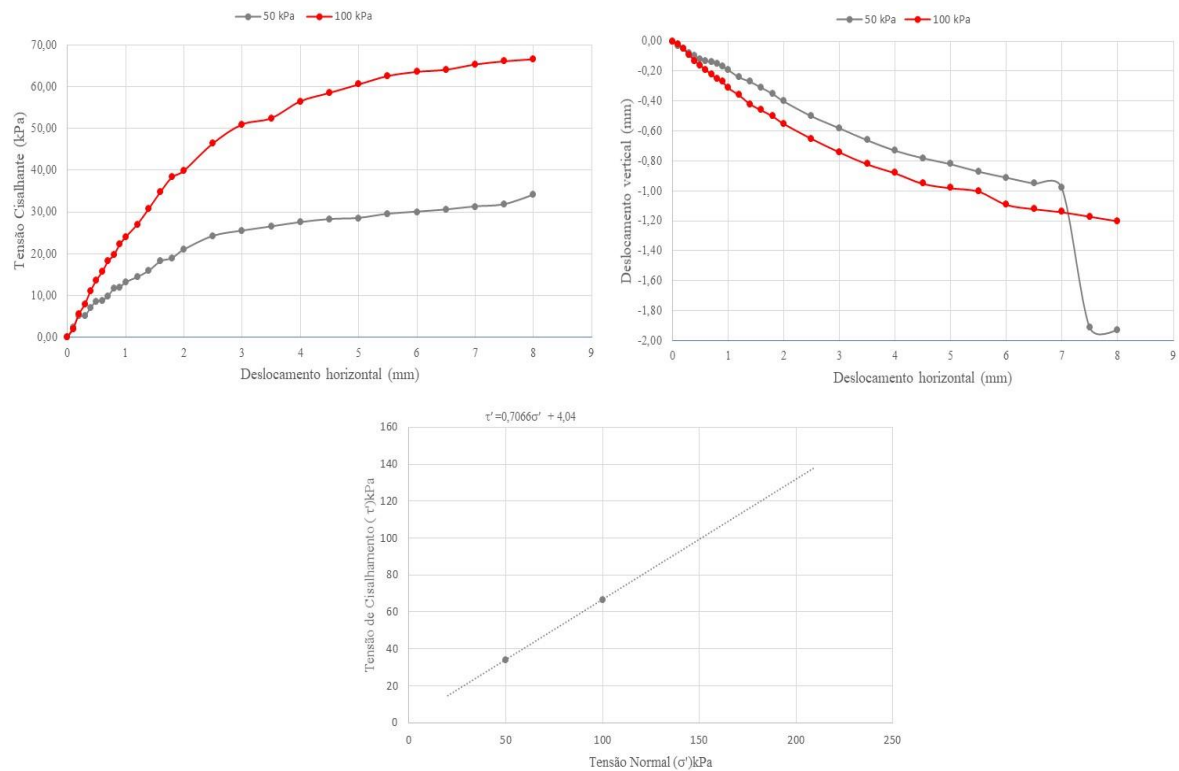


Figura 56 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 Sat

As curvas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (38% umidade), apresentaram contração, sendo que o comportamento da linha de 100kPa foi fora do esperado, que seria o de apresentar valores maiores de deslocamento vertical com o aumento do deslocamento horizontal em virtude da linha de 200kPa. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, indicando o rompimento plástico do solo, com os valores maiores para a tensão de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa e na linha de tensão de 50kPa acontece uma ruptura residual. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos não estão totalmente alinhados, o valor da coesão aparente deste solo (com a menor umidade do ensaio) é bem menor se comparar com os outros dois já apresentados, o que está de acordo com a granulometria apresenta, em que a porcentagem da fração argila é bem menor. Embora esta trincheira também apresente argilomineral do tipo expansivo, a quantidade de material fino (fração argila) não é suficiente para causar diferença no ensaio de resistência. Esta trincheira mais arenosa também influenciou os resultados do ensaio de limites de consistência sendo NP (não plástico), de

porosimetria com as curvas mostrando uma porcentagem mais uniforme dos poros e das curvas de retenção a água, com este solo sendo o que menos reteve a água. Este solo não mostrou quantidade de finos suficientes na granulometria, e mesmo tendo argilomineral expansivo na composição, não foi suficiente para alterar o índice de vazios na menor umidade, o que neste caso não fez com que a tensão capilar aumentasse, aumentando assim sua coesão aparente.

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (42%) apresentaram contração, pois não há material da fração argila suficiente para contrair o solo e mudar sua estrutura, influenciando no ensaio de resistência. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos não estão totalmente alinhados, e a coesão aparente é menor do que a do ensaio anterior, mas a diferença é pequena, o que está de acordo com um solo mais arenoso como mostrou a granulometria. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento plástico do solo, com os valores maiores para a tensão de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa e na linha da tensão de 50kPa a ruptura é residual. O aumento da umidade não causou uma diferença tão grande na perda da tensão capilar (coesão aparente).

No ensaio saturado houve um problema com a linha da tensão normal de 200kPa, por isso ela foi retirada de todos os gráficos, assim a linha de tendência só pode ser traçada com as outras duas tensões normais (50kPa e 100kPa). Assim como na TR3, o ensaio não pode ser repetido. No gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” as linhas de tensão normal seguem aumentando gradativamente e depois estabilizando, apresentando ruptura plástica. E assim como nos outros ensaios as linhas do gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” apresentaram contração, pois embora tenha apresentado argilomineral do tipo expansivo na composição, a quantidade de material da fração argila é bem pouco como mostrou a granulometria. A coesão neste ensaio é a verdadeira, pois com o corpo de prova saturado a tensão capilar é nula.

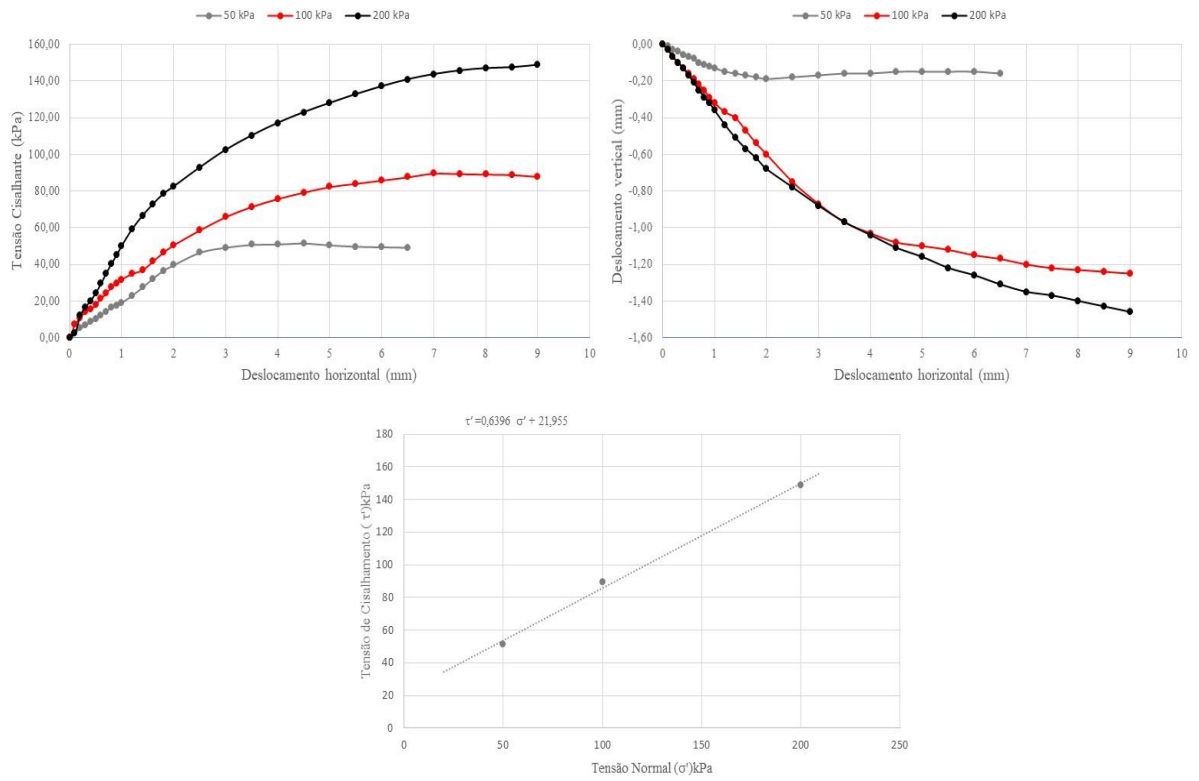


Figura 57 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 C 22%

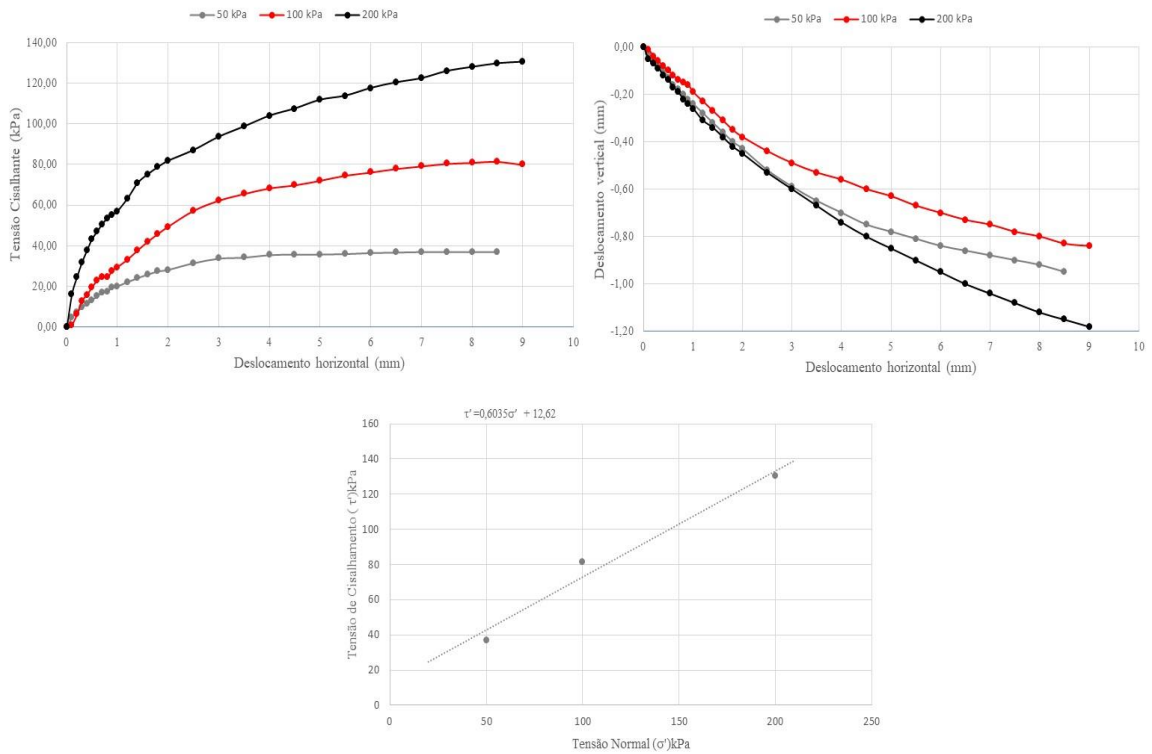


Figura 58 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 C 43%



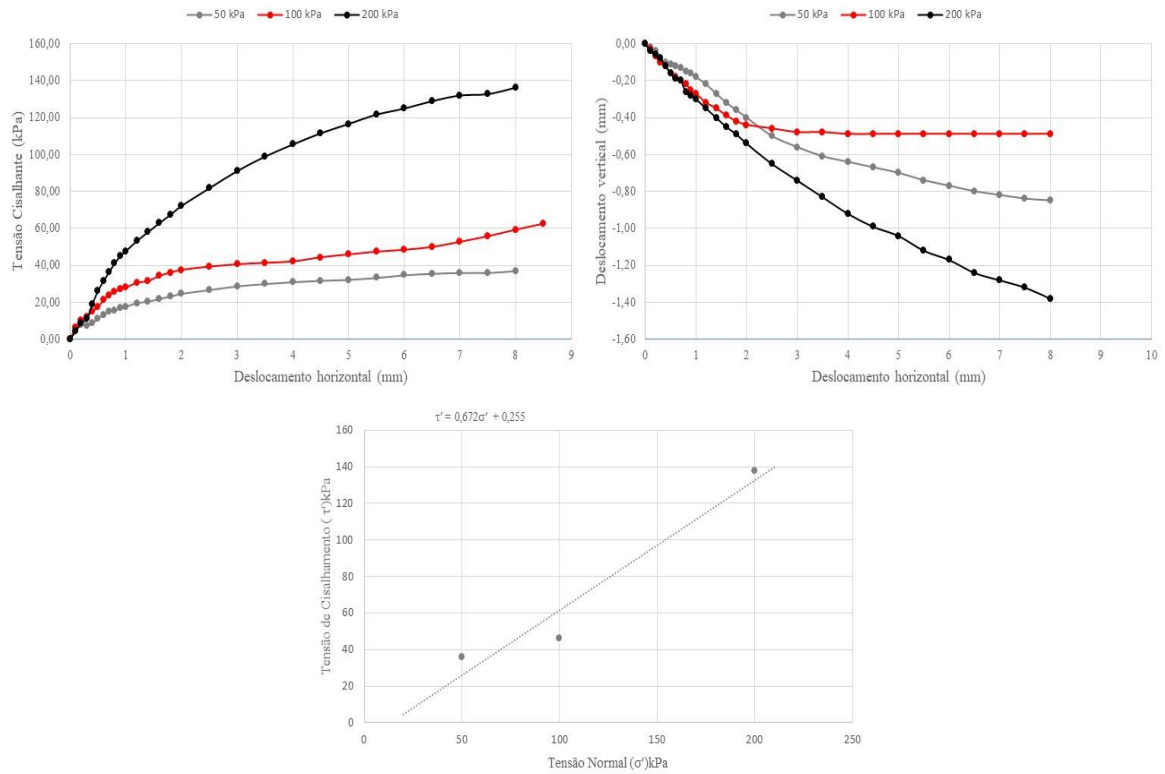


Figura 59 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR7 C Sat

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (22% umidade) mostram contração do solo, a linha da tensão normal de 100kPa está se confundindo com a linha da tensão normal de 200kPa, mostrando que para estas tensões o solo se deforma quase por igual. A linha de tendência do gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” coincide com os pontos, e apresenta uma coesão aparente um pouco menor do que a coesão aparente da menor umidade do horizonte “B”, explicado pela granulometria (mais arenosa deste horizonte). E as linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o solo, com os valores máximos mostrando o ponto de rompimento plástico do solo e a linha da normal de 200kPa com o valor maior, seguida da linha de 100kPa e da linha normal de 50kPa com o valor menor.

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (43% umidade) mostram contração do solo, a linha da tensão normal de 50kPa se adensou mais que a de 100kPa, o que pode ser explicado na montagem do corpo de prova que pode ter tido influência do horizonte superior (“B”), que tinha maior quantidade de material da fração

argila. A linha de tendência do gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” não coincide com os pontos, e apresenta uma coesão aparente menor do que o horizonte anterior (“B”), na umidade correspondente a entrada de ar nos microporos. As linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram as linhas aumentando gradativamente e depois tendendo a se estabilizar, a linha com a normal de 200kPa com o valor maior, seguida da linha de 100kPa e da linha com a normal de 50kPa com o valor menor, apresentando ruptura plástica.

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (na amostra saturada) mostram contração do solo, a linha da tensão normal de 50kPa se adensou mais que a de 100kPa, como no ensaio anterior, podendo também ter tido influência do horizonte “B” na moldagem do corpo de prova. A contração do solo deste horizonte segue a mesma explicação do horizonte anterior, ou seja, não houve retração do corpo de prova, permanecendo assim o espaço poroso que ao sofrer a tensão de cisalhamento conseguiu acomodar os grãos sem aumentar a tensão capilar. A linha de tendência do gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” coincide com os pontos, e apresenta uma coesão verdadeira, que é menor do que o horizonte anterior (“B”) na condição saturada. As linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram uma ruptura plástica, com as linhas aumentando gradativamente e depois tendendo a se estabilizar, a linha com a normal de 200kPa com o valor maior, seguida da linha de 100kPa e da linha com a normal de 50kPa com o valor menor, assim como no ensaio anterior.

A Tabela 24 mostra os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para os horizontes “B” e “C” da TR7.

Tabela 24 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR7

Parâmetros	TR7 - B			TR7- C		
Teor de umidade (%)	38	42	51	22	43	50
Coesão c (kPa)	24,36	20,7	4,00	21,96	12,62	0,25
Ângulo de atrito interno $\phi$ (°)	29,15	27,44	35,25	32,6	31,11	33,9

Tanto o horizonte “B” quanto o “C” apresentaram coerência com os resultados de coesão aparente, que vão diminuindo com o aumento da umidade, o horizonte “B” apresentou uma diminuição menor da coesão aparente indo de 24,36kPa (38%) para 20,7kPa (43%), enquanto o horizonte “C” apresentou uma diminuição maior, indo de 21,96kPa (22%) para 12,62kPa (43%). E com valores muito baixos quando saturados, apresentando coesão verdadeira compatível com a tensão capilar nula, em solo arenoso. O ângulo de atrito interno não teve grandes mudanças em ambos os horizontes.

A baixa coesão aparente desta trincheira pode ser explicada por conta da sua granulometria mais arenosa, foi a trincheira que apresentou a menor quantidade de material da fração argila na sua composição. Esta distribuição granulométrica também interferiu nos outros ensaios, pois o ensaio de limite foi NP (não plástico) para os dois horizontes, porosimetria mostrou a trincheira com a maior quantidade de macroporos, se distanciando muito das outras, e as curvas de retenção à água também seguiram o comportamento de menor retenção.

A mineralogia desta trincheira apresentou o argilomineral expansivo montmorillonita para os dois horizontes analisados, mas como a quantidade de material da fração argila foi muito pouco, este argilomineral não está influenciando nos resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento, pois a quantidade é insuficiente.

As Figuras 60 a 65 mostram os resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento para os horizontes “B” e “C” da TR9.

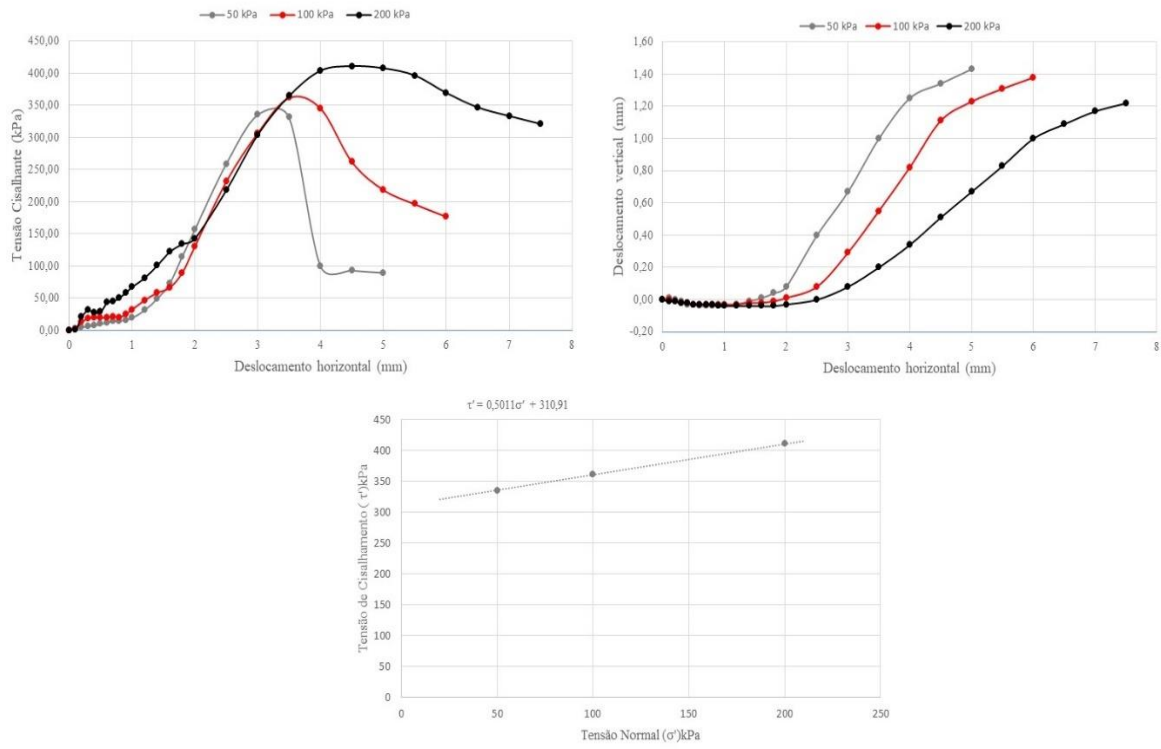


Figura 60 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR9 B 20%

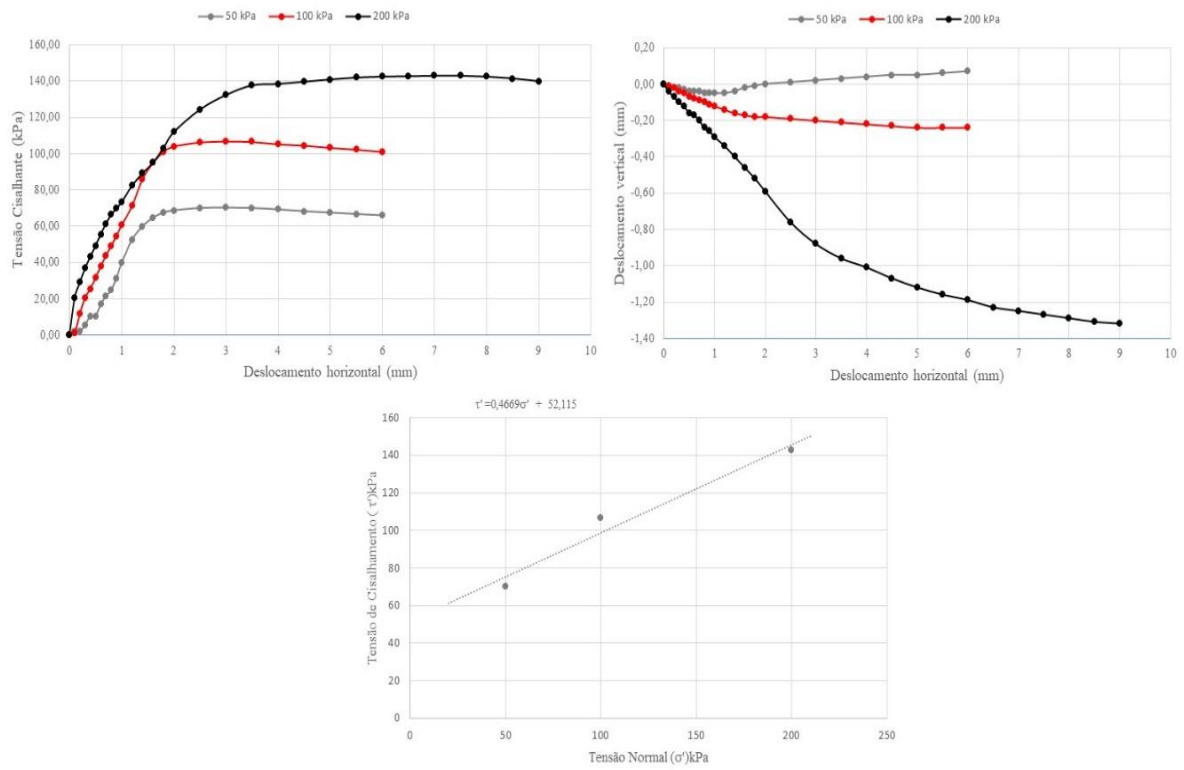


Figura 61 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR9 B 30%

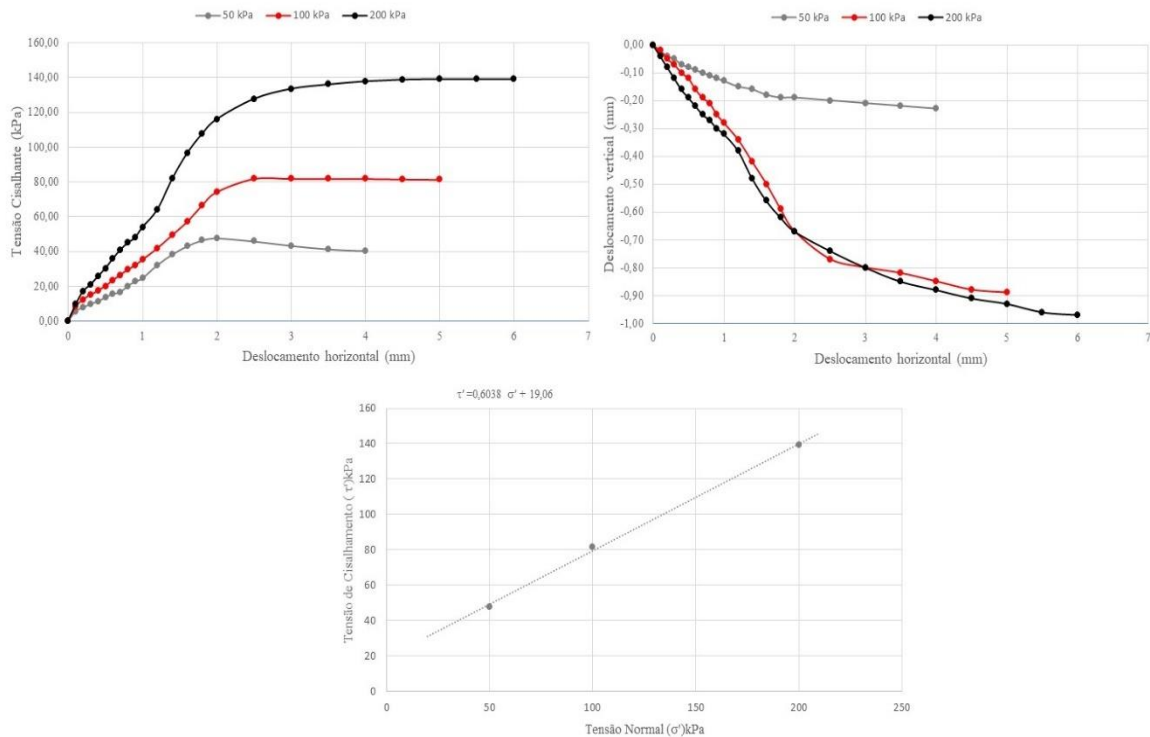


Figura 62 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR9 B Sat

Assim como ocorreu nos horizontes, “B” e “C” da TR1 (25%) e TR3 “B” (25%) o valor de coesão aparente deste horizonte foi muito alto (o maior), como pode ser observado no gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” (20% umidade). Este ensaio também mostrou expansibilidade. A presença de argilomineral expansivo, causou retração do corpo de prova, ao perder umidade, o que ocasionou uma diminuição do espaço poroso, esta diminuição aumentou a tensão capilar (sucção matricial), causando expansão quando aplicada uma tensão cisalhante, que obrigou os grãos a se sobreporem, pois não tinha espaço para se acomodarem.

As linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” seguem um comportamento esperado, ou seja, aumentando a tensão à medida que aumenta o deslocamento horizontal, até atingir um limite de rompimento deste solo. Sendo que as linhas da tensão de 100kPa e de 50kPa mostram um rompimento com uma posterior queda e depois estabilizam, enquanto a linha que representa a tensão normal de 200kPa têm leve queda após o rompimento e depois estabiliza, todas têm ruptura residual. A umidade deste ensaio está um pouco acima da umidade do limite de contração (17,64%), indicando que este solo poderia se

contrair um pouco mais, alterando ainda mais sua estrutura, o que poderia aumentar um pouco sua coesão aparente.

Diferente do ensaio anterior, as linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (30% umidade) apresentaram contração, mostrando que quando umedecido este solo se expande criando espaço suficiente para sofrer adensamento quando aplicada uma tensão sobre ele. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos não estão alinhados, e tem uma coesão aparente muito menor do que a do ensaio anterior, pois quando umedecido este solo (com presença de argilomineral expansivo) perde muito a coesão aparente. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento plástico do solo.

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (saturada) mostram contração do solo, a linha da tensão normal de 100kPa está se confundindo com a linha da tensão normal de 200kPa, assim como no ensaio com umidade de 30%, este solo saturado se expande. A tensão capilar neste caso é nula, mostrando assim a coesão verdadeira deste solo. A linha de tendência do gráfico de “tensão cisalhante X tensão normal” coincide com os pontos, e apresenta uma coesão verdadeira bem menor (19,06kPa) do que a coesão aparente da menor umidade do ensaio para este horizonte (310,91kPa). As linhas no gráfico de “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram os valores máximos no ponto de rompimento plástico do solo e a linha com a normal de 200kPa com o valor maior, seguida da linha de 100kPa e da linha com a normal de 50kPa com o valor menor e ruptura residual.

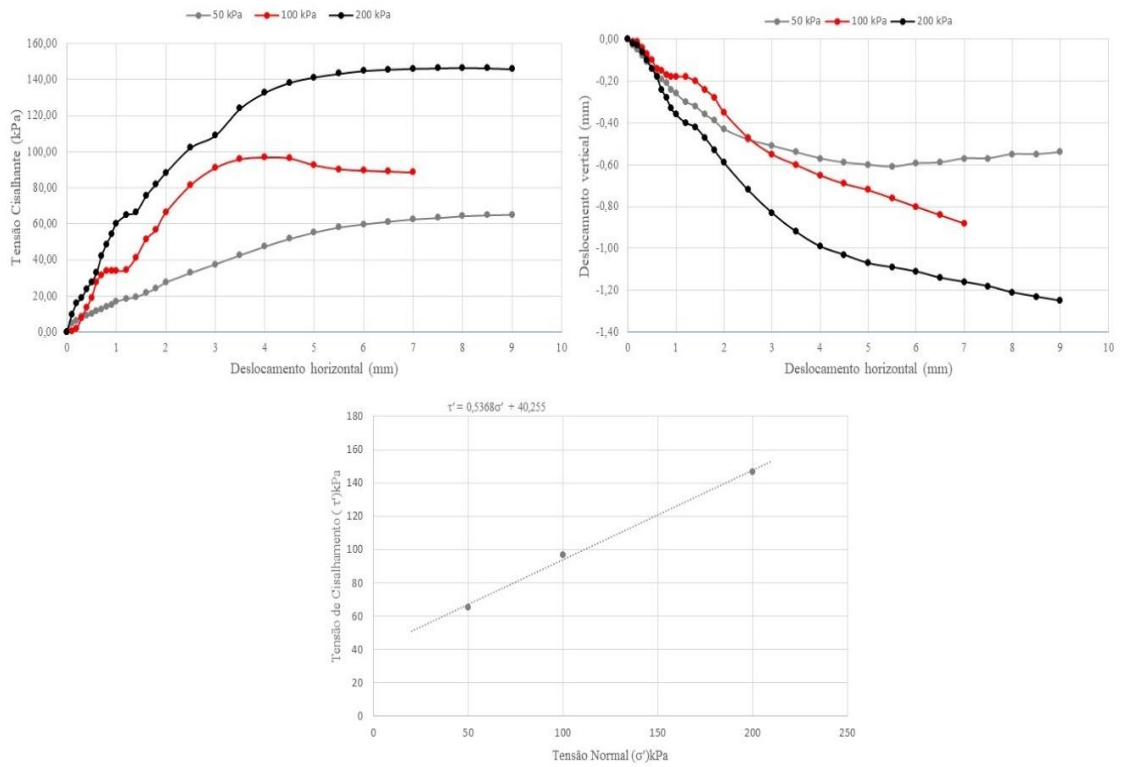


Figura 63 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR9 C 18%

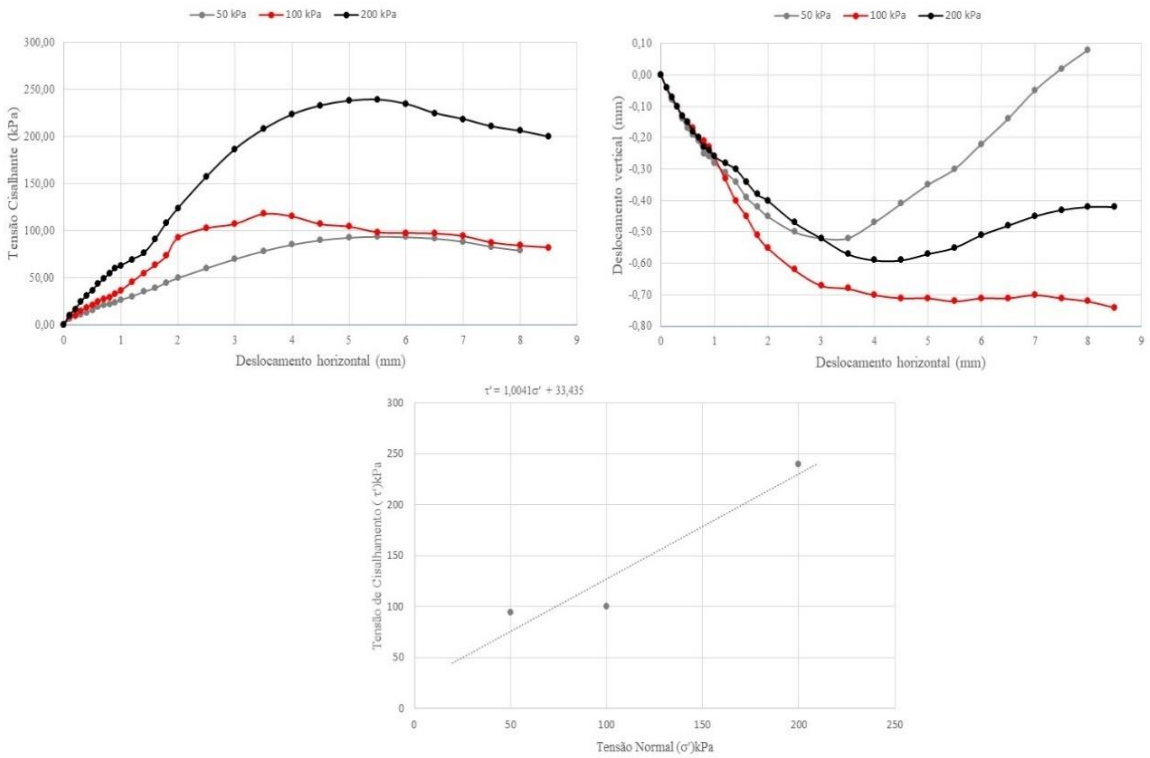


Figura 64 - Resultados dos ensaios da resistência ao cisalhamento direto da TR9 C 28%

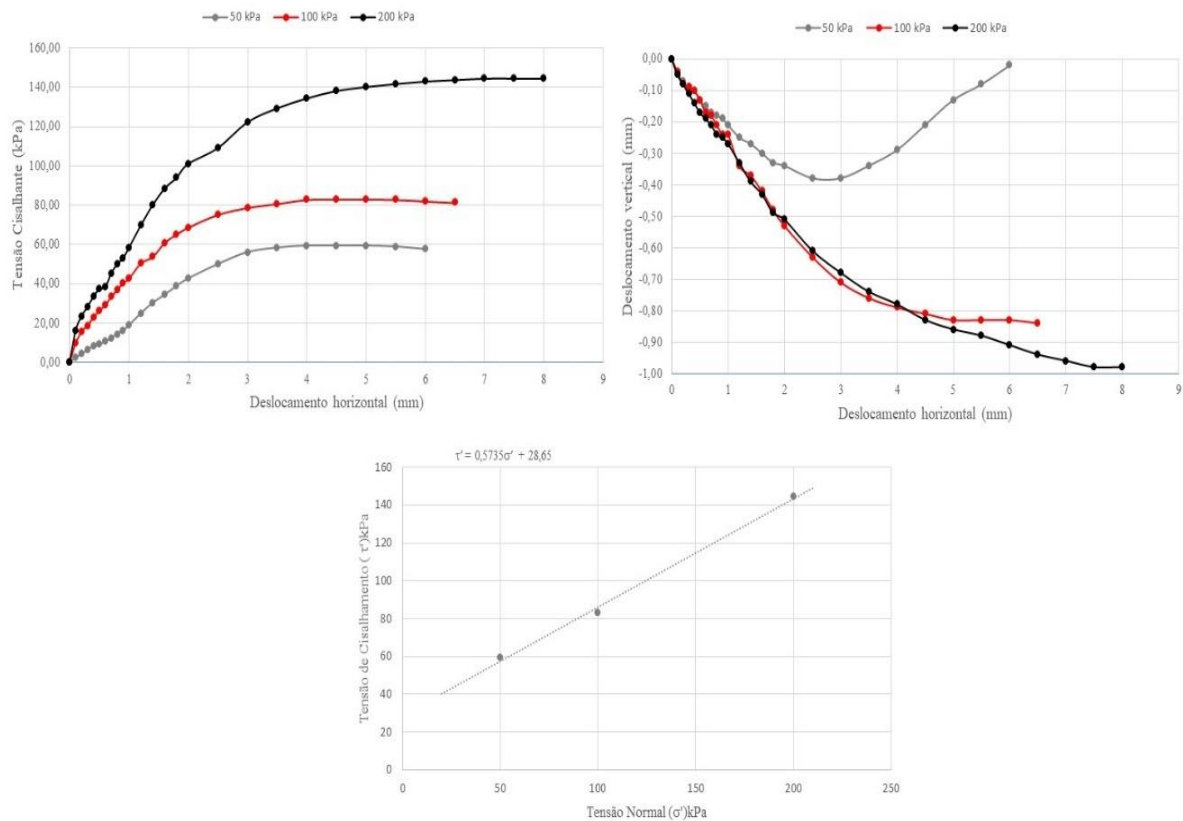


Figura 65 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da TR9 C Sat

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (18% umidade) apresentaram contração, sendo que o comportamento da linha da tensão de 50kPa, muda conforme aumenta o deslocamento horizontal. Diferente do horizonte anterior (“B”) este tem sua granulometria bem mais arenosa, com pouco material na fração argila, mesmo apresentando montmorillonita na composição do solo, a quantidade de material fino é bem menor, não tendo uma influência suficiente para alterar o comportamento do solo em relação ao aumento, ou diminuição da água na sua composição. A quantidade de material é tão pouca que não foi possível realizar o ensaio de limites de consistência (deu NP). Assim como na TR7 não aconteceu diminuição do espaço poroso, que aumentaria a tensão capilar quando aplicada uma tensão cisalhante. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos estão alinhados e a coesão apresentada é bem menor, se comparada com o horizonte anterior, para a menor umidade, não tendo uma mudança na estrutura do solo (contração) por conta da diminuição da água, assim apresentando um valor menor de coesão aparente. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas



começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento do solo, com os valores maiores para a tensão de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa (única linha que apresenta ruptura residual) e depois da tensão de 50kPa.

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (28% umidade) apresentaram contração, mesmo que apareça uma leve expansão após a contração, sendo mais evidente na linha que representa a tensão normal de 50kPa, o valor ainda está abaixo do zero, indicando contração do material. Não houve diminuição do espaço poroso que influenciou no aumento da tensão capilar (sucção matricial). A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos não estão totalmente alinhados, e a coesão aparente é menor do que a do ensaio anterior, pois com o aumento da umidade a tensão capilar diminui, diminuindo a coesão aparente. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento do solo, com os valores maiores para a tensão de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa e depois da tensão de 50kPa (única linha com ruptura plástica), sendo que estas duas últimas se aproximam perto de 5mm de deslocamento horizontal. O valor da tensão cisalhante para este ensaio foi maior (250kPa) que para os dois outros (ficaram em torno de 140kPa). Estes corpos de prova podem ter tido influência do horizonte superior quando foram moldados, pois têm uma presença maior de material argiloso, que alteraria estes valores como foram observados no ensaio. Logo, com a maior quantidade de material argiloso (e a presença de argilomineral expansivo), este solo vai ter uma coesão aparente maior, influenciando na resistência ao cisalhamento.

As linhas no gráfico “deslocamento vertical X deslocamento horizontal” (saturada) apresentaram contração, e próximo de 3mm de deslocamento horizontal a linha da tensão normal de 50kPa sofre uma pequena expansão, mas permanece abaixo do zero, mostrando que o material sofreu contração. Esta característica é de areia compacta. Aqui acontece o mesmo que na TR7, sendo pouca quantidade de material fino (fração argila), mesmo com a presença de argilomineral expansivo. A ausência de material fino vai deixar o solo sem alterar seu volume, assim vai ter espaço poroso para acomodar os grãos quando aplicada uma tensão cisalhante. A linha de tendência no gráfico “tensão cisalhante X tensão normal” mostra que os pontos estão alinhados, e a coesão verdadeira (porque quando saturado o corpo de prova tem a tensão capilar nula), com valor um pouco mais baixo, mas não muito distante dos anteriores, o que está de acordo com a granulometria deste horizonte, mais arenoso. As linhas no gráfico “tensão cisalhante X deslocamento horizontal” mostram o

aumento da tensão até atingir um valor máximo, onde as linhas começam a ficar estáveis, mostrando o rompimento plástico do solo, com os valores maiores para a tensão normal de 200kPa, seguido da tensão de 100kPa e depois da tensão de 50kPa.

A Tabela 25 mostra os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para os horizontes “B” e “C” da TR9

Tabela 25 - Parâmetros da resistência ao cisalhamento da TR9

Parâmetros	TR9 - B			TR9- C		
	20	30	34	18	28	34
Teor de umidade (%)	20	30	34	18	28	34
Coesão c (kPa)	310,91	52,12	19,06	40,26	33,4	28,65
Ângulo de atrito interno $\phi$ (°)	26,62	25,03	31,12	28,23	45,1	29,84

O horizonte “B” (na menor umidade 20%) apresentou a maior coesão aparente de todos os ensaios (310,91kPa), e quando acrescentou água, indo para a umidade gravimétrica de 30% a coesão caiu muito (52,12kPa), e depois teve uma leve queda quando saturado. O horizonte “C” teve uma queda gradual da coesão (40,26kPa – 33,4kPa – 28,65kPa), o que está de acordo com a granulometria arenosa, assim como a TR7 que apresentou valores menores e caindo gradualmente com o aumento da umidade. O ângulo de atrito interno não teve grandes alterações no horizonte “B”, no “C” ele teve um aumento com a umidade de 28,1% (45,1°). A ausência de material fino suficiente, mesmo com a presença de argilomineral expansivo, é que vai ocasionar esta diferença no valor de coesão aparente entre os horizontes “B” e “C”.

Os solos que tiveram alto valor de coesão na menor umidade (TR1 “B” e “C” 25% e TR9 “B” 20%) apresentaram montmorillonita da fração argila assim como Calvello et al. (2005) alertaram em seu trabalho que os solos com presença de montmorillonita na fração argila podem influenciar significativamente seu comportamento, sendo que os solos que tem 20%-25% do seu peso seco com presença deste argilomineral, podem sofrer uma redução da resistência ao cisalhamento dele quando umedecido. Embora não tenha sido feita a análise quantitativa dos argilominerais, o comportamento do solo no ensaio de resistência ao cisalhamento indica que os solos que tiveram expansão, com valores altos de coesão aparente tem grande porcentagem deste argilomineral.

Eid et al. (2016) explicita a influência do material de solo da fração argila no desenvolvimento de diferentes comportamentos de cisalhamento do solo, onde o ângulo de atrito diminui com a diminuição da tensão efetiva normal, uma vez que o solo sofre menor compressão. A mineralogia dos horizontes “B” e “C” da TR1 apresentou montmorillonita na composição. O que está influenciando os valores altos da coesão aparente para os ensaios de menor umidade (25%). A TR3 “B” apresentou vermiculita na composição mineralógica, e no horizonte “C” apresentou hidrobiotita, a presença da vermiculita (argilomineral expansivo) está influenciando o alto valor de coesão aparente para este horizonte, também na menor umidade (25%). A TR7 tem montmorillonita, mas esta não está influenciando nos resultados de coesão, pois a quantidade de material fino não é o suficiente para alterar os valores de coesão, uma vez que a fração argila deste solo é bem pequena (porcentagem).

Na TR9 o horizonte “B” com a menor umidade (20%) também apresenta alto valor de coesão aparente, e como nos outros horizontes, a quantidade de montmorillonita é suficiente para alterar o comportamento do solo quando umedecido, ou seco. Heideman (2015) em seu estudo no Estado de Santa Catarina indicou que a mineralogia dos solos pode ter influenciado o comportamento dos solos nos ensaios de resistência ao cisalhamento realizados por ele.

De acordo com os resultados de porosimetria, a TR7 é a que apresenta maior quantidade de macroporos, o que é corroborado pela granulometria, e com estas características, esta trincheira está de acordo com os valores para o ângulo de atrito, que foram um pouco maiores do que das outras trincheiras. Os valores de ângulo de atrito variaram entre 41,3° o valor maior e 23,74° o menor, e estes valores são para a mesma trincheira (TR3). Furman (2019) em seu trabalho, na Serra do Mar no Paraná, encontrou valores com pouca variação, entre 38,5° (máximo) e 34,5° (mínimo) para o ângulo de atrito e valores com variação maior para a coesão entre 8,2kPa e 81,9kPa. Os valores de coesão mostrados neste estudo têm uma variação muito maior, com o valor máximo de 310,91kPa (TR9 “B” 20%) e com o valor mínimo de 0,00kPa (TR7 “B” e “C” saturados).

Segundo MacKenna (2012), as propriedades do solo podem ser usadas para explicar porque alguns escorregamentos se deslocam com maior fluidez pela vertente, enquanto outros não, pois estas propriedades estão diretamente ligadas ao comportamento dos fluxos de água e a coesão (quanto maior a concentração de material fino, como as argilas, a tendência é que seja maior também a coesão aparente). Neste sentido a única trincheira com

característica de ser menos fluida é a TR7, pois foi a única que teve resultado NP (não plástico) no ensaio de limite, mostrando o quanto esta trincheira é arenosa.

Todos os gráficos “tensão cisalhante X tensão normal” apresentam a equação da reta na parte superior. Esta equação representa o valor da tangente do ângulo da reta, multiplicado pela normal (x), somando o valor da coesão. A partir desta equação foi possível calcular a tensão cisalhante aplicada no campo para cada umidade.

### 6.2.3.1 - RESULTADOS DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO CAMPO COM A UMIDADE

As Figuras 66 a 69 apresentadas aqui representam as resistências ao cisalhamento calculadas a partir das envoltórias de resistência ao cisalhamento para cada trincheira (TR1, TR3, TR7, TR9). A Tabela do cálculo da resistência representativa do campo está no Apêndice III. Estes gráficos mostram a situação de campo para os horizontes “B” e “C”, como foi realizado no ensaio anterior.

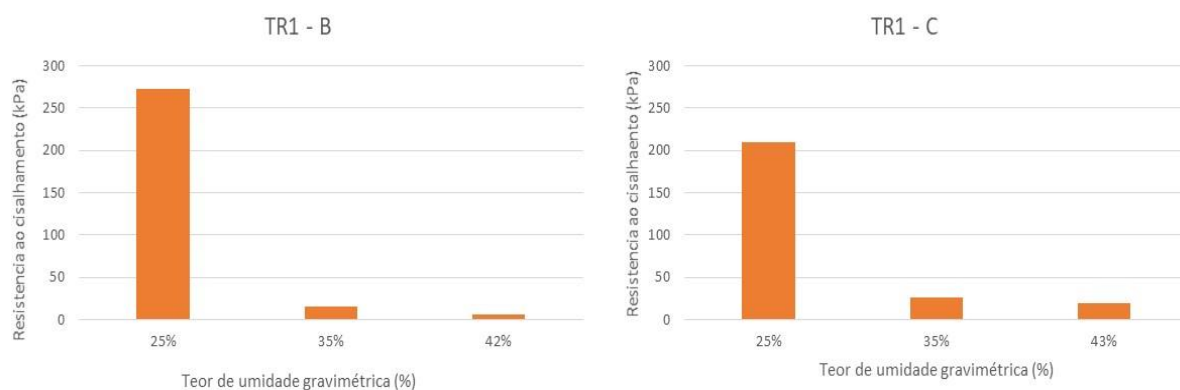


Figura 66 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para a TR1

É possível observar o quanto este solo fica mais resistente ao aumentar a sucção, ou seja, diminuindo a umidade. A coesão aparente bem maior para o ensaio com 25% de umidade gravimétrica, em ambos os horizontes. O horizonte “B” apresenta valores menores quando umedecido do que o horizonte “C”, isto se dá pela quantidade de material fino, da fração argila que apareceu no ensaio de granulometria, onde o horizonte “C” teve maior

porcentagem desta fração. Para o ensaio com menor umidade, o horizonte “B” teve um resultado de maior valor de resistência ao cisalhamento, indicando que mesmo tendo menor porcentagem de material fino, este pode ter maior quantidade de montmorillonita na composição, pois os dois horizontes apresentaram este argilomineral expansivo.

Estes gráficos mostram o quanto o solo perde resistência quando umedecido, com apenas 10% a mais de umidade este solo diminui a resistência da faixa de 200kPa para menos de 50kPa. O que em campo significa que este solo quando recebe água, aumenta sua umidade, perde muito da sua resistência ao cisalhamento (coesão aparente), tendo assim uma grande possibilidade de ocorrer um rompimento durante um evento de chuva intenso, ou um evento prolongado.

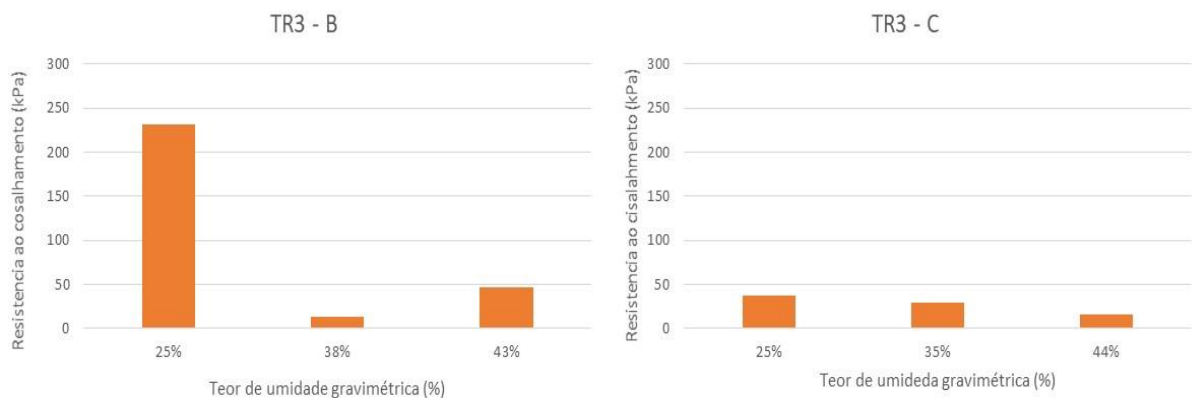


Figura 67 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para a TR3

Nesta trincheira o comportamento do horizonte “B” para a umidade de 43% apresenta um valor maior que para a umidade de 38%, este ensaio deveria ter sido repetido, mas infelizmente a volta ao campo não pode ser realizada. Embora os valores apresentados para o horizonte “B” nas umidades 38% e 43% tenham sido desconsiderados, o valor para a umidade de 25% é coerente para a granulometria e mineralogia desta trincheira, pois ela apresenta semelhança com o comportamento da TR1, como foi observado no ensaio de resistência ao cisalhamento. No horizonte “C” a resistência com a menor umidade é bem mais baixa que no horizonte anterior, sendo que a granulometria da fração argila é praticamente igual, mas o horizonte “B” apresenta argila expansiva enquanto o “C” não, justificando esta

diferença no comportamento. Nas curvas de retenção esta diferença não foi notada, mostrando que o comportamento de retenção à água teve influência da fração argila, mas a presença de argilomineral expansivo não alterou significativamente a capacidade de retenção do solo para os dois horizontes.

O horizonte “C” teve o ensaio sem problemas quanto aos resultados, mostrando valores muito coerentes (diminuindo a coesão aparente com o aumento da umidade), com os maiores valores para as menores umidades (25%), e diminuindo com a diminuição da sucção matricial (aumento da umidade).

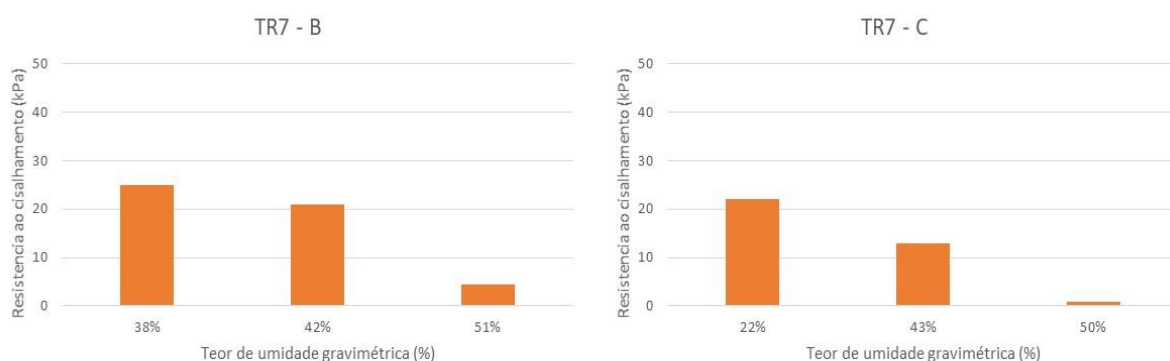


Figura 68 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para TR7

Esta trincheira não mostrou valores muito altos para as menores sucções (maiores umidades) como as outras trincheiras (TR1 nos horizontes “B” e “C”, TR3 no horizonte “B” e TR9 no horizonte “B”). Esta trincheira é muito arenosa, apresentando resultado NP (não plástico) para o ensaio de limite, e com a porosimetria mostrando maior porcentagem de macroporos do que microporos no horizonte “C”, e no “B” uma distribuição equilibrada entre os diâmetros dos poros (não apresentou uma quantidade maior de macro ou microporos como mostra a Figura 34). E por conta destas características sua resistência ao cisalhamento também vai ser menor como mostrado na Figura 68.

Os valores do horizonte “B” são um pouco maiores do que no “C”, assim como mostrou um pouco mais de material da fração argila no “B” causando esta leve diferença. Os valores de resistência são inversamente proporcionais aos valores de umidade gravimétrica apresentados para todos os solos. Esta trincheira mostrou a menor resistência para ambos os

horizontes estudados, não apresentando uma descontinuidade significativa entre eles que possa representar uma zona de fragilidade relativa à resistência ao cisalhamento.

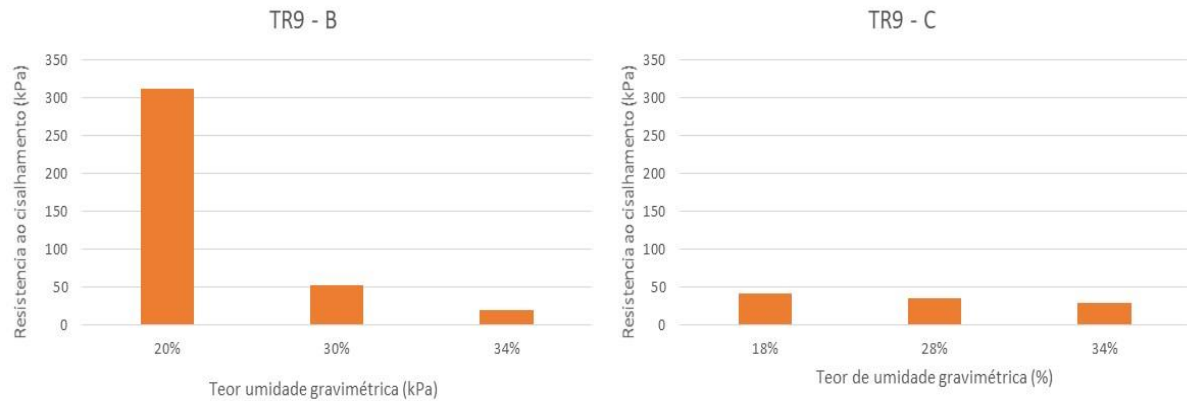


Figura 69 - Gráficos da resistência ao cisalhamento calculada para o campo com as respectivas umidades gravimétricas para a TR9

Esta trincheira apresentou uma discrepância grande nos valores de resistência para as menores umidades, sendo que no horizonte “B” o valor cai de 311,84kPa para 53,01kPa, enquanto que no horizonte “C” esta diminuição é bem menor, indo de 41,7kPa para 36,02kPa. A granulometria desta trincheira apresentou diferença considerável entre os dois horizontes, o que pode justificar esta diferença, uma vez que o horizonte “B” apresenta uma porcentagem bem maior de material da fração argila. Os dois horizontes apresentam argilomineral expansivo, mas como a quantidade de material desta fração é bem menor no horizonte “C”, sua influência não vai alterar significativamente o comportamento do solo em relação a sua resistência.

De todas as trincheiras analisadas as que tiveram maior diferença entre os valores de resistência ao cisalhamento para os horizontes “B” e “C” foram a TR3 e TR9, mesmo desconsiderando o ensaio para o horizonte “B” da TR3, os valores de resistência ao cisalhamento do solo foram diferentes indicando uma zona de descontinuidade entre os dois horizontes (“B” e “C”). A TR7 e a TR1 seguiram um padrão de resistência em relação aos dois horizontes, apresentando valores muito próximos entre os horizontes que cada trincheira representa, não indicando uma zona de descontinuidade entre os dois horizontes (“B” e “C”). Os resultados para o cálculo de campo conseguiram mostrar que em uma situação de chuva

ambos os horizontes da TR1 perdem resistência consideravelmente quando umedecidos, na TR3 apenas o horizonte “B” vai perder resistência significativamente, enquanto a TR7 tem uma leve perda da resistência em ambos os horizontes. Já a TR9 segue o mesmo comportamento da TR3 tendo uma queda maior da resistência no horizonte “B”, enquanto o horizonte “C”, assim como a TR7 é muito arenoso, tendo sua resistência ao cisalhamento baixa, mas sem alterações significativas quando umedecido.



## 7 - SÍNTESE DOS RESULTADOS

### 7.1 - TR1

A TR1 está localizada em área próxima ao divisor de águas, onde moradores usam para plantar bananeiras, tem uma declividade de aproximadamente 25% (a tabela com os cálculos em graus encontra-se no Apêndice IV). Foi dividida em 6 horizontes pedológicos. O horizonte “B” foi coletado aproximadamente a 132cm e o horizonte “C” a 177cm de profundidade no perfil. A granulometria para o ensaio com defloculante mostra um solo argiloso, chamando a atenção para o horizonte “C”, onde aparece mais argila que nos dois horizontes imediatamente superiores. O ensaio sem defloculante não mostrou argila em nenhum horizonte, mostrando a microagregação deste solo. Por conta desta diferença, as classificações texturais também mudaram.

Nos limites de consistência, os horizontes seguem o comportamento de acordo com a granulometria, onde necessita-se de maior umidade para trocar de estado de consistência para solos com maior quantidade de finos (fração argila), apresentando resultado de IP maior para o horizonte “C”. Ambos horizontes apresentaram argilomineral do tipo expansivo na composição mineralógica, assim influenciando de forma igual. O resultado do limite de contração para o horizonte “B” foi desconsiderado por apresentar valor maior que o limite de plasticidade. Não foi possível obter resultado do ensaio para o horizonte “A”, mas foi para o horizonte “C”.

Para os ensaios de permeabilidade e resistência ao cisalhamento usou-se os horizontes “B” e “C” (como já foi explicado) e para a curva de retenção usou-se também o horizonte “A”. A permeabilidade mostra que o horizonte “B” tem uma velocidade de infiltração menor que o horizonte “C”, mesmo este tendo maior quantidade de argila, pode ser que a forma dos poros possa estar influenciando no movimento da água como no trabalho de Silos et al. (2011), em que a permeabilidade diferenciada do solo para os horizontes “B” e “C” foi relacionada a poros interconectados no horizonte “B” e pouco conectados para o horizonte “C”, neste caso seria necessário um estudo micromorfológico para confirmação desta formação dos poros. O perfil apresenta anisotropia nos dois horizontes, e foi a trincheira que obteve os menores valores de permeabilidade. As curvas de retenção à água mostraram resultados diferentes os horizontes “B” e “C”, apresentando *histerese* entre as curvas de secagem e umedecimento e a entrada de ar e saída de ar (conforme a trajetória) em valores distintos de sucção. As curvas são bimodais, mostrando a presença de micro e macro poros,

como pode ser confirmado no ensaio de porosimetria com imersão de mercúrio. O horizonte “C” apresentou maior *histerese* e maior retenção à água, o que está de acordo com a granulometria destes horizontes. O horizonte “A” apresentou curvas unimodais, indicando a presença maior de macroporos, devido a presença da fração areia. A saturação dos corpos de prova na trajetória de secagem chegou bem próximo a porosidade medida na Tabela 18, mostrando que este solo é capaz de preencher muitos dos seus poros por contrapressão

Os ensaios de fluorescência e difração de raio X confirmam a intemperização deste perfil, mas com a presença de montmorillonita nos horizontes “B3”, “B/C” e “C”, mostrando que sua presença está influenciando na permeabilidade destes horizontes. O intemperismo pode afetar a formação dos constituintes do perfil de solo, afetando seu comportamento mecânico em relação a presença de água, e conseqüentemente sua estabilidade, como foi analisado por Sajinkumar et al. (2011), que ao realizar estudo em solos derivados de gnaiss e granito constatou que a ocorrência de escorregamentos ocorreu em áreas com maior intensidade do processo de intemperismo. Outros autores também realizaram estudos relacionando os processos de intemperismo com a instabilidade de encosta (Irfan, 1998; Wen e Aydi, 2004; Tiwari e Ajmera, 2011).

A presença de gibbsita nos horizontes inferiores indica que o material está sendo influenciado por colúvio, e não somente um desenvolvimento *in situ*, com intemperismo sobre a rocha, mas uma mistura dos dois (rocha e colúvio), que poderia explicar a presença de gibbsita e montmorillonita, juntos nos horizontes mais profundos. A alteração da estrutura do solo por conta de colúvio afeta a permeabilidade.

Os resultados da resistência ao cisalhamento mostraram que esta trincheira tem alta resistência para baixas umidades (alta sucção), assumindo valores muito altos (“B”-272,19kPa e “C”-209,21kPa) com um comportamento igual para os horizontes “B” e “C”, mostrando uma queda na resistência com o aumento da umidade. Não houve uma diferença significativa entre os horizontes para os valores de resistência. Esta resistência está sendo influenciada pela presença de argila expansiva, que ao perder água se contrai, rearranjando os poros, diminuindo o espaço poroso. Quando tem uma diminuição da porosidade total, o solo sofre uma expansão ao ser cisalhado, porque ao sofrer uma tensão ele não terá espaço suficiente para acomodar os grãos que irão se locomover.

Em caso de chuvas prolongadas, este solo será capaz de absorver consideravelmente a água, o horizonte A não tem grande capacidade de absorção por conta da sua granulometria mais arenosa, como foi observado no ensaio de granulometria, mineralogia

e curva de retenção. Assim que atingir a capacidade de campo, esta água vai começar a infiltrar nos horizontes subjacentes, o horizonte “B” mais profundo (o analisado neste estudo) vai ser capaz de absorver umidade, porque apresenta quantidade significativa de material da fração argila (ensaio de granulometria) e argila expansiva. No ensaio de curva de retenção observamos que este horizonte tem capacidade de absorver a umidade, quando umedecido lentamente, mas ele tem baixa capacidade de conduzir esta água, principalmente na direção vertical, fluindo melhor na horizontal. Ao atingir sua capacidade de campo, esta água vai chegar ao horizonte “C”, este por sua vez tem maior capacidade de absorção que o “B”, como mostra a curva de retenção. Este horizonte também apresenta maior porcentagem de material da fração argila, e por isso seu IP é maior (Índice de plasticidade), além de também ter na composição mineralógica a presença de argila expansiva. Mas apesar de ter maior porcentagem de material fino (fração argila) este solo vai ter uma velocidade de infiltração da água na vertical maior que na horizontal. A resistência dos dois horizontes cai consideravelmente quando umedecidos, apresentando valores bem próximos. Enquanto a chuva for lentamente entrando no sistema, este solo é capaz de absorver a água sem provocar uma ruptura, se após um longo período esta chuva não cessar este solo pode perder sua resistência, pois sua capacidade de conduzir a água não é muito eficiente. Se considerar um evento de chuva concentrado, o horizonte “B” deve saturar antes do “C”, pois sua capacidade de retenção é menor, assim como sua condutividade hidráulica, levando assim a uma perda de resistência mais rápida que o horizonte “C”.

Existe uma diferença entre os horizontes “B” e “C”, tanto na capacidade de retenção, quanto na condutividade hidráulica, esta diferença entre eles forma uma descontinuidade no fluxo de água, indicando uma possível zona de ruptura.

## 7.2 - TR3

A TR3, está localizada em área de pequeno platô, com cobertura de gramínea, tem uma declividade de aproximadamente 12% (a tabela com os cálculos em graus encontra-se no Apêndice IV). Foi dividida em 5 horizontes pedológicos, mas para o cálculo dos ensaios de permeabilidade, resistência e curva de retenção a água, foram usados os horizontes “A”, “B” e “C” (como já foi explicado anteriormente). O horizonte “B” foi coletado a aproximadamente 111cm e o horizonte “C” a 157cm. No ensaio de granulometria com defloculante o solo apresentou argila, especialmente no horizonte “B1” (53%), decrescendo com a profundidade.

No ensaio com defloculante o material da fração argila para os horizontes “B2” e “C” tem quase a mesma porcentagem. Para o ensaio sem defloculante, nenhum horizonte apresentou argila, mostrando um solo microagregado. As classificações texturais mudaram de um ensaio para outro, por conta desta diferença.

Para os ensaios de limite de consistência, os horizontes seguem o comportamento de acordo com a granulometria, chamando a atenção para o horizonte “B2”, que na granulometria apresenta quantidade de argila próxima a do horizonte “C”, mas neste ensaio tem o limite de liquidez bem maior, aumentando o IP que para o horizonte “B2” é de 24,6%, enquanto que para o “C” é de 15,7%. Esta diferença pode ser explicada pela presença marcante de vermiculita no horizonte “B2”, um mineral expansivo, com grande capacidade de absorção de água. Enquanto que no “C” aparece a hidrobiotita, sem a presença de argilomineral expansivo. Não foi possível obter resultado do ensaio de limites para o horizonte “A”, mas foi para o horizonte “C”. Brindley et al. (1983) fizeram uma relação da presença da hidrobiotita em áreas com vermiculita e biotita, discutindo se a hidrobiotita tem as características válidas para ser considerada um mineral por ter camadas interestratificadas. Neste trabalho também foi verificada a presença de hidrobiotita com a vermiculita. Mas este mineral não tem capacidade expansiva, não interferindo no comportamento mecânico do solo, não alterando assim a capacidade deste solo de alterar sua estrutura na presença ou não da água podendo causar uma descontinuidade hídrica.

Para o ensaio de permeabilidade o perfil apresenta isotropia no horizonte “C” na ordem de grandeza de  $10^{-4}$  m/s e anisotropia para o horizonte “B”, embora os valores sejam próximos, a permeabilidade horizontal é maior (da ordem de  $10^{-3}$  m/s). Este perfil não apresenta uma descontinuidade significativa entre os horizontes “B” e “C” em relação a permeabilidade da água, dificultando a formação de uma frente de umedecimento em qualquer um dos horizontes em relação ao outro. Os resultados das curvas de retenção à água mostraram *histerese* em todas as curvas, sendo que no horizonte “C” ela ocorre em baixas sucções, e à medida que esta sucção aumenta a *histerese* praticamente desaparece, vale lembrar que este horizonte não apresenta argila expansiva na composição. As saturações para o horizonte “B” são um pouco menores, para ambas as curvas. As curvas “B” e “C” são bimodais, podendo ser confirmado no ensaio de porosimetria, que mostrou a presença de macro e microporos. O horizonte “A” apresentou curvas unimodais, indicando a presença maior de macroporos, devido a fração areia.

Os ensaios de fluorescência e difração de raio X confirmam a intemperização deste perfil, mas com a presença de vermiculita e hidrobiotita no horizonte “B2”. No horizonte “C”, aparece hidrobiotita, assim como gibbsita, sem a presença de argilomineral expansivo. Embora a composição mineral seja diferente para os dois horizontes, os resultados de permeabilidade não mostraram valores significativamente distintos entre si (Todos os minerais encontrados no ensaio de difração, para todas as trincheiras, podem ser vistos no Apêndice V). Lembrando que a granulometria em relação a quantidade de argila, é quase a mesma. Em trabalho realizado em região tropical em solo desenvolvido sobre granito, Li e Zhou (2020) discutem que a variação físico-química dos minerais de argila, que ocorre durante o processo de intemperismo, aumenta o contraste da capacidade de absorção para os minerais de argila em diferentes horizontes do perfil de solo. Esta diferença foi notada nesta trincheira para os horizontes “B” e “C” no ensaio de curva de retenção, onde o horizonte “B”, embora tenha valores menores de saturação, é capaz de reter mais a água em altas sucções.

Nos horizontes mais profundos aparece também a gibbsita, junto a argilomineral do tipo expansivo (vermiculita), o que indica que o material está tendo um desenvolvimento influenciado por colúvio, mas a presença de hidrobiotita e vermiculita, que não aparecem em outras trincheiras também indica que este solo está se desenvolvendo sobre a influência da rocha e do solo coluvionar depositado.

Os resultados de resistência ao cisalhamento mostraram alto valor no ensaio com menor umidade para o horizonte “B”, mas o horizonte “C” não teve o mesmo comportamento, indicando uma diferença em relação a resistência destes horizontes, causando assim uma descontinuidade entre eles. Esta diferença apareceu nos gráficos dos resultados para o campo, embora os ensaios do horizonte “B” tenham dado resultados incorretos para as maiores umidades. No ensaio com 25% do horizonte “B” houve expansão no gráfico de “deslocamento vertical X deslocamento horizontal”, com a presença de vermiculita influenciando este comportamento, por ser um argilomineral expansivo, ou seja, tem grande capacidade de absorção de água, e na ausência (diminuição da água) reduz consideravelmente seu volume (Apêndice VI), alterando a estrutura e rearranjando os poros. Os gráficos que mostram a condição de campo, indicam uma diferença considerável entre os horizontes, uma vez que no horizonte “C” não há presença de argilomineral expansivo.

Em caso de chuvas prolongadas, este solo será capaz de absorver consideravelmente a água, o horizonte A não tem grande capacidade de absorção por conta da sua granulometria mais arenosa, como foi observado no ensaio de granulometria, mineralogia

e curva de retenção. Assim que atingir a capacidade de campo, esta água vai começar a infiltrar nos horizontes subjacentes, o horizonte “B” mais profundo vai ser capaz de absorver umidade, porque apresenta quantidade significativa de material da fração argila (ensaio de granulometria) e argila expansiva. No ensaio de curva de retenção observamos que este horizonte tem capacidade de absorver a umidade, quando umedecido lentamente, e sua condutividade hidráulica é relativamente alta, principalmente na direção horizontal. Ao atingir sua capacidade de campo, esta água vai chegar ao horizonte “C”, este por sua vez tem menor capacidade de absorção que o “B”, como mostra a curva de retenção.

O horizonte “B” apresenta porcentagem quase igual de material da fração argila, mas seu IP é maior (Índice de plasticidade) por causa da presença de argilomineral expansivo (vermiculita). Esta diferença entre os horizontes aparece nas curvas de retenção, onde o “B” satura com valor menor, mas retém mais a água.

O horizonte “C” apesar de ter a porcentagem de material fino (fração argila) praticamente igual ao “B”, apresenta isotropia para a condutividade hidráulica, isto provavelmente está relacionado a ausência de argila expansiva na composição mineralógica. Como logo depois do horizonte “C” tem a rocha, e este tem menor capacidade de retenção do que o “B”, esta água tende a saturar de baixo para cima. Novamente mostrando uma zona de descontinuidade entre os horizontes “B” e “C”.

O ensaio de resistência, do horizonte “B” apresentou problemas, mas mostrou o mesmo comportamento da TR1, com um valor bem alto de coesão aparente quando seco, diferente do “C”, isto se deve a presença de argila expansiva no “B”. Com este resultado entende-se que ao infiltrar neste solo, a água vai ser melhor retida pelo horizonte “B” aguentando por um período maior de chuva sem perder sua resistência, já o horizonte “C” não tem esta capacidade. Esta água se for concentrada vai ser melhor conduzida que a trincheira anterior, em ambos os horizontes, dificultando a formação de um lençol suspenso, o que faria com que este solo perdesse resistência.

Existe uma diferença entre os horizontes “B” e “C”, tanto na capacidade de retenção, quanto na condutividade hidráulica, esta diferença entre eles forma uma descontinuidade no fluxo de água, indicando uma possível zona de ruptura. Esta diferença se dá principalmente pela ausência de argila expansiva no horizonte “C”.

### 7.3 - TR7

A TR7, está localizada em parede de antiga cicatriz de escorregamento, com mata ao redor, tem uma declividade de aproximadamente 75% (a tabela com os cálculos em graus encontra-se no Apêndice IV). Foi dividida em 5 horizontes pedológicos. Mas para o cálculo dos ensaios de permeabilidade e resistência foram usados os horizontes “B” e “C” e para as curvas também o horizonte “A”. O horizonte “B” foi coletado a aproximadamente 30cm e o horizonte “C” a 54cm. No ensaio de granulometria com defloculante o solo apresentou pouca argila, o horizonte “B1” (21%) foi o que teve maior porcentagem, mesmo assim um valor baixo em relação aos outros perfis. Para o ensaio sem defloculante, só um horizonte apresentou argila (“B2”), foi o único que teve argila no ensaio sem defloculante para todas as amostras, indicando que esta fração não está tão agregada quanto as demais. Esta trincheira foi a única que só teve alteração na classificação textural para os horizontes superiores (“A” e “B1”), os outros permaneceram iguais. Silva et al (2016) mostra em seu trabalho que a grande quantidade de silte na granulometria indica uma pedogênese recente com uma fragilidade deste solo.

Nos ensaios de limites de consistência os resultados seguem a granulometria, dando resultado somente para o horizonte “B1”, todos os outros horizontes deram NP (não plástico), e o IP foi o menor de todos, mostrando que o solo muda de estado plástico para líquido com pouca adição de água. Os resultados estão de acordo com a granulometria, predominantemente arenosa. A mineralogia dos dois horizontes é muito parecida, o que não justifica nenhuma alteração na mudança de estado do solo, como foi observado. Embora apareça argilomineral expansivo na composição do solo, este parece não ter porcentagem suficiente para alterar o solo mecanicamente.

Para o ensaio de permeabilidade o horizonte “B” é isotrópico na ordem de grandeza de  $10^{-4}$  m/s, e o horizonte “C” tem uma pequena diferença para as direções diferentes. Este perfil foi o mais arenoso, mas a permeabilidade não mostrou esta diferença, uma vez que deveria mostrar velocidades maiores da água no seu interior. Os resultados das curvas de retenção à água mostraram uma *histerese* maior para o horizonte “C”, com uma diferença das outras curvas por apresentar uma perda de água grande na primeira entrada de ar (macroporos) e saída de ar no caso da trajetória de umedecimento. Este comportamento está de acordo com a granulometria mais arenosa desta trincheira, e com o ensaio de porosimetria, onde foi demonstrado que esta trincheira foi a única que apresentou uma quantidade maior de macroporo do que de microporos para o horizonte “C” e uma melhor distribuição entre os

diâmetros de poros do horizonte “B” (não há um pico definido). As saturações para ambos os horizontes são muito próximas, e as curvas “B” e “C” são bimodais, e as curvas do horizonte “A” são unimodais, como as das trincheiras anteriormente analisadas e apresentaram os menores valores de saturação entre as trincheiras.

O ensaio de fluorescência de raio X confirma um perfil não tão intemperizado (Apollaro et al., 2019), com grande concentração de  $\text{SiO}_2$ . No ensaio de DRX aparece caulinita nos horizontes mais superficiais (“A”, “B1” e “B2”) e nos horizontes mais profundos apresenta gibbsita, motmorillonita e quartzo. Embora apareça montmorillonita, esta não tem influência suficiente para alterar a condição de absorção de água nestes horizontes (pouca porcentagem de material da fração argila), por isso as curvas de retenção têm um comportamento de acordo com a granulometria, e a permeabilidade não tem grandes alterações de um horizonte para outro (“B” e “C”), o que seria esperado, uma vez que a granulometria foi bem arenosa e a porosimetria mostrou grande quantidade de macro poros.

Esta trincheira foi a que apresentou material bem arenoso ao longo de todo o perfil, indicando um solo não muito desenvolvido (por estar em região de granito), com pouco material da fração argila, mas aparece gibbsita em todos os horizontes, o que não era esperado para os horizontes mais profundos. Esta presença de gibbsita (principalmente nos horizontes “C”) indica que este solo também pode ter material coluvionar influenciando sua composição.

Os resultados da resistência mostraram valores de resistência coerentes com a granulometria, com valores não tão altos de coesão aparente como os das outras trincheiras (nas baixas umidades) variando, no horizonte “B”, de 24,36kPa (38%), 20,7kPa (42%) e 0,00kPa (Sat). No horizonte “C”, variando de 21,96kPa (22%), 12,62kPa (43%) e 0,00kPa (Sat). Esta trincheira foi a que mostrou comportamento mais uniforme em relação ao aumento de umidade, entre os dois horizontes, tanto para os ensaios em laboratório quanto para o cálculo da situação de campo, sendo difícil apontar uma descontinuidade significativa entre eles.

Em caso de chuvas prolongadas, este solo não terá capacidade de reter a água, o horizonte A, assim como o “B” e o “C” não tem capacidade de retenção por conta da sua granulometria mais arenosa, como foi observado nos ensaios de granulometria e porosimetria. Assim que atingir a capacidade de campo, esta água vai começar a infiltrar nos horizontes subjacentes, o horizonte “B” mais profundo vai ser capaz de absorver um pouco melhor a umidade do que o “C”, como mostrou o ensaio de curva de retenção. Entretanto, o ensaio de condutividade hidráulica mostra valores não muito altos para ambos os horizontes, assim os



horizontes vão saturar mais rapidamente porque não tem capacidade de absorção da água e sua drenagem não é tão eficiente. Neste solo, não foi possível obter os ensaios de limites de consistência. Embora os dois horizontes sejam muito parecidos, o ensaio de curva de retenção mostrou uma diferença entre eles, onde o horizonte “B” apresenta maior capacidade de retenção, apresentando uma zona de descontinuidade entre eles.

O ensaio de resistência não mostrou diferença significativa entre os horizontes, mas ambos tiveram baixa resistência para o ensaio de menor umidade, mostrando que este solo durante um evento de chuva prolongado vai chegar próximo a saturação mais rapidamente que as outras trincheiras, perdendo sua resistência. Se for um evento de chuva concentrado, esta água vai saturar rapidamente os poros (maior parte dos poros do solo são macroporos), levando também a perda de resistência.

Não existe uma diferença significativa entre os horizontes “B” e “C”, tanto na capacidade de retenção, quanto na condutividade hidráulica, desta forma não aparece uma diferença entre eles que possa apresentar uma descontinuidade no fluxo de água, indicando uma possível zona de ruptura, por diferença em relação a dinâmica da água.

#### 7.4 - TR9

A TR9 está localizada em área íngreme, próxima ao topo da vertente, com cobertura de mata. Tem uma declividade de aproximadamente 70% (a tabela com os cálculos em graus encontra-se no Apêndice IV). Foi dividida em 5 horizontes pedológicos. Mas para o cálculo dos ensaios de permeabilidade e resistência foram usados os horizontes “B” e “C” e para as curvas também o horizonte “A”. O horizonte “B” foi coletado a aproximadamente 110cm e o horizonte “C” a 152cm. No ensaio de granulometria com defloculante o solo apresentou argila, especialmente nos horizontes “B2” (39,6%) e “B3” (40,1%), diminuindo bem no horizonte “C” (14,2%). Para o ensaio sem defloculante, nenhum horizonte apresentou argila, mostrando um solo microagregado. As classificações texturais mudaram de um ensaio para outro, por conta desta diferença.

Para os ensaios de limite de consistência os horizontes seguem o comportamento de acordo com a granulometria, chamando a atenção para o horizonte “B3”, que na granulometria apresenta quantidade de argila próxima à do horizonte “B2”, mas neste ensaio tem o limite de liquidez bem maior, aumentando o IP que para o horizonte “B2” é de 15,3% e

para o “B3” é de 26,1%, esta diferença está sendo influenciada por argilominerais expansivos que tem grande capacidade de absorção de água. Os horizontes “A” e “C” deram NP, por não terem material fino suficiente para o ensaio.

Para os ensaios de permeabilidade e resistência ao cisalhamento usou-se os horizontes “B” e “C” (como já foi explicado) e para a curva de retenção usou-se também o horizonte “A”. O ensaio de permeabilidade mostra que o horizonte “B” ( $10^{-5}$  m/s) tem uma velocidade de infiltração bem menor que o horizonte “C” ( $10^{-3}$  m/s), este comportamento está de acordo com a granulometria, onde o horizonte “C” é bem arenoso (deu NP para os limites), mesmo com presença de montmorillonita, ele drena melhor. Ambos os horizontes são anisotrópicos. Os resultados das curvas de retenção à água são muito parecidos para as curvas dos horizontes “B” e “C”, apresentando *histerese* entre as curvas de secagem e umedecimento e a entrada de ar (secagem) ou saída de ar (umedecimento) em valores de sucção próximos, para ambos os horizontes, tendo uma pequena diferença na curva de secagem do horizonte “B”, que retém um pouco mais de água (presença de argilomineral expansivo). A *histerese* do horizonte “C” não é tão expressiva, por conta da baixa quantidade de material da fração argila. As curvas do “B” e “C” são bimodais mostrando a presença de micro e macro poros, como pode ser confirmado no ensaio de porosimetria com imersão de mercúrio. O horizonte “A” apresentou curvas unimodais, indicando a presença maior de macroporos, observado no ensaio de granulometria com presença da fração areia. As propriedades hidrológicas vão ser influenciadas pela cobertura do solo (Wiegand et al. 2013).

Os resultados de resistência ao cisalhamento apresentaram um valor muito alto para o ensaio com a menor umidade do horizonte “B”, sendo que o horizonte “C” não teve o mesmo comportamento, indicando uma diferença em relação a resistência destes solos, esta mesma diferença ocorre nos gráficos da situação de campo. Este ensaio (horizonte “B” – 20%) apresentou expansão no gráfico de “deslocamento vertical X deslocamento horizontal”, mostrando que a presença de montmorillonita influenciou este comportamento. Os resultados para os outros ensaios ficaram coerentes, diminuindo conforme aumenta a umidade (diminuindo a sucção). Irfan (1996) em seu trabalho sobre intemperização de granito em Hong Kong mostra que mesmo no material que sofreu um grande processo de intemperismo existe uma coesão verdadeira significativa devido a ligação do material primário oriundo do granito, e este mesmo comportamento pôde ser observado nesta trincheira, que também está em área com granito em região tropical.

Esta foi a única trincheira que não apresentou gibbsita nos horizontes mais profundos, o que indica que, pelo menos este horizonte, não tem influência de material coluvionar, tendo seu desenvolvimento a partir da rocha (*in situ*). Os horizontes superiores podem ter material de colúvio atuando junto com o solo do processo de intemperismo.

Em caso de chuvas prolongadas, este solo será capaz de absorver consideravelmente a água no horizonte “B”. O horizonte A não tem grande capacidade de absorção por conta da sua granulometria mais arenosa, como foi observado no ensaio de granulometria, mineralogia e curva de retenção. Assim que atingir a capacidade de campo, esta água vai começar a infiltrar nos horizontes subjacentes, o horizonte “B” mais profundo vai ser capaz de absorver umidade, porque apresenta quantidade significativa de material da fração argila (ensaio de granulometria) e argila expansiva. No ensaio de curva de retenção observamos que este horizonte tem capacidade de absorver a umidade, quando umedecido lentamente, e sua condutividade hidráulica é baixa, principalmente na direção horizontal. Ao atingir sua capacidade de campo, esta água vai chegar ao horizonte “C”, este por sua vez tem menor capacidade de absorção que o “B”, como mostra a curva de retenção, e é capaz de drenar melhor a água por ser bem arenoso.

O horizonte “B” também apresenta maior porcentagem de material da fração argila, e por isso deu resultado de IP (Índice de plasticidade), o “C” não deu. Esta diferença entre os horizontes aparece nas curvas de retenção, onde o “B” satura com valor menor, mas retém mais a água. O horizonte “C” é bem mais arenoso que o “B”, e este tem menor capacidade de retenção, logo esta água tende a saturar de baixo para cima. Novamente mostrando uma zona de descontinuidade entre os horizontes “B” e “C”.

O ensaio de resistência, do horizonte “B” apresentou um valor bem alto de coesão aparente quando seco, diferente do “C”, isto se deve a diferença da quantidade de material da fração argila no “B”. Com este resultado entende-se que ao infiltrar neste solo, a água vai ser melhor absorvida pelo horizonte “B” aguentando por um período maior de chuva sem perder sua resistência, já o horizonte “C” não tem esta capacidade. Esta água se for concentrada, o horizonte “B” vai retê-la até atingir sua capacidade de campo, e vai drenar para o horizonte “C” que vai saturar bem mais rápido criando uma zona de descontinuidade, além de perder sua resistência bem mais rápido.

O processo de desencadeamento dos escorregamentos em relação a variação da umidade, deve levar em consideração as propriedades dos solos (Fan et al., 2016), assim como o evento de chuva é uma variável de grande relevância nestes estudos. Como foi

mostrado nas 4 trincheiras estudadas, a resistência ao cisalhamento diminui com o aumento da umidade, ou seja, a resistência do solo é controlada pela poro-pressão (conteúdo de água no solo).

Esta hidratação do solo vai alterar sua resistência, mas o evento de chuva pode ser intenso e de curta duração, ou pode acontecer por um período prolongado. Os solos estudados vão se comportar de forma diferente para cada evento, tanto no perfil, com diferenças entre os horizontes “B” e “C”, quanto ao longo da encosta, apresentando perfis com características bem diferentes, como foi discutido acima.

Assim como no trabalho de Yeh e Lee (2013) que concluíram que a sucção matricial é afetada pelo grau de saturação efetivo, controlado pelos eventos de chuva e que escorregamentos rasos são afetados pelo montante de chuva e as propriedades dos solos, também pode-se concluir com os resultados apresentados, que a pluviosidade (tanto na intensidade quanto na duração) e as propriedades do solo influenciam nos processos de instabilização das vertentes, mas a mineralogia também vai influenciar, pois mesmo que tenha um horizonte com grande quantidade de argila, esta pode não ter o mesmo comportamento de retenção a água que outro horizonte com menos material da fração argila, esta diferença foi observada na trincheira TR3, que tem praticamente a mesma quantidade de material da fração argila, mas a presença de argila expansiva no horizonte “B” está influenciado seu comportamento mecânico. Cerri et al. (2020) analisam que a mineralogia e a distribuição do tamanho dos poros vão influenciar na instabilidade da encosta, assim como também foi observado neste trabalho.

A heterogeneidade espacial das propriedades dos solos ao longo da encosta e seu desequilíbrio morfológico foram associadas às variações espaciais nos processos físicos e químicos que alteraram o solo do perfil (Yoo et al., 2009). Pode-se dizer que neste trabalho também foram mostradas heterogeneidades ao longo da encosta, e estas provavelmente estão associadas ao material de origem diferenciado encontrado na vertente.

## 8 - CONCLUSÕES

As caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e as propriedades hidráulicas e geotécnicas dos horizontes de solo das 4 trincheiras estudadas, permitiram a realização de uma análise de comportamento quanto a estabilização da encosta nos locais onde estas trincheiras se localizavam.

Todos os solos analisados no ensaio de granulometria sem defloculante mostraram que a fração argila está microagregada e apresenta comportamento de silte e areia fina, principalmente, porque neste ensaio todos os solos apresentaram resultado de 0% na fração argila. Este comportamento indica um solo com boa drenagem, o que também dificulta a saturação e, conseqüentemente, diminui a possibilidade de perda de resistência do material. A TR1 mostrou resultado com valores baixos para a permeabilidade nos horizontes “B” e “C”, mesmo apresentando microagregação do solo, este comportamento pode ser explicado pela presença de material coluvial e constante alteração por conta do plantio de bananeiras.

A constituição mineralógica e a textura do solo influenciaram diretamente nos fluxos e comportamento da água no seu interior. Os solos com material mais fino apresentaram maior capacidade de retenção da água, necessitando de maior energia (sucção) para retirar esta água do solo. A presença de argilominerais do tipo expansivo também influenciaram o comportamento do solo em relação a água, como foi observado na TR3, onde os horizontes “B” e “C” tiveram praticamente a mesma quantidade de material da fração argila, mas a presença de vermiculita (argila expansiva) alterou seu comportamento mecânico frente ao aumento da umidade.

As quantidades diferentes das frações granulométricas do solo influenciaram no seu comportamento. Os solos com maior quantidade de finos não necessariamente apresentaram maiores valores de porcentagem de água necessária para mudar o estado de consistência do solo, pois em alguns casos a quantidade de fração argila foi a mesma, mas novamente, a presença de argilominerais expansivos alterou a capacidade de absorção, logo foi preciso uma maior quantidade de água para alterar o estado de consistência do solo em horizontes com a presença de argilominerais expansivos.

O horizonte A apresentou uma retenção de água maior para baixos valores de sucção, enquanto o solo ainda tem bastante quantidade de água, e uma queda rápida quando a energia (sucção) aumenta, o mesmo acontece com os horizontes com maior quantidade de areias e silte. Quanto mais argiloso o solo, maior foi a energia necessária para remoção da

água, pois neste caso está retida nos microporos. A presença de material expansivo também alterou a capacidade de retenção da água. A determinação das curvas foi fundamental para verificar o comportamento hidráulico dos solos em relação a variação da umidade (saturação ao solo seco). Assim, o horizonte “C” da TR9 e a TR7 mostraram curvas com menor retenção à água.

O ensaio de permeabilidade mostrou um comportamento muito interessante para os fluxos de água. A maior condutividade hidráulica foi obtida para a direção horizontal (em relação a declividade) no horizonte “B”, com exceção da TR9 (trincheira com maior inclinação), mostrando que este horizonte tem dificuldade de saturar porque a água que infiltra vai se deslocar horizontalmente mais rápido. Para o horizonte “C” a condutividade hidráulica na direção vertical é maior (exceção da TR3) indicando que poderá se formar um lençol suspenso capaz de saturar o solo verticalmente aumentando a poro-pressão positiva, podendo levar assim, à ruptura deste solo. As condutividades hidráulicas das trincheiras mantiveram valores próximos, somente a TR1 apresentou valores muito variados, o que pode estar sendo influenciado por material coluvionar e constante interferência humana.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dependem do grau de saturação, sendo menos resistentes à medida que aumenta a quantidade de água no solo, diminuindo a tensão capilar. Foi observado que o aumento da sucção matricial (menor umidade) resultou em aumento da coesão aparente, e em alguns casos foram muito significantes, apresentando valores altos como TR9 “B” 20% com 310,91kPa. A presença de argilomineral expansivo na composição de solo acarretou uma alta contração para baixos valores de umidade e, conseqüente expansibilidade sob esforço cisalhante.

Os ensaios de retenção à água, permeabilidade e resistência ao cisalhamento direto mostraram que há uma diferença de comportamento entre os horizontes “B” e “C” dos solos estudados. A mineralogia mostrou que a presença de argilominerais, como os expansivos, influenciaram significativamente esses resultados. Assim, a constituição química e mineralógica dos solos é um fator de grande influência, podendo conter argilominerais como os encontrados, que podem alterar o comportamento mecânico dos solos.

O aumento da umidade diminuiu a resistência ao cisalhamento do solo, sendo muito representativa esta diferença em algumas trincheiras. Todas as trincheiras apresentaram comportamentos diferentes, mostrando a heterogeneidade dos solos para uma mesma encosta. Assim como os horizontes “B” e “C” apresentaram comportamentos diferentes com a variação da umidade, comprovando a hipótese apresentada, de que entre estes horizontes

existe uma descontinuidade, criando uma zona de fragilidade, que pode levar a uma ruptura. Assim, ao longo de uma mesma encosta, existem porções que se desprendem e outras não, pois existe uma variedade de tipos de solo na mesma vertente que se comportam de forma diferente em relação ao aumento da umidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação da Massa Específica dos Grãos. NBR 6458. 2016a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Análise Granulométrica. NBR 7181. 2016b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação do Limite de Liquidez. NBR 6459. 2016c.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180. 2016d.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Determinação do Limite de Contração. NBR 7183. 2016e.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - Amostras de Solos - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. NBR 6457.2016f.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – Rochas e solos. NBR 6502. 1995.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – Permeabilidade de carga variável NBR 13292/95 carga constante e 14545/2000 a carga variável
- Alcántara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, Natural Hazard, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries. *Geomorphology*, n<sup>o</sup> 47, p. 107-124.
- Almeida, F.F.M. Carneiro, C. Dal Ré. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n<sup>o</sup> 2, p. 135-150.
- Alves de Lima, M.J.C.P. Apostila de Mecânica dos Solos Volume I – Fortificação e Construção. Instituto Militar de Engenharia – IME.
- Apollaro, C. Perri, F. La Pera, E. Fuoco, I. Critelli, T. 2019. Chemical and mineral-petrographical changes in granulite rocks affected by weathering process. *Front. Earth Science*, 13(2), p. 247-261.
- Augusto Filho, O. 1992. Caracterização Geológico-geotécnica Voltada a Estabilização de Encostas: uma proposta metodológica. In 1 Conferencia Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, 1, anais ABMS/ABGE, Rio de Janeiro, p. 721-733.
- Augusto Filho e Virgili, 1998. Estabilidade de Taludes. In Oliveira, A.M.S. e Brito, S.N.A, *Geologia de Engenharia*, cap. 15, ABGE, São Paulo, p. 243-269.
- Augusto Filho, O e Wolle, C.M. 1996. Cartas de Riscos de Escorregamentos: uma Proposta Metodológica e sua Aplicação no Município de Ilha Bela, SP. *Ver. Solos e Rochas*, v.19, n 1, p. 45-62.



- Augusto Filho, O. Magalhães, F.S. 2004. Identification of Slope Instability Hazard Areas in the Anchieta-Imigrantes Highway System, located in the Serra do Mar Mountain Range, São Paulo state, Brazil. Proceedings of the ninth international symposium on landslides, Landslides: Evaluation and Stabilization, editors: Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayão. Rio de Janeiro, v, 1 p. 273-280.
- Azevedo, R.A. 2019. Conceitos fundamentais sobre Migmatitos. *Terrae didática*, v.15 p.1-7 e019001. DOI: 10.20396/td.v15i0.8653435.
- Band, L. E.; Hwang, T.; Hales, T.C.; Vose, J.; Ford, C. 2012. Ecosystem processes at the watershed scale: Mapping and modeling ecohydrological controls of landslides. *Geomorphology*, v. 137, p. 159–167, 2012.
- Barsch, D. e Caine, N. 1984. The Nature of Mountain Geomorphology. *Mountain Research and Development*, Vol. 4, No. 4, pp. 287-298. Published by: International Mountain Society.
- Bernardes, 2003. Investigação Sobre a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual de Gnaisse. Dissertação de mestrado do Programa de pós-graduação.....
- Bini, G.M.P. (2012). Análise dos Movimentos de Massa nas Microbacias Fluviais: Saltinho, Belchior Baixo, Sertão e Porto Arraial – Gaspar, SC. Dissertação de Mestrado em Geografia, na área de concentração: Utilização e Conservação dos Recursos Naturais, UFSC, Florianópolis, SC.
- Bogaart, P.W. Troch, P.A. 2006. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 925–936.
- Bonder, B.H. 2008. Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar de Campinas Obtidas Mediante técnicas de Laboratório e de Campo. Dissertação de mestrado da Faculdade de Eng. Civil, área de geotecnia da UNICAMP.
- Bora, C.F. 2015. Análise de estabilidade de uma encosta da serra do mar paranaense: influências da consideração da poropressão e do fluxo em meio não saturado. Dissertação de mestrado em geotecnia do programa de pós-graduação em Engenharia de construção civil, UFPR.
- Bordoni, M. Meisina, C. Valentino, R. Lu, N. Bittelli, M. Chersich, S. 2015. Hydrological Factors Affecting Rainfall-Induced Shallow Landslides: From the Field Monitoring to a Simplified Slope Stability Analysis. *Engineering Geology*, n<sup>o</sup> 193, p. 19-37.
- Brady, N.C. Weil, R.R. 2013. *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. 3<sup>a</sup> Edição. Ed. Bookman.

- Braga, L.G. 2015. análise geomorfológica e geotécnica em encostas suscetíveis a processos erosivos - bacia hidrográfica do ribeirão contagem- DF. Dissertação de mestrado em geografia na área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, UNB, p. 50.
- Bridley, G.W. Zalba, P.E. Betheke, C.M. 1983. Hydrobiotite, a regular 1:1 interstratification of biotite and vermiculite layers. *American Mineralogist*, Volume 68, p. 420-425.
- Budhu, M. 2015. *Soil Mechanics Fundamentals*. Wiley Blackwell.
- Bulut, R. e Leong, E.C. 2008. Indirect Measurement of Suction. *Geotech Geol. Eng.*, n. 26, p.633-644.
- Calle, J.A.C. 2000. Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado. Dissertação de Mestrado em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Calvello, M. Lasco, M. Vassalo, R. Di Maio,C. 2005. Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents. *RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA. GENNAIO – MARZO*, p. 34-45.
- Campos, T.M.P. Motta, M.F.B. Resistencia ao cisalhamento de solos não saturados Cap17. In Carvalho, J.C. Giritana Junior, G.F.N. Machado, S.L. Mascarenha, M.M.A. Silva Filho, F.C. 2015. Solos não saturados no contexto geotécnico. Associação brasileira de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. ABMS.
- Campos, L.E.P. Fonseca, E.C. Burgos, P.C. 2005. Estabilização de uma área utilizando a contribuição da sucção: O caso de Barro Branco. IV Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE, Salvador, Bahia.
- Caputo, H. P. 1988. *Mecânica dos solos e suas aplicações, fundamentos*. Volume I. Editora LTC, livros técnicos e científicos, Rio de Janeiro, RJ.
- Carson, M.A. Kirkby, M. J. 1972. *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press, p. 100.
- Cepagri. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura-Cidade Universitária "Zeferino Vaz" – Campinas
- CEPED, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres Naturais. 2013. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais1991-2012. Volume São Paulo, 2 edição. UFSC, Florianópolis, SC.
- Cerri, R. I. Reis, F.A.G.V. Gramani, M.F. Gabelini, B.M. Zaine, J.E. Sisto, F.P. Giordano, L.C. 2018. Análise da influência de atributos fisiográficos e morfométricos na definição da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa. *Revista do Instituto de Geociências - USP Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 18, n. 1, p. 3-30.*

- Cerri, R. I. Rosolen, V. Reis, F.A.G.V. Pereira Filho, A.J. Vemado, F. Giordano, L.C. Gabeli, B.M. 2020. The Assessment of soil Chemical, physical, and structural properties as landslides predisposing factors in Serra do Mar mounting range (Caraguatatuba, Brazil). *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. Springer.
- Codesp 2013 (Companhia Docas do Estado de São Paulo) Autoridade Portuária de Santos; Análise do Movimento Físico do Porto de Santos, Site: <http://www.portodesantos.com.br>
- Coelho, C.R.B. 2016. Estudo teórico e experimental de fluxo de água e transporte de solutos em equilíbrio e não-equilíbrio em solos tropicais. Tese de doutorado apresentada na Eng. Civil, COPPE, UFRJ.
- Coelho, R.D. Vieira, B.C. Gomes, M.C.V. Martins, T.D. 2017. distribuição granulométrica dos solos e o desenvolvimento dos escorregamentos rasos na serra do mar (sp). XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e I Congresso Nacional de Geografia Física: Os desafios da geografia Física na Fronteira do Conhecimento, UNICAMP, Campinas, SP, p. 4119- 4128.
- Colângelo, A. C. 1995. Os Mecanismos de Compensação e o Equilíbrio de Forças na Dinâmica dos Materiais de Vertente. *Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, FFLCH-USP*, n<sup>o</sup> 9, p. 13-20.
- Costa, W.A., Oliveira, C.A.S. Kato, E. 2008. Modelos de Ajuste e Métodos para a Determinação da Curva de Retenção de Água de um Latossolo-Vermelho-Amarelo. *Rev. Bras. Ciência do solo*, 32:515-523.
- Chapuis, R.P. Aubertin, M. 2010. Discussion of “Influence of relative compaction on the hydraulic conductivity of completely decomposed granite in Hong Kong”. *Can. Geotech. Journal*, n47, p. 704-707.
- Chen, H. X. Zhang, S. Peng, M. Zhang, L.M. 2016. A Physically-Based Multi-Hazard Risk Assessment Platform for Regional Rainfall-Induced Failures and Debris Flows. *Engineering Geology*, n<sup>o</sup> 203, p. 15-29.
- Chowdhuri, R.N. 1978. *Slope Analysis*. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam - Oxford - New York, p. 3. ISBN 0-444-41724-9 (Vol. 22) ISBN 0-444-41662-5 (Series).
- Crozier, M. J. 1986. *Landslides: Causes, Consequences & Environment*. Ed. Croom Helm, Austrália.
- Cruz, O. 1974. *A Serra do Mar e o Litoral na Área de Caraguatatuba - SP: Contribuição a Geomorfologia Litorânea Tropical*. Trabalho de Doutorado - F.F.C.L.H - U.S.P.
- Dana, J.D. (1981). *Manual de Mineralogia*. Revisto por Cornelius, S Hurlbut Jr. Tradução: Rui Ribeiro Franco. Editora: Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro.

- De Blasio, F.V. 2011. Introduction to the Physics of Landslides: Lecture Notes on the Dynamics of Mass Wasting. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, p. 5-11.
- De Paula, E. V. 2010. Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR uma abordagem geopedológica. Tese de doutorado apresentada ao programa de pós graduação em geografia da UFPR.
- De Ploey, J. Cruz, O. 1979. Landslides in Serra do Mar, Brazil. *Revista Catena*, v, 6 p. 111-122.
- Duzgorem-Aydin, N.S. Aydin, A. 2006. Chemical and mineralogical heterogeneities of weathered igneous profiles: implications for landslide investigations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 315–322.
- Emeh, C. Igwe, O. 2017. Variations in Soils Derived from an Erodible Sandstone Formation and Factors Controlling their Susceptibility to Erosion and Landslide. *JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA Vol.90*, p.362-370.
- Emplasa – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano – <https://www.emplasa.sp.gov.br/RMBS>
- Erginal, A. E. Ozturk, B. Ekinci, Y.L. Demirci, A. 2009. Investigation of the nature of slip surface using geochemical analyses and 2-D electrical resistivity tomography: a case study from Lapseki area, NW Turkey. *Environ. Geol.* V 58: p.1167–1175. DOI 10.1007/s00254-008-1594-4.
- Fan, X. Xu, Q. Scaringi, G. Li, S. Peng, D. 2017. A chemo-mechanical insight into the failure mechanism of frequently occurred landslides in the Loess Plateau, Gansu Province, China. *Engineering Geology*, v 228, p. 337-345.
- Farinnaccio, A. Goya, S.C. Tessler, M.G. 2009. Variações da linha de costa nas baías de Santos e São Vicente. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v 01(n1), p. 42-48.
- Fernandes, N.F. e Amaral, C. P. 1996. Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológico-Geomorfológica. In Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B: *Geomorfologia e Meio Ambiente*, Bertrand Brasil.
- Fernandes, N.F. Guimarães, R.F. Gomes, R.A.T. Vieira, B.C. Montgomery, D.R. Greenberg, H. 2004. Topographic Controls of Landslides in Rio de Janeiro: Field Evidence and Modeling. *Catena*, 55, p.163-181.
- Ferreira, F.S. 2013. Análise da Influência das Propriedades Físicas do Solo na Deflagração dos Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP). Dissertação de Mestrado da Fac. De Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, departamento de geografia, área de geografia física.

- Feuerhamel, C. 2007. Estudo da Resistencia ao Cisalhamento e da Condutividade Hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral. Teses de doutorado m engenharia civil, UFRGS.
- Fiori, A.P. Carmignani, L. 2009. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes. 2ª Ed. Editora UFPR, Curitiba, 604p.
- Fonseca, L.A.M. Lani, J.L. Fernandes Filho, I. Santos, G.R. Ferreira, W.P.M. Santos, A.M.R.T. 2017. Variability in soil physical properties in landslide-prone areas. *Acta Scientiarum. Agronomy. Maringa*, v. 39, n. 1, p. 109-118.
- Fourie, A.B. Rowe, D. Blight, G.E. 1999. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. *Geotechnique*, v. 49, n<sup>o</sup> 1 p. 1-13.
- Franciss, F.O. 1980. Hidráulica de Meios Permeáveis: Escoamento em meios porosos. Ed Interciência Rio de Janeiro e Ed, da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Freeze, A.R. Cherry, J.A. 2017. Águas Subterrâneas. Tradução Everton de Oliveira. Edição Instituto Água Sustentável.
- Furman, J. 2019. Avaliação da resistência ao cisalhamento de solos tropicais brasileiros não saturados da serra do mar – trecho PR-SP. Dissertação de mestrado em Engenharia de Construção Civil, área de concentração em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.
- Futai, M. M. 2002. Estudo Teórico Experimental do Comportamento de Solos Tropicais não-saturados: Aplicação em um caso de Voçorocamento. Teses de Doutorado em Engenharia Civil, UFRJ.
- Gerscovich, D.M.S. 2011. Resistencia ao cisalhamento. Apostila, Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações. FEUERJ, PGECIV.
- Giannecchini, R. Galanti, Y. D’Amato Avanti, G. 2012. Critical Rainfall Thresholds for Triggering Shallow Landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 829–842.
- Glade, T. Anderson, M. Crozier, M. J. 2005. Landslides Hazard and Risk. Ed. John Wiley & Sons, Ltd, England.
- Gobbi, E.S. 2017. Variação do manto intempérico nas encostas dos morros residuais de Santos-SP. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências/Unicamp.
- Godois, J. V. S. (2011). Estudo do Comportamento de um Escorregamento Ativo na Serra da Cantareira – SP. Dissertação de Mestrado na área de engenharia geotécnica da Escola de Engenharia da USP, São Paulo.

- Goerl, R.F. e Kobiyama, M. 2013. Redução dos Desastres Naturais: Desafio dos Geógrafos. *Revista Ambiência*, v. 9, n. 1, p. 145-172, Guarapuava.
- Gomes, C.L.R. 2003. Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Eng. Civil da UNICAMP, Campinas.
- Gomes, M.C.V. 2012. Análise da Influência da Condutividade Hidráulica Saturada dos Solos nos Escorregamentos Rasos na Bacia do Rio Guaxinduba (SP). Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Geografia Física – USP.
- Haase, D. 2013. Participatory modelling of vulnerability and adaptive capacity in flood risk management. *Nat Hazards* n67, p.77–97.
- Hasegawa, S. Dahal, R.K. Yamanaka, M. Bhandary, N.P. Yatabe, R. Inagaki, H. 2009. Causes of large-scale landslides in the Lesser Himalaya of central Nepal. *Environ. Geol.* 57:1423–1434 DOI 10.1007/s00254-008-1420-z.
- Hasui, Y. Carneiro, C.D.R. Almeida, F.F.M. Bartorelli, A. 2012. *Geologia do Brasil*. 1ª Edição, editora Beca-BALL, São Paulo, Brasil.
- Heidemann, M. 2015. Estudo dos Solos de uma Encosta Estudada Instável em São Jose – SC: Intemperismo e Comportamento Geotécnico. Teses de doutorado em Engenharia Civil, UFRS.
- Highland, L.M. Bobrowsky, P. 2008. *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey Circular 1325, p. 129.
- Huat, B.B.K. Ali, F.H.J. Low, T.H. 2006. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 24: 1293–1306.
- Huggett, R.J. 2007. *Fundamentals of Geomorphology*, Routledge Fundamentals of Physical Geography. Second Edition. Routledge Taylor e Francis Group, London e New York, p.166.
- Hungr, O. Leroueil, S. Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, n11, p.167–194. DOI 10.1007/s10346-013-0436-y.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Site: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/santos/panorama>.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1979. Relatório Técnico nº 11.599. Levantamento das Condicionantes do Meio Físico e Estabelecimento de Critérios Normativos para a Ocupação Urbana dos Morros de Santos e São Vicente (Carta Geotécnica).
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981) Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo. Monografias, n. 6, v. I-II.

- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2012. Relatório Técnico n<sup>o</sup> 127.648-205, Volume I. Atualização do Plano Municipal de Redução de Riscos para o Município de Santos.
- Irfan, T.Y. 1996. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, 5-35.
- Irfan, T.Y. 1998. Structurally controlled landslides in saprolitic soils in Hong Kong. *Geotechnical and Geological Engineering*, 16, p. 215-238.
- Janke, J. R. Price, L.W. 2013. Mountain landforms and Geomorphic Processes, In Price, M.F. Byers, A.C. Friend, D.A. Kohler, T. Price, L.W. *Mountain Geography: Physical and Human Dimensions*. University of California Press Berkeley Los Angeles London, p. 127.
- Jesus, A. C. 2008. Retro análise de Escorregamentos em Solos Residuais Não Saturados. Dissertação de mestrado, escola de engenharia de São Carlos – USP, São Carlos.
- Jiang, H. Wang, B. Inyang, H. I. Liu, J. Gu, K. Shi, B. 2013. Role of Expansive Soil and Topography on Slope Failure and its Countermeasures, Yun County, China. *Engineering Geology*, 152, p. 155-161.
- Kanji, M.A. Cruz, P.T. Massad, F. 2008. Debris Flow Affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. *Landslides*, v, 5 p. 71-82.
- Kobiyama, M. Mota, A. A.; Grison, F.; Giglio, J. N. 2011. Landslide Influence on Turbidity and Total Solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. *Natural Hazards*, v.59, n.2, p.1077-1086.
- Kobiyama, M. Mendonça, M. Moreno, D.A. Marcelino, I.P.V.O. Gonçalves, E.f. Brazetti, L.L.P. Goerl, R.F. Mollerl, G.S.F. Rudorff, F.M. 2006. *Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos*. Editora Organic Trading, Curitiba.
- Kong, L.W. Zeng, Z.X. Bai, W. Wang, M. 2017. Engineering Geological Properties of Weathered Swelling Mudstones and their Effects on the Landslides Occurrence in the Yanji Section of the Jilin-Hunchun High- Speed Railway. *Bull Eng Geol Environ*, on line first, 27 June.
- Lan, T.G. Fan, H.R. Yang, K.F. Cai, Y.C. Wen, B.J. 2019. Geochronology, mineralogy and geochemistry of alkali-feldspar granite and albite granite association from the Changyi area of Jiao-Liao-Ji Belt: Implications for Paleoproterozoic rifting of eastern North China Craton. *Precambrian Research*, 266, p. 86-107.
- Lee, L.M. Gofar, N. Rahardjo, H. 2009. A Simple Model for Preliminary Evaluation of Rainfall-Induced Slope Instability. *Engineering Geology*, v. 108, n<sup>o</sup> 3-4, p. 272-285.
- Lee, E.M. Jones, D.K.C. 2004. *Landslides Risk Assessment*. Thomas Telford Publishing. London, p. 44.

- Li, M.Y.H. Zhou, M.F. 2020. The role of clay minerals in formation of the regolith-hosted heavy rare earth element deposits. *American Mineralogist*. V. 105, p. 92-108.
- Libardi, P.L. 2012. Dinâmica da água no solo. Editora da Universidade de São Paulo, Edusp.
- Lima Junior, L.G. Frederico, C.W. Fernandes, M.V.S. Loiola, A.R. Andrade, J.C.R.A. Moura, C.P. Mattos, I. C. Nogueira Neto, J.A. Silva, L.R.D. 2011. Caracterização geoquímica, mineralógica, termogravimétrica, e por espectrometria de infravermelho de argilominerais representativos da porção central da Província Borborema. *Geochimica Brasiliensis*, Ouro Preto, v. 25(1) p. 7 – 16.
- Lin, H. Zheng, S. Lourenço, S.D.N. Jaquin, P. 2017. Characterization of coarse soil derived from igneous rock for rammed earth. *Engineering Geology*, 228, p. 137-145.
- Listo, F.L.R. 2015. Propriedades geotécnicas do solo e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos. Tese de doutorado apresentada no departamento de geografia da FFLCH, USP.
- Liu, C.Y. Ku, C.Y. Xiao, J.E. Huang, C.C. Hsu, S.M. 2017. Numerical Modeling of unsaturated layered soil for rainfall-induced shallow landslides. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. V. 25 (04): 329–341.
- Luiz, E.L. 2003. Influência da Dinâmica Hidrológica e das Características das Formações Superficiais nos Mecanismos de Ruptura das Encostas com Rochas Granitóides de Áreas Subtropicais – São Pedro de Alcântara/SC. Tese Doutorado/UFRJ/IGEO/PPGG.
- Ma, K.C. Tan, Y.C. Chen, C.H. 2011. The influence of water retention curve hysteresis on the stability of unsaturated soil slopes. *Hydrol. Process*. 25, 3563–3574.
- Machado, M.A. 2013. Caracterização do Movimentos Gravitacionais de Massa por Técnicas Mineralógicas no Bairro Belchior Baixo, Gaspar – SC. Dissertação de Mestrado em geografia na área de concentração de utilização e conservação dos recursos naturais, UFSC, Florianópolis, SC.
- MacKenna, J.P. Santi, P. M. Amblard, X. Negri, J. 2012. Effects of soil-engineering properties on the failure mode of shallow landslides. *Landslides*, nº 9, p.215–228.
- Matsushi, Y. Matsukura, Y. 2007. Rainfall Thresholds for Shallow Landsliding Derived from Pressure-Head Monitoring: Cases with Permeable and Impermeable Bedrocks in Boso Peninsula, Japan. *Earth Surf. Process. Landf.* nº 32, p. 1308-1322.
- Marcon, R. 2010. Aplicações da Difractometria de Raios X e Método de Rietveld (RQXRD ) na classificação de rochas ígneas e na caracterização mineralógica de minérios auríferos da Província Aurífera de Alta Floresta (MT). Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Instituto de Geociências para obtenção do título de bacharel em Geologia.



- Martelloni, G. Segoni, S. Fanti, R. Catani, F. 2012. Rainfall Thresholds for the Forecasting of Landslides Occurrence at Regional Scale. *Landslides*, nº 9, p. 485-495.
- Mendes, R. M. 2008. Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba. Tese de doutorado da Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, departamento de engenharia de estruturas e geotécnica, USP.
- Menezes, L.P. 2013. Determinação da curva de retenção de água em solos utilizando bomba de fluxo. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- Monteiro, C. A. F. 1999. O Estudo Geográfico do Clima. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas do Departamento de Geociências. *Cadernos Geográficos*. N 1. Florianópolis, SC.
- Montgomery, D.R and Dietrich, W. (1994). Landscape Dissection and Drainage Area-Slope Thresholds. In Kirkby, M.J. *Process Models and Theoretical Geomorphology*. Ed. John Wiley e Sons, Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore.
- Montrasio, L. Valentino, R. Losi, G.L. 2012. Shallow landslides triggered by rainfalls: modeling of some case histories in the Reggiano Apennine (Emilia Romagna Region, Northern Italy). *Natural Hazards*. Volume 60, Issue 3, p 1231–1254.
- Moreira, F.A. Nunes, L.H. Marengo, J. 2017. Avaliação da capacidade adaptativa (ACI) no município de Santos/SP a partir das mudanças climáticas. *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e i Congresso Brasileiro de Geografia Física: Os desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. Campinas, São Paulo.
- Muceku Y. Korini, O. 2014. Landslide and Stability Evaluation in the Historical Town of Kruja, Albânia. *Nat. Hazards and Earth Syst. Sciences*, doi:10.5149, 14, 545-556.
- Nery, T. D. Vieira, B.C. (2009) O Papel dos Condicionantes Geomorfológicos na Deflagração dos Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP). *COBRAE, 5 Conferencia Brasileira de Estabilidade de Encostas*, São Paulo.
- Nery, T.D. 2011. Avaliação da Susceptibilidade a Escorregamentos Translacionais Rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP). *Dissertação de Mestrado em Geografia Física – USP*.
- Nery, T.D. Vieira, B.C (2015). Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. *Bull Eng Geol Environ*. 74:369–378.

- Neumann, M. H. Mexias, A. S. Vignol-Lelarge, M.L. Gomes, M.E.B. In da Junior, A.V. Caner, L. Renac, C. Ramos. E.F. 2012. Estudo da evolução dos processos de alteração supergênica de rocha granítica - Granito Independência - Morro do IPA, Porto Alegre, RS. *Pesquisas em Geociências*, v. 39, n3, p. 213-229.
- Nogueira, J.B. 1995. *Mecânica dos Solos: Ensaio de Laboratório*. EESC-USP, São Carlos.
- Nogueira, M.L. Augustin, C.H.R.R. Aranha, P.R.A. 2011. Estudo da dinâmica de percolação da água no solo - Gouveia, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* - v. 12, n° 3, p.75-82.
- Nunes, L.H. 2015. *Urbanização e Desastres Naturais: Abrangência América do Sul*. Oficina de Textos. São Paulo, p. 23.
- Oliveira, D. Queiroz Neto, J. P 2007. Evolução do relevo na Serra do Mar no Estado de São Paulo a partir de uma captura fluvial. *Revista GEOUSP - Espaço e Tempo*, São Paulo, N° 22, pp. 73 – 88.
- Othman, R. Hasni, S.I. Baharuddin, Z.M. Hashim, K.S.H.Y. Mahamod, L.H. (2017). Key Indicator Tools for Shallow Slope Failure Assessment Using Soil Chemical Property Signatures and Soil Colour Variables. *Enviro. Sci. Pollut. Res.* 24: 22861-22872.
- Passarela, S. M. Machado, F.B. Riedel, P. S. Lopes, E.S.S. Ferreira, M.V. Moreira, M.R. Azzi, A.A. (2008). Análise da Relação entre Escorregamento e Formas de Vertentes no Município de Cubatão (SP) e seus Arredores. *Geociências*, v 27, n.1, p 7-20, UNESP, São Paulo.
- Parizoto, D.G.V. 2014. *Contribuição dos diferentes fatores aos processos de deslizamentos e a influência antrópica no nível de danos dos desastres de 2008: O caso do complexo do Morro do Baú – Ilhota, SC*. Teses de doutorado na área de concentração: Utilização e conservação de recursos naturais em geografia, UFSC.
- Pellegati, C.H.G. 2007. *Avaliação Espaço-Temporal da Precipitação no Perfil da Baixada-Santista – Vertentes Oceânicas – Rebordo Interiorano da Escarpa da Serra do Mar, SP*. Dissertação de mestrado em geografia física pela universidade de São Paulo – USP.
- Penha, H.M. 1998. *Processos endogenéticos na formação do relevo*. In: Guerra A.J.T. & Cunha. S. B. (Edt). *Geomorfologia: uma atualização das bases e dos conceitos*. Ed. Bertrand, Rio de Janeiro.
- Pereira, A. 2006. *Resistencia ao cisalhamento de solos não saturados: análise experimental e teórica*. Dissertação de mestrado do programa de pós graduação da faculdade de engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Pereira, M.J. Feijó, F.J. 1994. Bacia de Santos. Boletim de Geociências da Petrobrás, 8 (1), p. 219-234, Rio de Janeiro, RJ.
- Pereira, L.S. Rodrigues, A.M. Jorge, M.C.O. Guerra, A.J.T. Fullen, M.A. 2016. Processos Hidro-Erosivos em Solos Degradados em Relevo de Baixa Declividade. Rev. Bras. Geomorfologia. (Online), São Paulo, v.17, n.2, (Abr-Jun) p.299-316.
- Pinto, C.S. 2006. Curso Básico de Mecânica dos Solos, em 16 Aulas. 3 Edição. Oficina de Textos, São Paulo.
- Rahardjo, H. Ong, T.H. Rezaur, R.B. and Leong, E.C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes during rainfall. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v, 133, n 12, p. 1532-1543.
- Ran, Q. Hong, Y. Li, W. Gao, J. 2018. A modelling study of rainfall-induced shallow landslide mechanisms under different rainfall characteristics. Journal of Hydrology, v. 563, p. 790-801.
- Regmi, A.D. Yoshida, K. Nagata, H. Pradhan, A.M.S. Pradhan, B Pourghasemi, H.R. 2013. The relationship between geology and rock weathering on the rock instability along Mugling–Narayanghat road corridor, Central Nepal Himalaya. Nat. Hazards. V, 66: p. 501–532. DOI 10.1007/s11069-012-0497-6.
- Ribeiro, M.C.S Hackspacher, P. C. Ribeiro, L.F.B. Hadler Neto, J.C. 2011. Evolução tectônica e denudacional da Serra do Mar (SE/Brasil) no limite entre o cretáceo superior e paleoceno, utilizando análises de traços de fissão e u-th/he em apatitas. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 12, n 3, p. 3-14.
- Ribeiro, K.D. Souza, L.K. 2018. Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 12(2): 185-196.
- Rodrigues, J.G. 2014. caracterização geoquímica e mineralógica de perfis de intemperismo e sua contribuição para escorregamentos: o caso da bacia do Córrego do Príncipe, em Teresópolis – RJ. Dissertação de Mestrado em Geoquímica, UFF. Niterói.
- Rosi, A. Paternel, T, Jamec-Auflic, M. Komac, M. Segoni, S. Casagli, N. 2016. Rainfall thresholds for rainfall-induced landslides in Slovenia. Landslides, 13:1571–1577.
- Ross, J.L.S Moroz, I.C. 1996. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Revista do departamento de geografia da USP, v 10, p. 41-58.
- Rossi, M. Queiroz Neto, J.P. 1996. Ensaio Morfopedológico em Escarpa Tropical Úmida: Serra do Mar – SP. Revista Sociedade e Natureza. I Simpósio Nacional de Geomorfologia. V. 8, n<sup>o</sup> 15.

- Rossi, M. Queiroz Neto, J.P. (2001). Relações Solo/Paisagem em Regiões Tropicais Úmidas: O Exemplo da Serra do Mar em São Paulo, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia, USP*, nº 14, p. 11-23.
- Rosso, R. Rulli, M.C. Vannucchi, G. 2006. A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, V. 42, p. 1-16.
- Sajinkumar, K.S. Anbazhagan, S. Pradeepkumar, A.P. Rani, V.R. 2011. Weathering and landslide occurrences in parts of Western Ghats, Kerala. *Journal Geological Society of India*, v 78, p. 249-257.
- Sant'anna Neto, J.L. 1994. Dinâmica Atmosférica e o Caráter Transicional do Clima na Zona Costeira Paulista. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, volume 8, p. 35-49.
- Santos, A.R. 2004. A Grande Barreira da Serra do Mar: da Trilha dos Tupiniquins a Rodovia dos Imigrantes. São Paulo. Ed. O Nome da Rosa, p.122.
- Santos, R. F. 2007. Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos? Ministério do Meio Ambiente – Brasília.
- Santos, R.D. Lemos, R.S. Santo, H.G. Ker, J.C. Anjos, L.H.C. (2005) Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. SBPC. Viçosa.
- Satyanaga, A. Rahardjo, H. Leong, E. C. Wang, J.Y. 2013. Water Characteristic Curve of Soil with Bimodal Grain-Size Distribution. *Computers and Geotechnics*, nº48, p. 51-61.
- Sbroglia, R.M. 2015. Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do ribeirão baú, ilhota/sc. Dissertação de mestrado em geografia, UFSC, Florianópolis, SC.
- Scarpanti de Jesus, L. Fernandes, J.B. Giacheti, H.L. 2013. Investigação da condutividade hidráulica dos solos de uma área de aterro de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de campo e laboratório. *Ciência e Engenharia*, 22(1), p. 21-28. ISSN 1983-4071.
- Schoeneberger, P.J. Wysocki, E.C. Benham, E.C. Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center. Lincoln, US.
- Selby, M.J. 1993. *Hillslope Materials & Processes*, Oxford University Press, New York, 2ª Edição.
- Silos, V.R. Palivanov, H. Santos, L.V. Silva, A.S. Barroso, E.V. Alvaro, T.T. Cruz, B.L.A. 2011. Micromorfologia aplicada a estudos geológico-geotécnicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(2): 256-262.
- Silva, A. M. 2005. Banco de Dados de Curva de Retenção de Solos Brasileiros. Dissertação apresentada a Escola de Eng. De São Carlos da USP.

- Silva, A.S. Guerra, A.J.T. Palivanov, H. Fullen, M.A. 2016. Soil structural indicators of hillslope destabilization in the Serra do Mar mountain range (Rio de Janeiro State, Brazil). *Nat. Hazards*. 81: p.1177–1191.
- Silva, J.C.B.J. 2005. Utilização de parâmetros de resistência natural e inundado na verificação da estabilidade de taludes a leste da falha da Cidade de Salvador. IV Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, Salvador, Bahia.
- Silva, R. P. Machado K.M. Silva Junior, G. C. Coelho Netto, A.L. Becker, L.B. Sato, A.M. 2014. Determinação de parâmetros físicos do solo em encosta sob influência de escorregamento translacional raso – Nova Friburgo, RJ. *RBGEA REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*. V, 4, n 2 p. 51-63.
- Silveira C.T. Fiori, A.P. Ferreira, A. M. Felipe, R. S. Kepel Filho, J. L. Folador, R. M. Costa, L. C. 2012. Análise do Fator de Segurança da Estabilidade das Vertentes na Bacia do Rio Jacaréí, Serra do Mar Paranaense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, nº 3, (Jul-Set) p. 287-297.
- Souza, C. R. G. 2012. Praias arenosas oceânicas do estado de São Paulo (Brasil): síntese dos conhecimentos sobre morfodinâmica, sedimentologia, transporte costeiro e erosão costeira. *Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume Especial 30 Anos*, p. 307-371.
- Springman, S.M. Thielen, A. Kienzler, P. Friedel, S. 2013. A Long-Term Field Study for the Investigation of Rainfall-Induced Landslides. *Géotechnique*, v. 63, nº 14, p. 1177-1193.
- Stanchi, S. Freppaz, M. Zanini, E. 2012. The influence of Alpine soil properties on shallow movement hazards, investigated through factor analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v. 12, p. 1845–1854.
- Sun, D. You, G. Annan, Z. Daichao, S. 2016. Soil-water Retention Curves and Microstructures of undisturbed and Compacted Guilin Lateritic Clay. *Bull. Eng. Geol. Environment*, n.75, p. 781-791.
- Suradi, M. (2015). Rainfall-Induced Failures of Natural Slopes in Tropical Regions. PhD Thesis in School of Civil, Environmental and Mining Engineering of the University of Western, Australia.
- Tang, Y. Yin, K. L. Liu, L. Zhang, L. Fu, X.L. 2017. Dynamic assessment of rainfall-induced shallow landslide hazard. *Journal of Mountain Science*, v.14, nº 7, p. 1292-1302.
- Taylor, D.W. 1948. *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York-John Wiley and sons Inc. London-Chapman & Hall, limited.
- Teixeira, W. Toledo, M.C.M. Fairchild, T.R. Taioli, F. 2010. *Decifrando a Terra*. Oficina de textos. São Paulo.

- Tessler, M.G. Goya, S.C. Yoshikawa, P.S. Hurtado, S.N. 2006. Erosão e Progradação do Litoral do Estado de São Paulo. In: Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro, Muehe, D. MMA, Brasília.
- Tiwari, B. Ajmera, B. 2011. A new correlation relating the shear strength of reconstituted soil to the proportions of clay minerals and plasticity characteristics. *Applied Clay Science*, n 53, p. 48-57.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated soils. *Soil Sci. Soci. Am. J.* 44:892-898.
- Vargas, M. 1977. *Introdução a Mecânica dos Solos*, São Paulo. Editor McGraw-Hil do Brasil, Editora da USP.
- Vargas, M. 1999. Revisão Histórico-Conceitual dos Escorregamentos da Serra do Mar. *Revista Solos e Rochas*, v, 22 (1), p. 53-83.
- Vargas, M. 1999. A Baixada Santista: suas Bases Físicas. *Revista USP*, n. 41, p. 18-27, São Paulo.
- Varnes, D. J. (1958). *Landslides Types and Process*. In Eckel, E. B. *Landslides and Engineering Practice – Highway Research Board, Special Report 29*. By the Committee on Landslide Investigations. Washington D.C.
- Vennari, C. Gariano, S.L. Antronico, L. Brunetti, M.T. Iovine, G. Peruccacci, S. Terranova, O. Guzzetti, F. 2014. Rainfall thresholds for shallow landslide occurrence in Calabria, southern Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 317–330.
- Vilasboas, J.M.L. Machado, S.L., Pinto, S.A. 2016. Utilização do método do papel-filtro para determinação de curvas de retenção de água em argamassas e concretos. *Revista IBRACOM de Estruturas e Materiais*, Volume 9, Number 4 (August 2016) p. 525 – 543.
- Vieira B.C. Fernandes, N.F. 2004
- Vieira, B.C. Fernandes, N.F. Augusto Filho, O. (2010). Shallow Landslides Prediction in Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Nat. Hazard and Earth Syst. Sci.* n<sup>o</sup> 10, p. 1829-1837.
- Vieira, B.C. Ferreira, F.S. Gomes, M.C.V. (2015) Propriedades Físicas e Hidrológicas dos Solos e os Escorregamentos Rasos na Serra do Mar Paulista. *Revista Ra'e Ga*, v.34, p 269-287. Curitiba.
- Vieira, B.C. Gramani, M.F. (2015). Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: B. C. Vieira, A. A. Salgado, L. J. Santos (Eds.), *Landscapes and Landforms of Brazil* (285-297). Dordrecht, Netherlands: Springer.

- Vivian, J.B. 2008. Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel. Dissertação do programa de Eng. Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Vogt, V. 2012. Avaliação das propriedades geotécnicas de uma encosta coluvionar no oleoduto Araucária-Paranaguá (OLAPA). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Wang, G. Sassa, K. (2003). Poro-Pressure Generation and Movement of Rainfall-Induced Landslides: effects of Grain Size and Fine-Particle Content. *Engineering Geology*, n. 69, p 109-125.
- Wen, B.P. Aydin, A. 2004. Deformation history of a landslide slip zone in light of soil microstructure. *Environmental & engineering geoscience*, v X, n 2, p. 123-149.
- Wen, B.P. Duzgoren-Aydin, N.S. Aydin, A. 2004. Geochemical characteristics of the slip zones of a landslide in granitic saprolite, Hong Kong: implications for their development and microenvironments. *Environmental Geology*. V, 47: p. 140–154.
- Wiegand, C Krinker, K. Geitner, C. Rutzinger, M. 2013. Regolith structure analysis – a contribution to understanding the local occurrence of shallow landslides (Austrian Tyrol). *Geomorphology* 183: p. 5-13.
- Wilson, R.C. Wieczorek, G.F. 1995. Rainfall Thresholds for the Initiation of Debris Flows at La Honda, California. *Environmental Engineering Geoscience*, n<sup>o</sup> 1, v. 1, p. 11-27.
- Wolle, C. M. Carvalho, C.S. 1989. Deslizamentos em Encostas na Serra do Mar – Brasil. *Revista Solos e Rochas*, v 12, número único, p. 27-36.
- Yeh, H.F. Lee, C.H. 2013. Soil water balance model for precipitation-induced shallow landslides. *Environ Earth Sci*. n<sup>o</sup> 70, p. 2691–2701.
- Yoo, K. Mudd, S.M. Sanderman, J. Amundson, R. Blum, A. 2009. Spatial patterns and controls of soil chemical weathering rates along a transient hillslope. *Earth and Planetary Science Letters*, 288, p. 184–193.
- Zálan, P. V. Oliveira, J. A. B. 2005. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Bol. Geociências. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 269-300.
- Zalán, P.V. 2012. Origem e Evolução das Bacias Cenozoicas do Sudeste. In Hasui et al: *Geologia do Brasil* Editora BECA. P. 544-549.
- Zambello, F.R. 2001. Análise multielementar quantitativa de solos e sedimentos por espectrometria de fluorescência de raio X. Dissertação de Mestrado apresentada no Instituto de Geociências da UNICAMP.

Zhuang, J. Peng, J. Wang, G. Iqbal, J. Wang, Y. Li, W. Xu, Q. Zhu, X. 2017. Prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Loess Plateau, Yan'an, China, using the TRIGRS model. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42, n<sup>o</sup> 6, p. 915-927.



## APÊNDICE I

Os gráficos a seguir (Figuras 70 a 73) mostram a granulometria de cada horizonte para as 4 trincheiras utilizadas neste trabalho, onde as curvas amarelas são dos ensaios sem defloculante e as curvas azuis são representantes dos ensaios com defloculante.

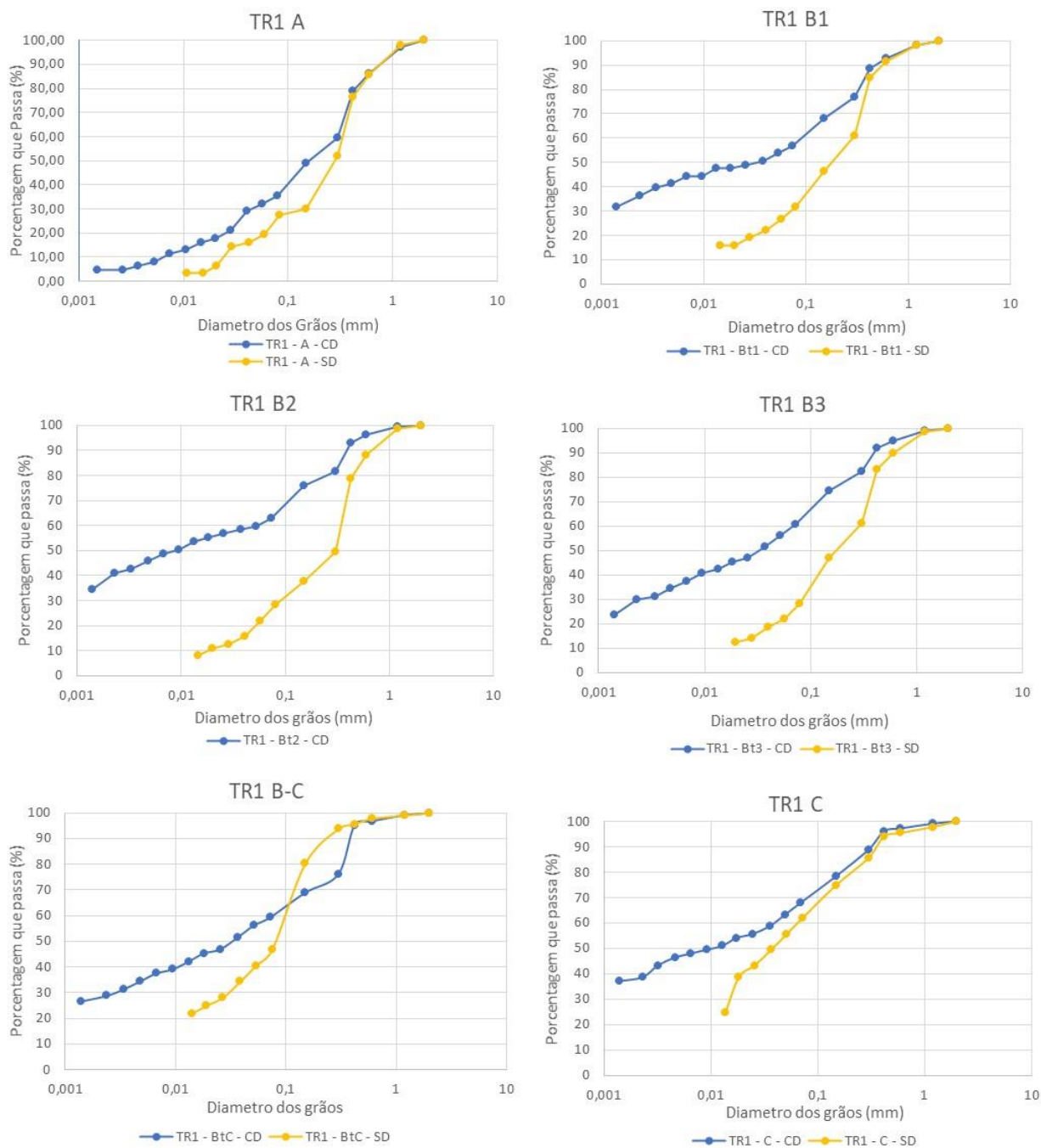


Figura 70 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR1

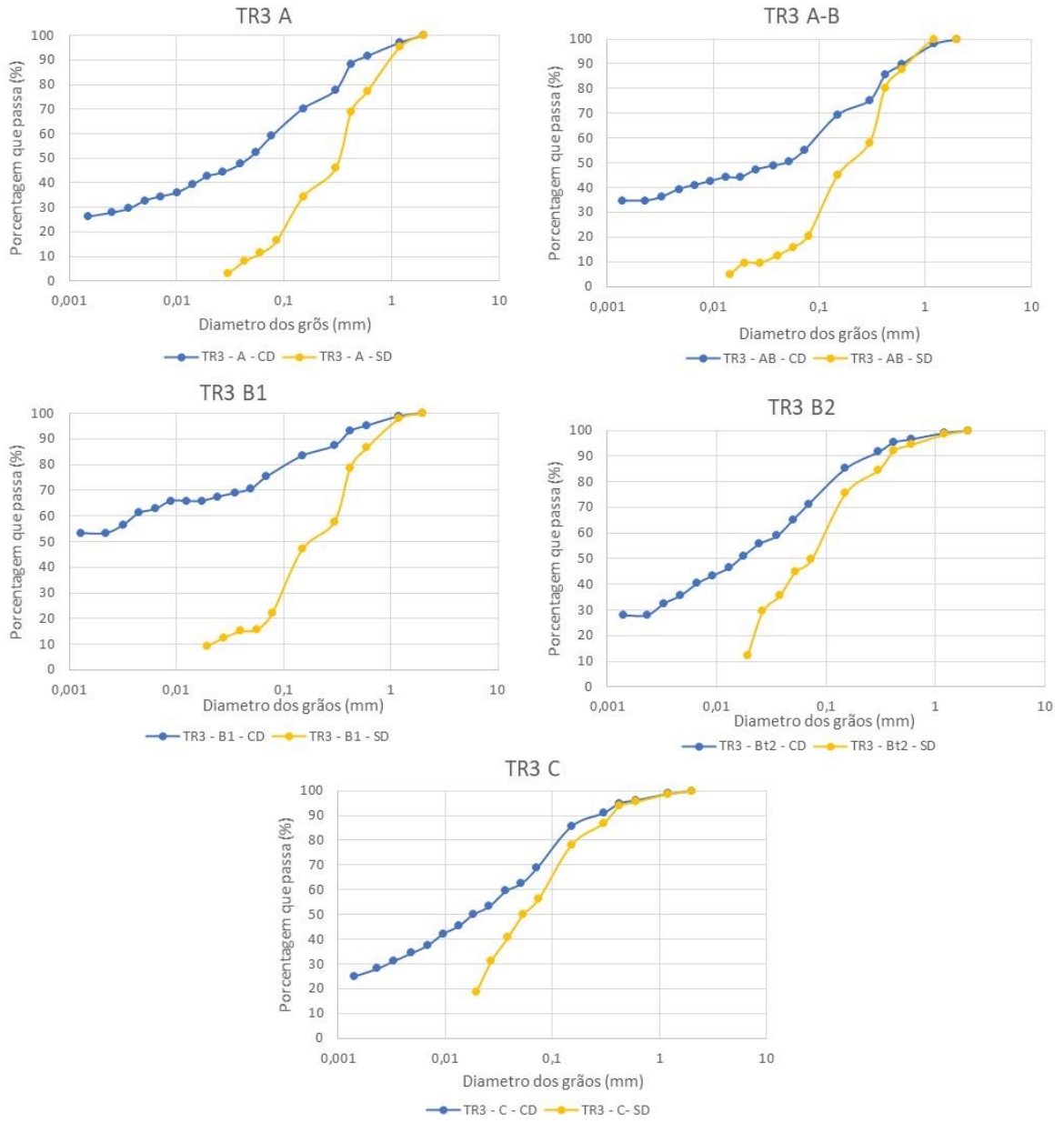


Figura 71 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR3

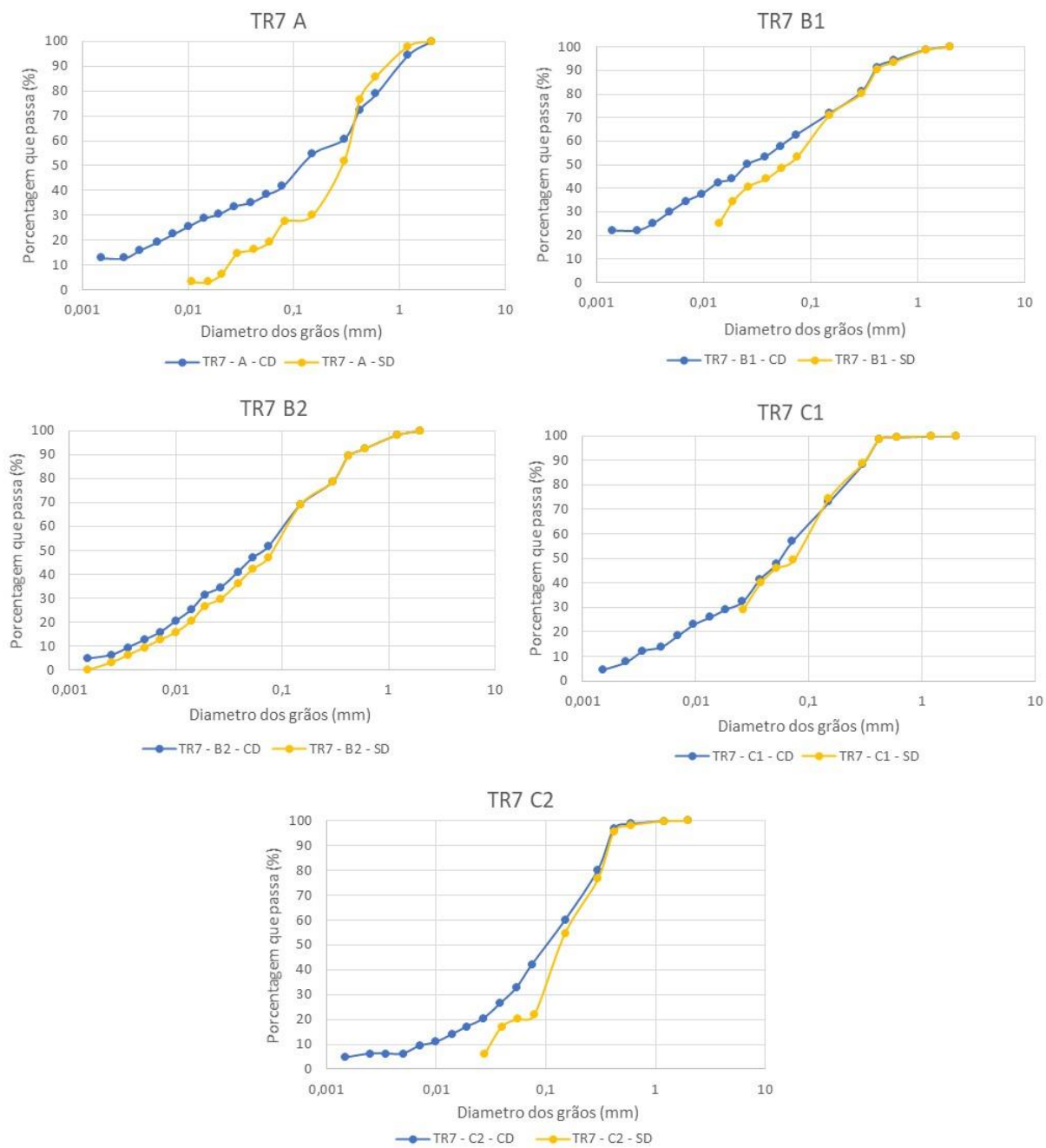


Figura 72 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR7

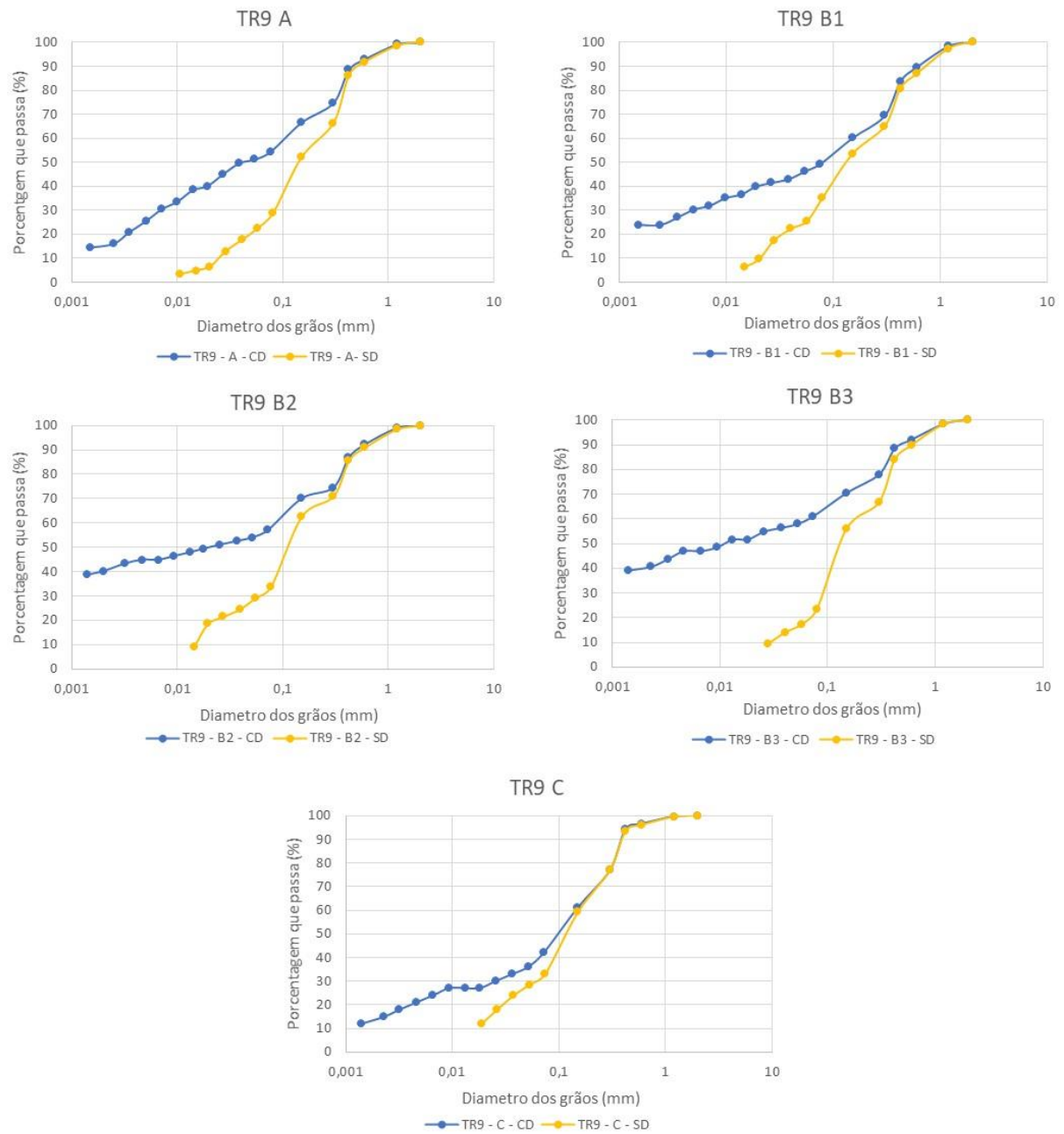


Figura 73 - Gráficos da granulometria conjunta para cada horizonte da TR9

Todas as trincheiras mostram a microagregação do solo quando o ensaio não é feito com o defloculante. Somente o horizonte B2 da TR7 mostra um comportamento similar entre as curvas.

## APÊNDICE II

Curvas de retenção a água realizadas com a umidade gravimétrica, mostrando a *histerese* entre as diferentes trajetórias e o gráfico com todas as curvas de uma mesma trincheira para uma mesma trajetória (Figuras 74 a 77).

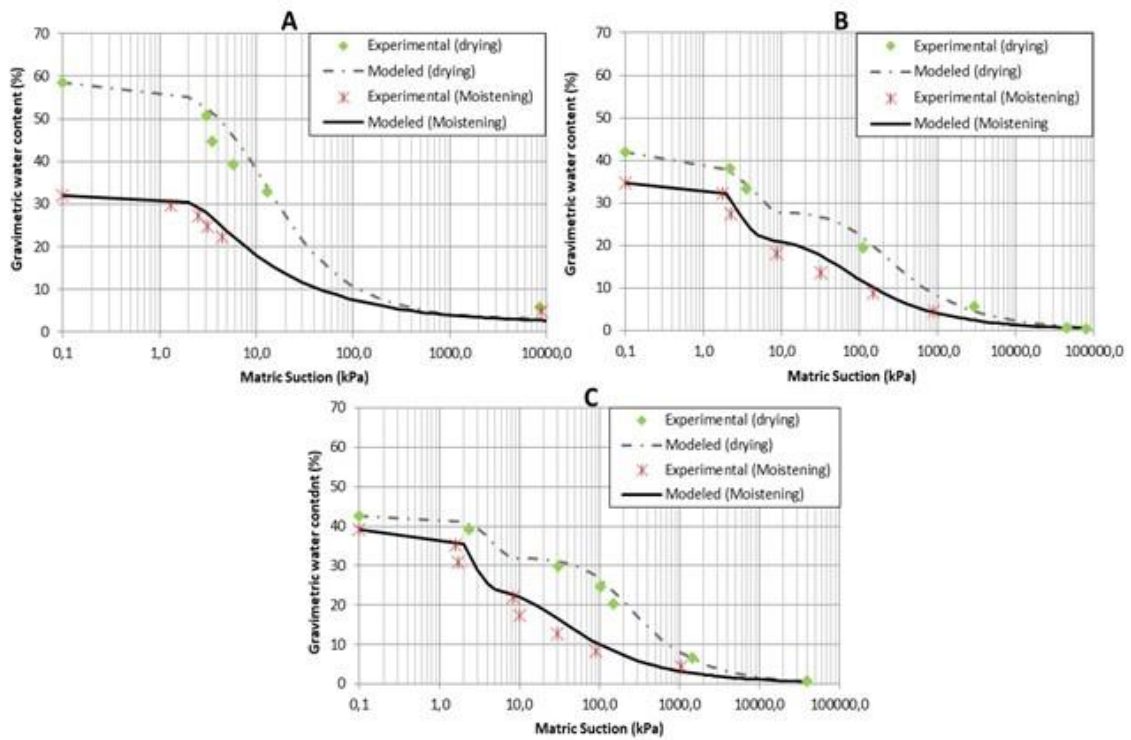


Figura 74 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR1

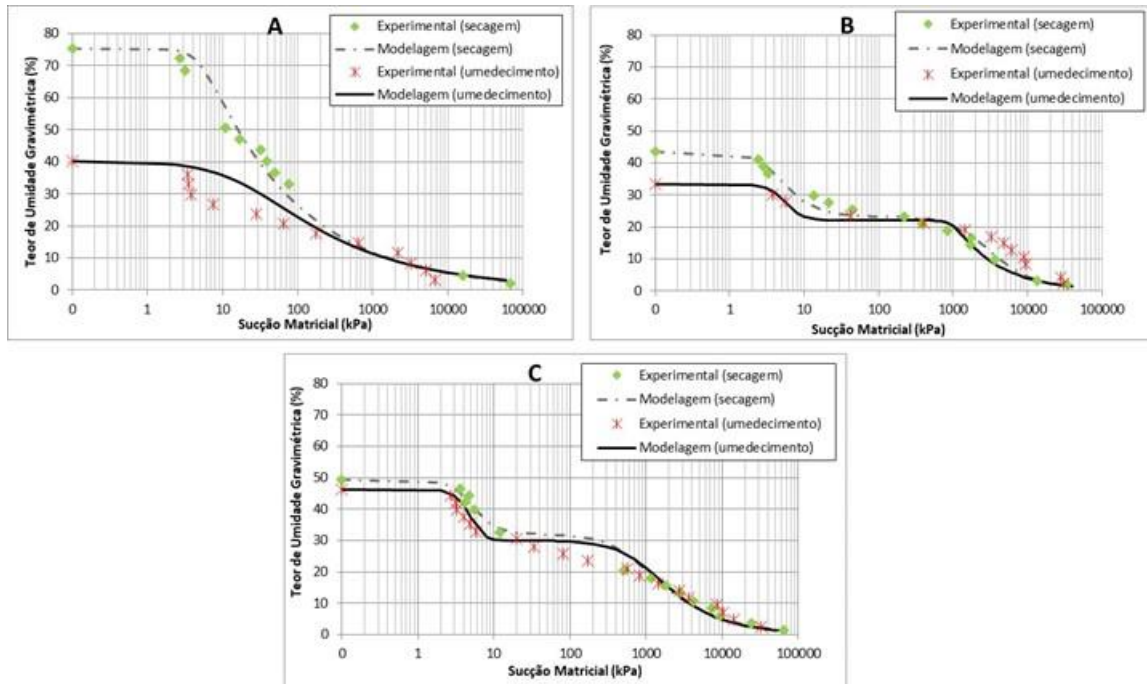


Figura 75 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR3

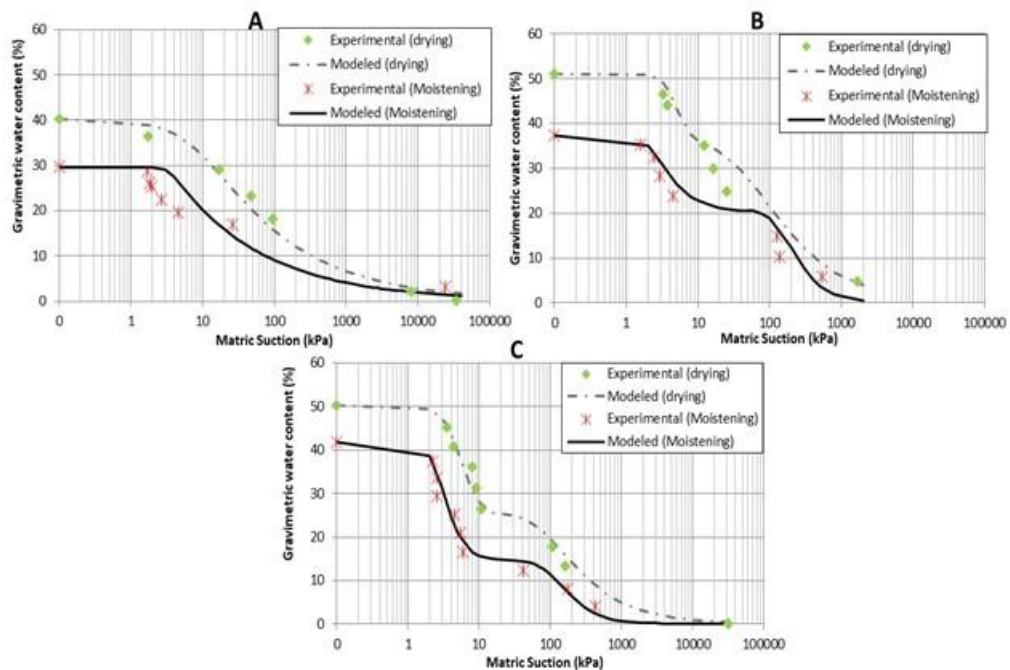


Figura 76 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR7



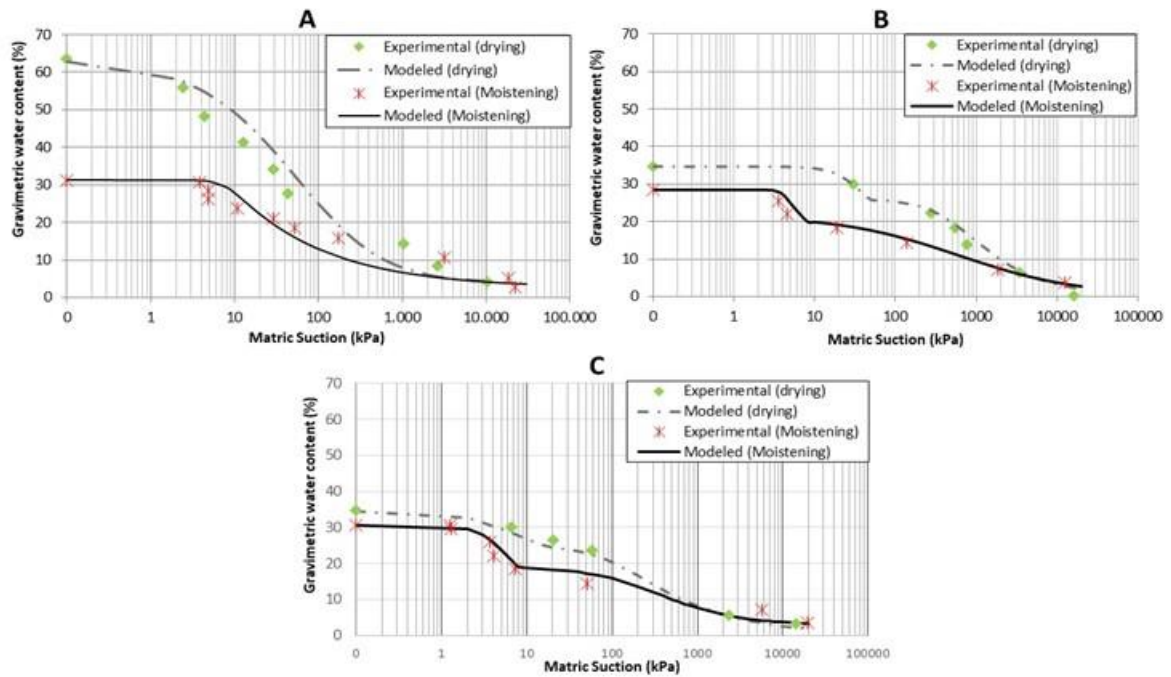


Figura 77 - Curva de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento com a umidade gravimétrica para a TR9

As curvas apresentadas a seguir, nas Figuras de 78 a 81, representam as trajetórias de secagem e umedecimento para cada trincheira estudada, em relação a umidade volumétrica, para a mesma trincheira. Assim é possível analisar o comportamento no mesmo perfil de solo.

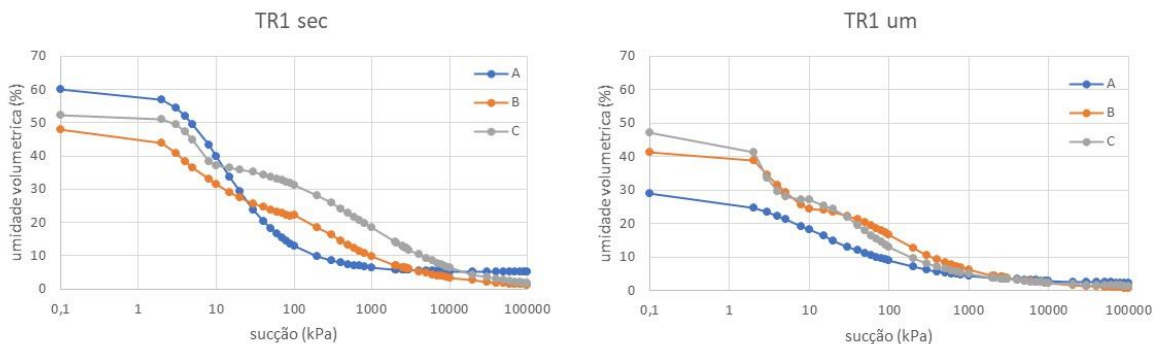
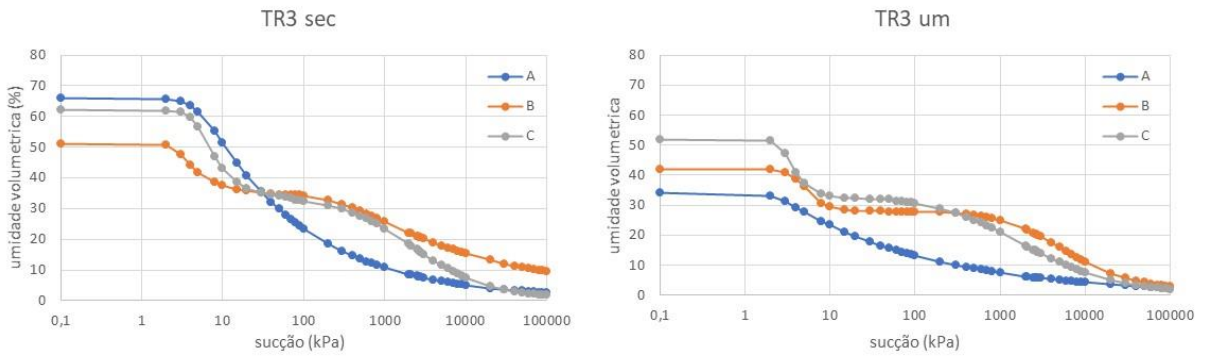
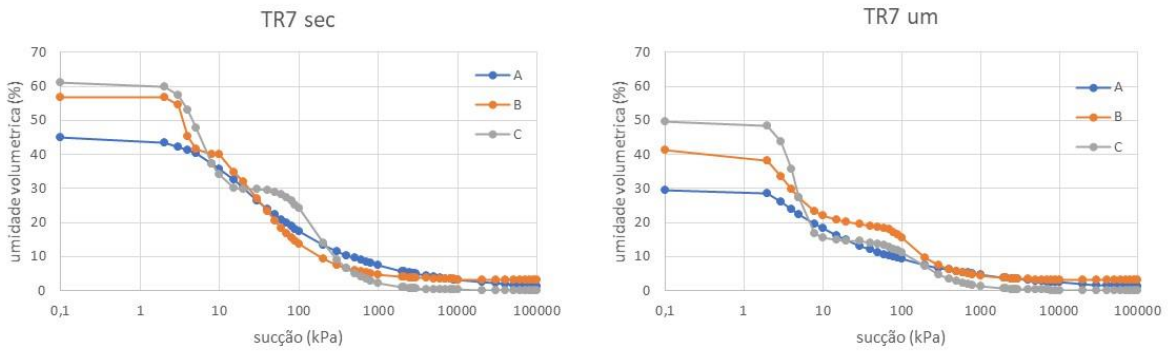


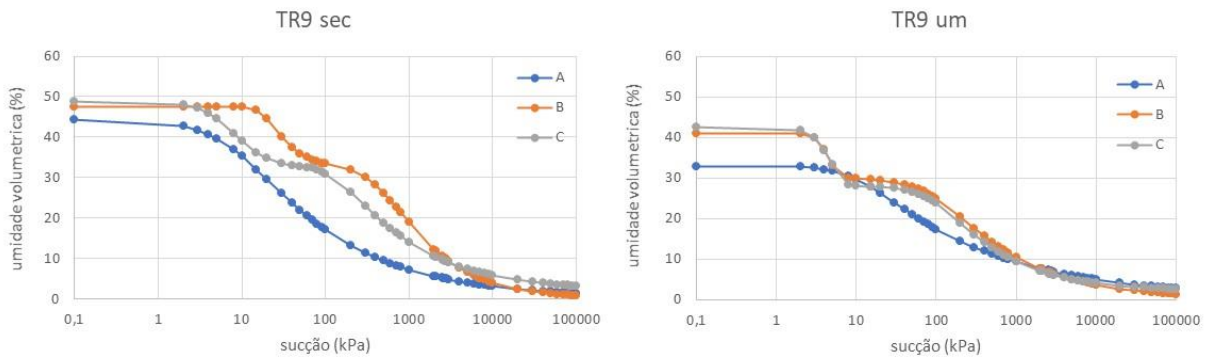
Figura 78 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica



*Figura 79 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica*



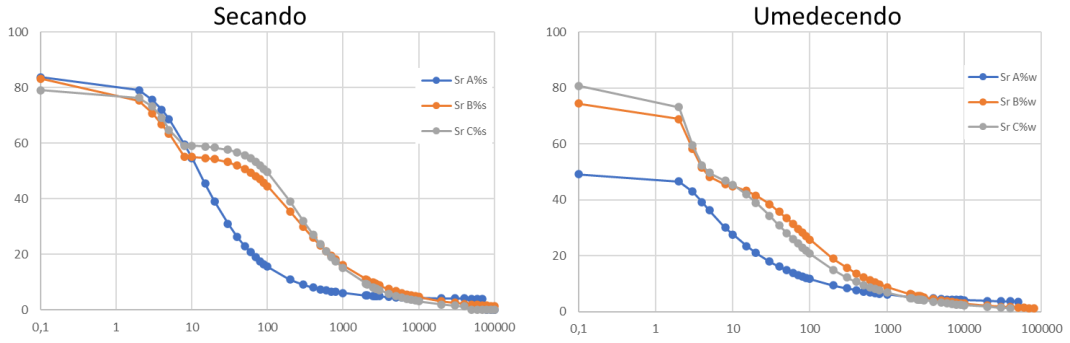
*Figura 80 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica*



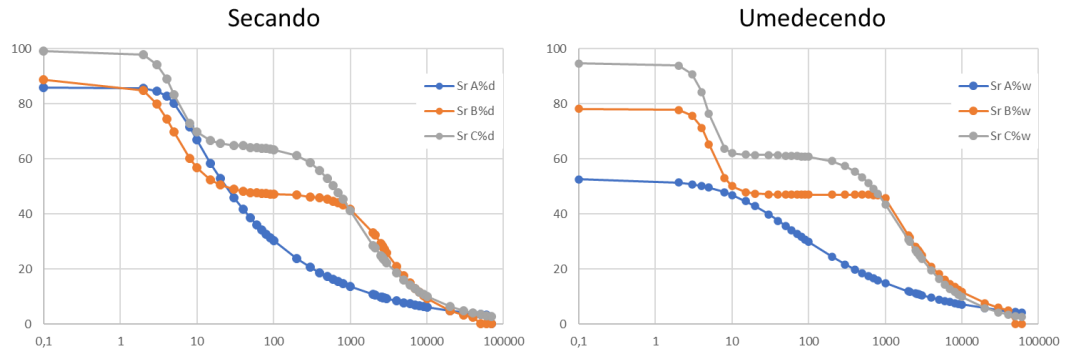
*Figura 81 - Curvas de retenção à água para a trajetória de secagem e umedecimento, agrupadas por trincheira com a umidade gravimétrica*



As curvas de retenção à água realizadas com o cálculo do grau de saturação para cada horizonte de cada trincheira, nas trajetórias de umedecimento e secagem, podem ser observadas na Figuras 82 a 85.



*Figura 82 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR1*



*Figura 83 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR3*

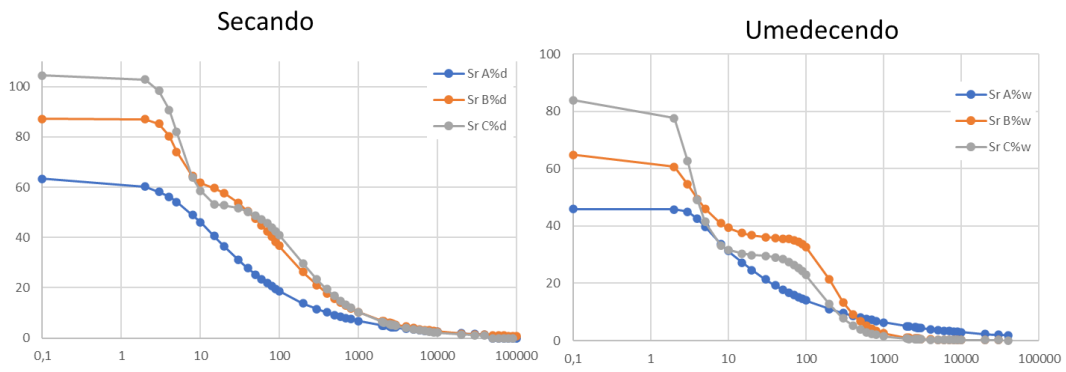


Figura 84 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR7

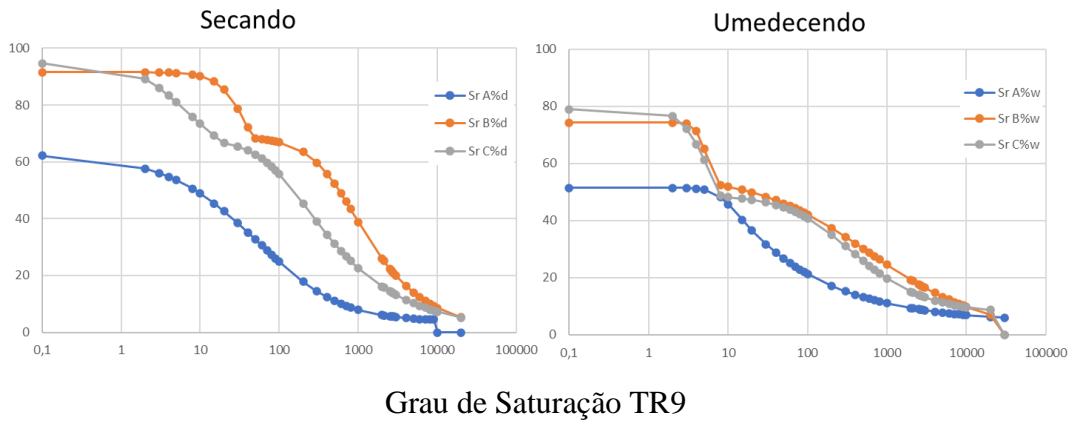


Figura 85 - Curvas de retenção à água nas trajetórias de secagem e umedecimento para o cálculo de grau de saturação da TR9

Parâmetros usados na modelagem das curvas de retenção à água para umidade volumétrica podem ser observados nas Tabelas 26 a 29.

Tabela 26 – Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR1

TR1	Secagem			Umedecimento		
	TR1-A	TR1-B	TR1-C	TR1-A	TR1-B	TR1-C
$\alpha$	0,13	0,24	0,1	0,4	0,44	0,41
n	0,5	0,20	0,9	0,14	0,45	0,79
m	1,5	1,55	2,0	3,25	5,0	4,70
Wsat	58,44	41,94	42,65	32,11	34,7	39,26
Wres	2,8	0,1	0,2	2	20,0	23
$\alpha$		0,009	0,007		0,03	0,06
n		0,36	0,41		1,5	1,5
m		1,56	1,7		0,33	0,33
Wsat		28,0	31,95		22,0	25,0
Wres		0,1	0,10		0,10	0,10

Tabela 27 – Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR3

TR3	Secagem			Umedecimento		
	TR3-A	TR3-B	TR3-C	TR3-A	TR3-B	TR3-C
$\alpha$	0,20	0,25	0,22	0,05	0,20	0,18
n	3,50	2,50	3,35	1,08	4,25	4,05
m	0,10	0,60	0,70	0,30	0,76	1,60
Wsat	75,26	43,64	49,21	40,10	33,29	46,25
Wres	0,10	23,05	23,0	0,10	20,0	30,0
$\alpha$		0,0005	0,0015		0,0009	0,001
n		2,0	1,69		8,0	1,60
m		0,50	0,41		0,08	0,5
Wsat		22,95	31,95		20,0	30,0
Wres		0,10	0,10		0,10	0,10

Tabela 28 - Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR7

TR7	Secagem			Umedecimento		
	TR7-A	TR7-B	TR7-C	TR7-A	TR7-B	TR7-C
$\alpha$	0,12	0,24	0,20	0,30	0,40	0,35
n	1,38	5,50	3,50	7,00	3,50	4,25
m	0,28	0,50	0,80	0,05	0,40	0,62
Wsat	40,27	51,01	50,33	29,63	37,41	41,87
Wres	0,10	35,00	24,80	0,10	20,30	14,80
$\alpha$		0,019	0,01		0,0062	0,008
n		1,30	1,80		3,00	2,50
m		0,48	0,40		0,50	0,60
Wsat		38,00	26,00		21,00	15,00
Wres		0,10	0,10		0,10	0,10

Tabela 29 - Parâmetros da modelagem das curvas de retenção à água na TR9

R9	Secagem			Umedecimento		
	TR-A	TR9-B	TR9-C	TR9-A	TR9-B	TR9-C
$\alpha$	0,13	0,25	0,28	0,01	0,04	0,30
n	4,40	9,50	3,00	0,70	2,50	1,50
m	0,09	0,06	0,2	1,50	0,20	0,33
Wsat	31,18	28,37	30,65	63,51	34,58	34,64
Wres	2,5	0,1	1,0	4,0	0,1	17,50
$\alpha$		0,002	0,004		0,0018	0,0009
n		0,60	1,10		1,60	1,50
m		0,90	0,70		0,45	0,33
Wsat		21,5	19,0		26,0	25,0
Wres		0,01	2,80		0,01	0,01

## APÊNDICE III

## CÁLCULO DA TENSÕES NORMAIS DE CAMPO

Para a montagem dos gráficos de cisalhamento de campo com as respectivas umidades, primeiro foram feitos os cálculos relativos a tensão normal de cada horizonte, levando em conta sua profundidade e sua densidade de solo para cada umidade. Como mostram as Tabelas 30 a 33.

Tabela 30 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR1

Profundidade	1,32			1,77		
		TR1 B			TR1 C	
	25%	35%	42%	25%	35%	43%
massa específica (g)	1,629	1,571	1,638	1,645	1,681	1,710
normal de campo (kPa)	2,15	2,07	2,16	2,91	2,97	3,02
resistência de campo (kPa)	<b>273,66</b>	<b>15,98</b>	<b>5,63</b>	<b>295,31</b>	<b>14,70</b>	<b>47,76</b>
c	272,19	14,39	3,91	292,76	12,5	46,43
tg $\phi$	0,688	0,771	0,796	0,878	0,741	0,439
$t = c + n * tg\phi$						

Tabela 31 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR3

Profundidade	1,11			1,57		
		TR3 B			TR3 C	
	25%	38%	43%	25%	35%	44%
massa específica (g)	1,649	1,757	1,749	1,577	1,77	1,730
normal de campo (kPa)	1,83	1,95	1,94	2,47	2,77	2,71
resistência de campo (kPa)	<b>24,33</b>	<b>13,95</b>	<b>47,29</b>	<b>37,86</b>	<b>29,26</b>	<b>16,32</b>
c	22,73	12,51	46,44	36,37	27,63	14,78
tg $\phi$	0,87	0,74	0,43	0,60	0,58	0,57
$t = c + n \cdot \text{tg}\phi$						

Tabela 32 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR7

Profundidade	0,3			0,54		
		TR7 B			TR7 C	
	38%	42%	51%	22%	43%	50%
massa específica (g)	1,78	1,83	2,35	1,49	1,67	1,97
normal de campo (kPa)	0,53	0,54	0,70	0,80	0,90	1,06
resistência de campo (kPa)	<b>24,64</b>	<b>20,97</b>	<b>1,49</b>	<b>22,47</b>	<b>13,16</b>	<b>0,96</b>
c	24,35	20,69	1	21,95	12,62	0,25
tg $\phi$	0,55	0,51	0,70	0,63	0,60	0,67
$t = c + n \cdot \text{tg}\phi$						

Tabela 33 - Cálculo da tensão normal de campo e da resistência ao cisalhamento da TR9

Profundidade	1,1			1,52		
		TR9 B			TR9 C	
	20%	30%	34%	18%	28%	34%
massa especifica (g)	1,69	1,75	1,82	1,67	1,72	1,780
normal de campo (kPa)	1,85	1,92	2,00	2,53	2,61	2,70
resistência de campo (kPa)	<b>311,84</b>	<b>53,01</b>	<b>20,26</b>	<b>41,69</b>	<b>36,06</b>	<b>30,20</b>
c	310,91	52,11	19,06	40,25	33,43	28,65
tgφ	0,50	0,46	0,60	0,56	1,00	0,57
= c+ n*tgφ						

## APÊNDICE IV

## Cálculo de porcentagem para grau

O cálculo é feito usando o arctan da porcentagem correspondente, como mostra a Tabela 34 a seguir.

Tabela 34 - Cálculo de porcentagem para grau

TR1	TR3	TR7	TR9
100% - 1	100% - 1	100% - 1	100% - 1
25% - X1	12% - X2	75% - X3	70% - X4
X1=0,25	X2=0,12	X3=0,75	X4=0,70
Tan X1=0,25	Tan X2=0,12	Tan X3=0,75	Tan X4=0,70
X1 = Arctan (0,25)	X2 = Arctan (0,12)	X3 = Arctan (0,75)	X4 = Arctan (0,70)
X1 = 14	X2 = 7	X3 = 37	X4 = 35



## APÊNDICE V

## MINERALOGIA

Descrição dos minerais que aparecem nas descrições das trincheiras estudadas, sendo que alguns não aparecem no difratograma, por não serem tão representativos, mas estão aparecendo nos relatórios enviados.

**Anastasio** – É uma forma polimorfa do Rutilio ( $\text{TiO}_2$ ), são encontrados em granitos, podem estar presentes como mineral acessório na rocha, ou em filões de quartzo que a atravessam

**Andesina** – É um feldspato encontrado raramente, ou encontrado como grãos nas rochas ígneas.

**Biotita** – Um mineral formador de rocha importante e amplamente distribuído. Ocorre em rochas ígneas, especialmente onde o feldspato é predominante, como o granito. Ocorre em maior variedade de rochas do que a muscovita.

**Caolinita** – A caolinita é de ocorrência ampla, é o principal componente da argila, é derivado da alteração dos silicatos de alumínio, particularmente os feldspatos. Podem ser transportadas e depositadas em forma de camadas de argila, pode ser usada na indústria da construção e na fabricação de porcelanas, isto porque quando úmida é facilmente moldável e quando seca, perde água e se torna dura, permanente.

**Dickita** – É semelhante a caolinita na estrutura e na composição química, mas são constituintes de menor importância dos depósitos de argila

**Gibbsita** – Formado por intemperismo químico com intensa lixiviação sobre rochas ricas em feldspatos ou outros minerais aluminosos em clima quente e úmido. Ocorre associado a outros oxi-hidróxidos de Fe e Al. Produto do processo de hidrólise. Produto típico do intemperismo, associada a Caolinita e Goethita

**Hidrobiotita** – É a interstratificação regular das camadas de biotita e vermiculita. O produto de alteração de outras micas.

**Melanterita** – Se forma sobre a marcassita, que e distingue-se da pirita por sua cor amarelo pálido entre outros, é menos instável que a pirita, decompondo-se facilmente e sendo incomum. Apresenta ferro na composição

**Mica** – Pertence s um grupo de minerais aluminosilicatos complexos com estrutura lamelar e composição química diferentes e podem ser em forma de folhas ou lascas.

**Microclínio** – É encontrado em massas suscetíveis de clivagem, em cristais e em grãos irregulares como constituintes de rochas

**Montmorillonita** – Este grupo compreende minerais argilosos compostos de camadas com grande capacidade de absorção de água entre as folhas, produzindo uma expansão acentuada da estrutura

**Nacrita** – É semelhante a caolinita na composição química e na estrutura, mas de menor importância nos depósitos de argila

**Nontronita** – Faz parte do grupo das montmorillonitas, sendo dioctaédrico. Tem grande capacidade de absorção de água.

**Nordstrandita** – É um óxido-hidróxido de Al, como Gibbsita.

**Quartzo** – É um mineral formado por oxigênio e silício, o segundo mais abundante depois do feldspato. Ocorre nas rochas, ígneas, metamórficas e sedimentares

**Sepiolita** – Conhecido como espuma do mar, tem textura fina e compacta, caracteriza-se por sua sensação de ser lisa, pela natureza compacta e densidade relativa baixa, é um mineral secundário.

**Vermiculita** – É a alteração da biotita, a estrutura é constituída por folhas de mica interstratificadas, quando aquecida expande e fica com a forma parecida com vermes. Pode ser usada no isolamento do calor e do som. Como tem grande capacidade de absorção (expansiva) é usada também para enchimento de sacos de cheiro para artesanato.

## APÊNDICE VI

A Figura 86 mostra os corpos de prova da TR3 “B” no processo de secagem. Pode-se observar o quanto os corpos de prova diminuíram ao perder água



*Figura 86 - Corpos de prova mostrando o quanto o solo contraiu durante a realização do procedimento das curvas de retenção*

## ANEXO I

A química de rotina foi realizada em outro estudo (Gobbi, 2017), e apresentada aqui (Tabela 36) para mostrar a presença de matéria orgânica nos horizontes superiores.

Tabela 35 - Química de rotina

Identificação	pH(KCl)	pH(H <sub>2</sub> O)	H+Al	Al	Ca	Mg	K	Na	P(Res)	C	SB	CTC	V	m	R C	T
			cmolc/kg						ppm	%	cmolc/kg		%			cmol/100gArgila
TR 1 - A	5,6	6,3	2,4	0	8	1,5	0,56	0,2	43	3,5	10,26	12,66	81,04	0	20,73	25,58
TR 1 - BT	4	4,6	5,4	1	0,7	0,4	0,04	0,13	2	0,6	1,27	6,67	19,04	44,05	4,25	12,49
TR 1 - BT1	3,9	4,4	6,2	1,3	0,6	0,3	0,07	0,08	1	1,3	1,05	7,25	14,48	55,32	4,89	15,07
TR 1 - BT2	4	4,5	5,6	1	0,7	0,4	0,05	0,12	1	0,8	1,27	6,87	18,49	44,05	3,94	11,93
TR 1 - BTC	4,1	4,6	4,8	1,2	0,5	0,3	0,04	0,1	7	0,4	0,94	5,74	16,38	56,07	4,39	11,79
TR 1 - C	4,4	5	3	0,4	1	0,5	0,04	0,21	2	0,5	1,75	4,75	36,84	18,6	4,07	9
TR 3 - A	3,9	4,4	9,4	1,4	1,1	0,7	0,2	0,22	4	3,7	2,22	11,62	19,1	38,67	7,18	23,06
TR 3 - AB	3,8	4,3	7,8	1,8	0,4	0,2	0,07	0,13	1	2,1	0,8	8,6	9,3	69,23	5,03	16,63
TR 3 - BT1	4,1	4,7	4,6	0,8	0,6	0,4	0,04	0,13	3	0,7	1,17	5,77	20,28	40,61	3,19	9,34
TR 3 - BT2	4,2	4,8	4	0,6	0,4	0,3	0,04	0,17	4	0,4	0,91	4,91	18,53	39,74	2,7	8,77
TR 3 - C	4,3	4,9	3,8	0,6	0,7	0,4	0,03	0,26	3	0,5	1,39	5,19	26,78	30,15	3,71	9,68
TR7 - A	3,8	4,3	6,2	1,1	1	0,6	0,17	0,04	3	1,5	1,81	8,01	22,6	37,8	6,98	19,21
TR7 - B1	3,7	4,2	5,6	1,8	0,7	0,4	0,09	0,05	1	0,6	1,24	6,84	18,13	59,21	6,99	15,72
TR7 - B2	3,7	4,2	6	2,2	0,4	0,2	0,08	0,05	2	0,6	0,73	6,73	10,85	75,09	7,59	17,44
TR7 - C1	3,9	4,5	4,4	2,8	0,6	0,4	0,06	0,07	1	0,5	1,13	5,53	20,43	71,25	9,63	13,55
TR7 - C2	3,9	4,5	4	1,9	0,7	0,9	0,08	0,14	1	0,5	1,82	5,82	31,27	51,08	13,63	21,32
TR 9 - A	3,8	4,3	10,2	1,1	1,3	0,6	0,25	0,08	2	2,8	2,23	12,43	17,94	33,03	6,91	25,79
TR 9 - B1	3,7	4,1	6,6	1,6	0,3	0,1	0,09	0,04	1	1,4	0,53	7,13	7,43	75,12	5,26	17,6
TR 9 - B2	4	4,6	4	0,9	0,6	0,4	0,08	0,07	1	0,6	1,15	5,15	22,33	43,9	4,33	10,89
TR 9 - B3	4	4,5	4,2	1,1	0,3	0,2	0,07	0,11	2	0,5	0,68	4,88	13,93	61,8	3,57	9,8
TR 9 - C	3,9	4,4	3,2	1,3	0,2	0,2	0,08	0,27	39	0,4	0,75	3,95	18,99	63,41	6,47	12,46

Fonte: Gobbi (2017)