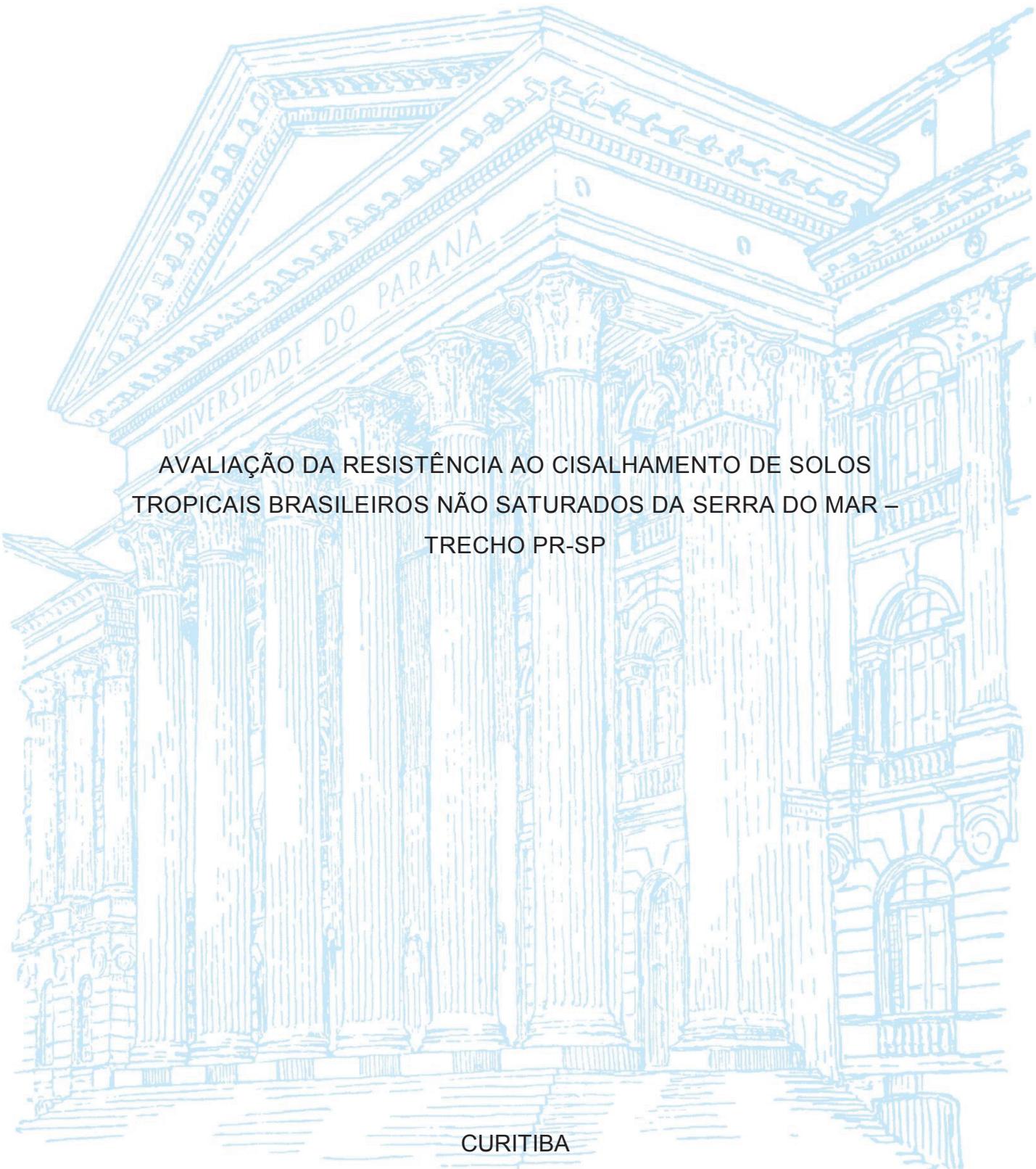


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JORDANA FURMAN



AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS
TROPICAIS BRASILEIROS NÃO SATURADOS DA SERRA DO MAR –
TRECHO PR-SP

CURITIBA

2019

JORDANA FURMAN

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS
TROPICAIS BRASILEIROS NÃO SATURADOS DA SERRA DO MAR –
TRECHO PR-SP

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil, área de concentração em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F986a

Furman, Jordana

Avaliação da resistência ao cisalhamento de solos tropicais brasileiros não saturados da serra do mar –trecho PR-SP [recurso eletrônico] / Jordana Furman. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2019.

Orientador: Vítor Pereira Faro.

1. Cisalhamento dos solos - Resistência 2. Solo - Uso 3. Sucção mátrica.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Faro, Vítor Pereira. III. Título.

CDD: 620.191

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de JORDANA FURMAN intitulada: **Avaliação da resistência ao cisalhamento de solos tropicais brasileiros não saturados da Serra do Mar - trecho PR-SP**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 12 de Julho de 2019.


VITOR PEREIRA FARO

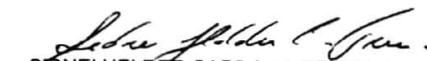
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

Avaliador Externo (UFPR)


RODRIGO MORAES DA SILVEIRA

Avaliador Externo (PUC-PR)


SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares. Isso tudo é por vocês e para vocês.

De forma muito especial agradeço ao meu grande amigo Lucas Ghion Zorzan. Obrigada pela amizade, conselhos e discussões. Tenho orgulho de nossa parceria e do grande profissional e ser humano que és.

Ao meu professor orientador, Dr. Vítor Pereira Faro, pela orientação e parceria, não somente neste trabalho, mas ao longo dos últimos. Muito além de professor, se tornou também um grande amigo. Obrigada pelo incentivo e por acreditar em meu potencial.

Aos membros da banca: Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira, Dr. Rodrigo Moraes da Silveira e Dr. Andrés Miguel González Acevedo. Obrigada por aceitarem o convite e também por terem contribuído para minha formação profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná e aos professores da área de geotecnia pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos e aos colegas da Sala 28. Agradeço pelas conversas e momentos de descontração.

*“Seja lá o que você fizer,
seja bom nisso.”*

Abraham Lincoln

RESUMO

O solo tropical possui características e comportamento peculiares devido a sua geologia e aos processos geológicos de formação típicos do clima tropical. Os longos períodos de chuva e seca contribuem para que o solo esteja sujeito às variações de umidades. Uma das principais características dos solos não saturados é a ocorrência de sucção mátrica, que acontece quando a água preenche parcialmente os vazios do solo, resultando em pressões negativas. A pressão negativa na água do solo altera seu comportamento mecânico, aumentando significativamente sua resistência. Nesta pesquisa, estudou-se a resistência ao cisalhamento de solos tropicais não saturados por meio de ensaios cisalhamento direto e a partir da determinação das curvas características dos solos. Os resultados obtidos, para amostras indeformadas e remoldadas, permitiram a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. A contribuição da sucção mátrica na resistência do solo foi considerada por meio de incrementos na coesão aparente empregando-se os modelos de Khalili e Khabbaz (1998) e de Vilar (2006). Os modelos foram calibrados a partir de resultados experimentais de ensaios de cisalhamento direto em solos saturado e não saturado. Nos resultados e análises, foi evidenciado que o aumento de sucção mátrica gera acréscimos de resistência.

Palavras-chave: Solo não saturado. Resistência ao cisalhamento. Sucção mátrica.

ABSTRACT

Tropical soils have peculiar characteristics and behavior considering its geology and soilgenesis typical of tropical regions. In those regions, there are long periods of rainy and dry seasons, which cause variation of water content. One of the main characteristics of the unsaturated soils is the occurrence of suction, which happens when the water partially fills the voids of the soil, resulting in negative pressures. The negative pore water pressure in the soil affects its mechanical behavior, increasing the resistance significantly. This research studied the shear strength of unsaturated tropical soils obtained by direct shear tests and from the soil-water characteristic curves of the soils. The results obtained for undisturbed and remolded samples allowed the determination of shear strength parameters. The contribution of suction in the shear strength of the soil was considered by increasing the apparent cohesion based on the models of Khalili e Khabbaz (1998) and of Vilar (2006). The model was calibrated using experimental results of direct shear tests in saturated soil and unsaturated soil. The analysis showed that suction cause an increase on shear strength.

Key-words: Unsaturated soil. Shear strength. Suction.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DO SOLO	19
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE POROPRESSÕES EM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO.....	20
FIGURA 3 – ASCENSÃO CAPILAR EM TUBOS DE DIFERENTES DIÂMETROS.....	21
FIGURA 4 - ASCENSÃO CAPILAR NO MENISCO E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO.....	22
FIGURA 5 - ELEMENTOS DA CURVA CARACTERÍSTICA.....	23
FIGURA 6 - CURVA CARACTERÍSTICA: PROCESSO DE SECAGEM E UMEDECIMENTO.....	24
FIGURA 7 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO NA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	25
FIGURA 8 - CURVA CARACTERÍSTICA BIMODAL.....	26
FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO GRÁFICA DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CALCULAR OS VALORES DE a , n E m	30
FIGURA 10 - FLUXO DE ÁGUA ENTRE MATERIAIS.....	33
FIGURA 11 - TIPOS DE FLUXOS DO SOLO PARA O PAPEL FILTRO.....	34
FIGURA 12 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA SOLOS NÃO SATURADOS PROPOSTA POR FREDLUND ET AL. (1978).....	38
FIGURA 13 – LINHAS DE CONTORNO DA ENVOLTÓRIA DE RUPTURA NO PLANO τ VERSUS $\sigma_n - u_a$	39
FIGURA 14 – NÃO LINEARIDADE DA ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS $u_a - u_w$	40
FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE χ E A SUCCÃO MÁTRICA.....	43
FIGURA 16 – VARIAÇÃO DE χ EM FUNÇÃO DA SUCCÃO MÁTRICA NORMALIZADA EM RELAÇÃO À ENTRADA DE AR.....	43
FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE SUCCÃO MÁTRICA E COESÃO APARENTE UTILIZADA PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS a E b DA PREVISÃO..	45
FIGURA 18 – APLICAÇÃO DO MODELO DE VILAR (2006) EM UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE JOVEM.....	47
FIGURA 19 – APLICAÇÃO DO MODELO DE VILAR (2006) EM UM SOLO ARENOSO COMPACTADO.....	47

FIGURA 20 – APLICAÇÃO DO MODELO DE VILAR (2006) EM UM SOLO COMPACTADO.....	47
FIGURA 21 - ALGUMAS POSSÍVEIS FORMAS PARA AS CURVAS TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL E CRITÉRIOS DE RUPTURA PROPOSTOS	48
FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	50
FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BARRA DO TURVO - SP .	51
FIGURA 24 - PERFIL ESQUEMÁTICO DA SEÇÃO PRINCIPAL DO TALUDE	53
FIGURA 25 - LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS	54
FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BLOCOS INDEFORMADOS NO MAPA GEOLÓGICO - SERRA PELADA	55
FIGURA 27 - COLETA DO BLOCO INDEFORMADO DA AMOSTRA RD	57
FIGURA 28 - COLETA DO BLOCO INDEFORMADO DA AMOSTRA CO.....	57
FIGURA 29 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS – AMOSTRAS RD E CO.....	58
FIGURA 30 - PREPARAÇÃO DE CORPO DE PROVA INDEFORMADO – AMOSTRA RD	61
FIGURA 31 - REMOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	62
FIGURA 32 - CORREÇÃO DA UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA.....	64
FIGURA 33 - PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA COM O PAPEL FILTRO	65
FIGURA 34 - AMOSTRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE MEV	66
FIGURA 35 – EQUIPAMENTO PARA METALIZAÇÃO DE AMOSTRAS	67
FIGURA 36 - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	67
FIGURA 37 – EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	68
FIGURA 38 - COMPONENTES DA CÉLULA DE CISALHAMENTO.....	69
FIGURA 39 - ESQUEMA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL	69
FIGURA 40 - DETALHE DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	71
FIGURA 41 - DESLOCAMENTO HORIZONTAL DA AMOSTRA AO FINAL DO ENSAIO.....	72
FIGURA 42 – CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA RD – (I) E (R)	75
FIGURA 43 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA CO (I).....	75

FIGURA 44 – COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO	77
FIGURA 45 - IMAGEM MEV - AMOSTRA RD (I)	79
FIGURA 46 - IMAGEM MEV - AMOSTRA RD (R)	79
FIGURA 47 - IMAGEM MEV - AMOSTRA CO (I).....	80
FIGURA 48 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=1%	84
FIGURA 49 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=20%	84
FIGURA 50 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=35%	84
FIGURA 51 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=50%	85
FIGURA 52 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=65%	85
FIGURA 53 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=95%	85
FIGURA 54 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=1%.....	86
FIGURA 55 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=20%.....	86
FIGURA 56 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=35%.....	87
FIGURA 57 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=50%.....	87
FIGURA 58 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=65%.....	88
FIGURA 59 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=95%.....	88
FIGURA 60 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=1%	89
FIGURA 61 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=50%	89

FIGURA 62 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=65%	89
FIGURA 63 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=95%	90
FIGURA 64 - COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES INDEFORMADA E REMOLDADA DO SOLO RD	91
FIGURA 65 – RESUMO DAS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA RD (I)	93
FIGURA 66 – RESUMO DAS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA RD (R)	93
FIGURA 67 – RESUMO DAS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA CO (I)	94
FIGURA 68 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO	95
FIGURA 69 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND <i>ET AL.</i> (1987) – SOLO RD (i)	97
FIGURA 70 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND <i>ET AL.</i> (1987) – SOLO RD (R) – RESISTÊNCIA DE PICO	97
FIGURA 71 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND <i>ET AL.</i> (1987) – SOLO RD (R) – RESISTÊNCIA RESIDUAL	98
FIGURA 72 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND <i>ET AL.</i> (1987) – SOLO CO (i)	98
FIGURA 73 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO RD (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE KHALILI E KHABBAZ (1998)	100
FIGURA 74 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO RD (R) SEGUNDO A PROPOSTA DE KHALILI E KHABBAZ (1998)	101
FIGURA 75 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO CO (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE KHALILI E KHABBAZ (1998)	102
FIGURA 76 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO RD (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE VILAR (2006)	103
FIGURA 77 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO RD (R) SEGUNDO A PROPOSTA DE VILAR (2006)	104

FIGURA 78 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO
CO (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE VILAR (2006)..... 104

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RELAÇÕES EMPÍRICAS PROPOSTAS NA LITERATURA PARA MODELAGEM DA CURVA CARACTERÍSTICA	32
TABELA 2 - EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO DO PAPEL FILTRO.....	35
TABELA 3 - TEMPO DE EQUÍLIBRIO PARA MEDIR SUCCÃO TOTAL EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE SUCCÃO	36
TABELA 4 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE RETIRADA DOS BLOCOS INDEFORMADOS.....	55
TABELA 5 - RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	59
TABELA 6 - ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS MÉDIOS.....	60
TABELA 7 - VALORES DE ENTRADA DE AR E DE UMIDADE RESIDUAL ...	76
TABELA 8 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO - AMOSTRA RD (I) .	82
TABELA 9 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO AMOSTRA RD (R) – PICO	82
TABELA 10 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO AMOSTRA RD (R) – RESISTÊNCIA RESIDUAL.....	83
TABELA 11 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO AMOSTRA CO (I) .	83
TABELA 12 - VALORES DE φ_b PARA OS SOLOS ESTUDADOS.....	98

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 CONCEITOS GERAIS DE SOLOS NÃO SATURADOS	19
2.1.1 Sucção	21
2.1.2 Curva característica de retenção de água	23
2.1.3 Equações de ajuste da curva característica	27
2.1.4 Ensaio para determinação da sucção - Método do Papel Filtro	32
2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS NÃO SATURADOS	37
2.2.1 Modelos de previsão de resistência ao cisalhamento de solos não saturados.....	41
2.2.2 Critérios de ruptura propostos	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 ÁREA DE ESTUDO	51
3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	54
3.3 COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS	55
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	58
3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	59
3.5.1 Corpos de prova indeformados	60
3.5.2 Corpos de prova remoldados	61
3.6 MÉTODO DO PAPEL FILTRO	62
3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	66
3.8 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	68
4 RESULTADOS E ANÁLISES	74
4.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO	74
4.2 ENSAIOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)...	78
4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	80
4.4 APLICAÇÃO DO MODELO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PROPOSTO POR FREDLUND ET AL. (1978).....	96
4.5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	99

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
5.1 CONCLUSÕES	105
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS.....	108

1 INTRODUÇÃO

Os solos tropicais possuem características e comportamentos peculiares devido a sua geologia e aos processos geológicos de formação típicos do clima tropical. Nessas regiões é comum que o nível do lençol freático se manifeste em considerável profundidade. Esse fato, associado aos intensos períodos de chuva e seca, típicos desse clima, fazem com que o solo não esteja constantemente saturado, mas sim sujeito às variações de teor de umidade e, conseqüentemente, às variações de sucção mátrica. A relação entre essas grandezas é representada pela curva de retenção de água no solo. A obtenção dessa curva é essencial para a compreensão do comportamento mecânico dos solos não saturados (FAGUNDES, 2014).

Ainda segundo Fagundes (2014), a sucção mátrica no solo tem sido reconhecida como uma das mais importantes variáveis a interferir no comportamento mecânico dos solos não saturados e está diretamente relacionada à sua resistência ao cisalhamento. O estudo da variação da resistência ao cisalhamento em diferentes sucções fornece subsídios para o entendimento do comportamento dos solos em obras geotécnicas, tais como barragens, taludes e fundações, e em fenômenos naturais, como deslizamentos de terra.

No caso de taludes não saturados, alterações na sucção mátrica alteram significativamente o comportamento da massa de solo. Os movimentos de massa ocasionados pela infiltração da água das chuvas são típicos de regiões tropicais montanhosas em todo o mundo. É um problema complexo e que envolve muitas incertezas, principalmente na previsão de sua ocorrência. A redução da sucção mátrica causada pela infiltração de águas pluviais é um dos aspectos importantes nesse processo. Movimentos de massa devido à redução da sucção mátrica pela infiltração da água da chuva em solos não saturados têm causado grande número de vítimas e danos materiais. Assim sendo, a compreensão do efeito da sucção mátrica sobre a resistência ao cisalhamento nestes solos é essencial para que a engenharia geotécnica possa dispor de ferramentas adequadas para analisar e prever este tipo de fenômeno (SOARES, 2006).

Esta pesquisa visa contribuir para a compreensão do comportamento de dois solos não saturados representativos de um talude localizado na região da Serra do Mar, junto à divisa dos estados de São Paulo e Paraná. O primeiro solo estudado é um solo residual de granito (solo RD) e o segundo é um colúvio localizado no sopé da encosta (solo CO). A escolha desses materiais foi baseada nos possíveis riscos de instabilidade da encosta. As variações atmosféricas nesta região podem provocar a percolação de água por esses solos, gerando um aumento na poropressão (e no grau de saturação) e uma redução do fator de segurança da encosta devido à redução da sucção mátrica nos solos. Esta pesquisa tem como principal intuito compreender a influência da sucção mátrica sobre a resistência ao cisalhamento desses dois solos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o conhecimento acerca do comportamento mecânico de dois solos não saturados situados em uma região da Serra do Mar, entre os estados de São Paulo e Paraná, focando no efeito da sucção mátrica sobre a resistência ao cisalhamento desses solos.

Como objetivos específicos, podem-se pontuar os seguintes itens:

- Determinar as curvas de retenção de água dos solos RD e CO a partir do método do papel filtro;
- Obter a resistência ao cisalhamento dos solos RD e CO, para diferentes graus de saturação, a partir de ensaios de cisalhamento direto em amostras inundadas e não saturadas;
- Aplicar os resultados obtidos para avaliar a adequabilidade de alguns métodos propostos na literatura para previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados a partir da curva característica e de parâmetros efetivos do solo.
- Avaliar a aplicação desses métodos de previsão de resistência ao cisalhamento do ponto de vista prático.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos. Neste capítulo foi realizada uma breve introdução ao tema proposto e são apresentados os principais objetivos do trabalho.

Uma revisão dos aspectos teóricos necessários para a compreensão e análise dos resultados desta pesquisa é apresentada no Capítulo 2 – Fundamentação Teórica. Essa revisão aborda inicialmente alguns conceitos básicos e fundamentais para o entendimento do comportamento de um solo não saturado. Em seguida são abordados os conceitos relacionados a resistência ao cisalhamento dos solos.

O Capítulo 3 descreve o local de estudo, os materiais utilizados (solos estudados) e os respectivos ensaios de laboratório necessários para se cumprir os objetivos propostos nessa pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos durante as campanhas de ensaios de laboratório. São apresentadas as curvas características de retenção de água dos solos, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura. Neste capítulo também são discutidos os resultados obtidos e a aplicabilidade dos modelos de previsão de resistência ao cisalhamento a esses solos. Os resultados esperados são comparados com os resultados experimentais.

No Capítulo 5 são descritas as principais conclusões acerca dos resultados obtidos nesse trabalho e algumas propostas para futuras pesquisas que darão continuidade ao trabalho aqui desenvolvido. As referências bibliográficas que embasaram este trabalho são apresentadas no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa abordar conceitos e premissas relacionados aos solos não saturados, a fim de enfatizar a sua influência sobre o comportamento quanto à resistência ao cisalhamento.

2.1 CONCEITOS GERAIS DE SOLOS NÃO SATURADOS

O aprofundamento do estudo da mecânica dos solos deu-se em torno do ano de 1925 a partir de Karl Terzaghi. Seus estudos focaram no comportamento dos solos saturados devido, principalmente, a três razões: os solos saturados são constituídos apenas por duas fases (sólida e líquida); apresentam desenvolvimento de poropressões positivas, na qual sua consideração para muitos casos é uma opção conservadora; a teoria para solos saturados foi desenvolvida com base em solos de locais de clima úmido e elevado nível do lençol freático (PECAPEDRA, 2016).

Segundo Lambe e Whitman (1969), um solo não saturado é composto por um sistema trifásico, ou seja, é constituído por três fases: sólida (partículas minerais), líquida (água) e gasosa (ar). As fases líquida e gasosa são complementares, ou seja, a redução da fase líquida implica no aumento da fase gasosa. Gerscovich (2012) postula ainda que se deve considerar uma quarta fase, denominada interface água-ar (ou membrana contrátil), que influencia no comportamento mecânico do solo. A propriedade mais significativa desta membrana contrátil é a sua capacidade de resistir à tração.

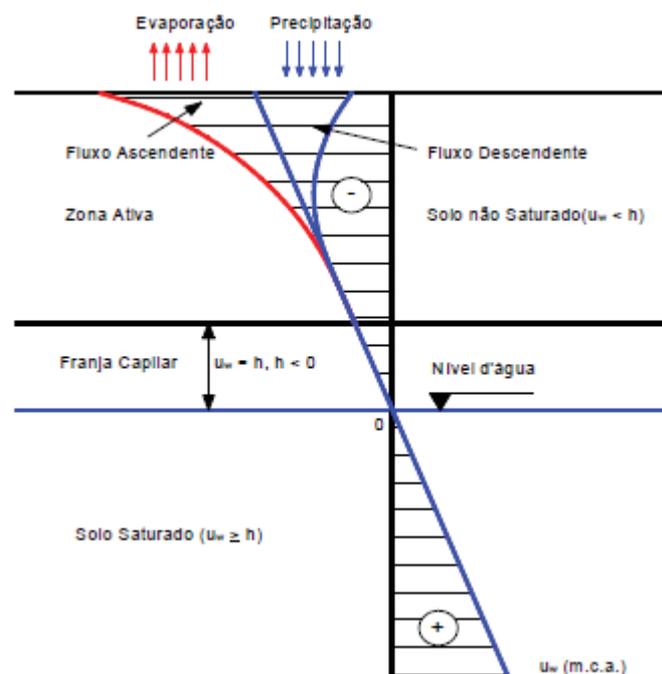
FIGURA 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DO SOLO



FONTE: Adaptado de Fredlund (1995, *apud* Pecapedra, 2016).

Segundo Pecapedra (2016), apesar dos solos não saturados recobrirem extensas áreas do planeta Terra, a impulsão dos estudos nesses solos ocorreu junto ao desenvolvimento dos países de climas tropicais. Nessas regiões, o solo está sujeito a variações de teor de umidade principalmente devido a precipitações, pois o nível do lençol freático geralmente é profundo. A posição do lençol freático está diretamente ligada às condições climáticas da região, desta forma, sofrendo influência direta das mudanças climáticas. A FIGURA 2 apresenta as condições do solo sob efeito das variações climáticas como, precipitação (fluxo descendente), evaporação e evapotranspiração (fluxo ascendente). Com isso, abaixo do nível d'água, adotando como referência a pressão atmosférica, a poropressão é positiva e o solo é saturado. Acima do nível d'água, a poropressão é negativa, a qual se denominada sucção mátrica. Se a umidade é retirada do solo (evaporação), o perfil da poropressão da água se desloca para a esquerda, ficando mais negativo. Se a umidade aumenta no solo (infiltração), o perfil da poropressão de água é atraído para a direita (PECAPEDRA, 2016).

FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE POROPRESSÕES EM PERFIL DE SOLO NÃO SATURADO



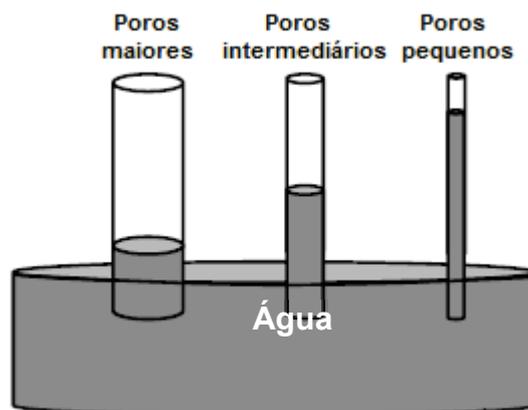
FONTE: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993).

2.1.1 Sucção

A posição do nível freático determina as duas áreas da mecânica dos solos. Solos abaixo do nível d'água são governados pela teoria da tensão efetiva proposta por Terzaghi (1943). Os solos que se encontram acima do lençol freático apresentam diversas propostas para equacionar as tensões efetivas, sendo muitas delas válidas apenas para um determinado tipo de solo.

Acima do nível d'água, existe uma zona capilar que se estende do nível freático até certa altura da zona não saturada. Isso ocorre devido à ação da capilaridade, a qual promove a ascensão do líquido pelos canalículos formados pelos vazios do solo. Nessa região acima do nível d'água, o solo está saturado por capilaridade, com grau de saturação entre 90 e 100%, mas com pressão negativa de água. A altura que a água pode atingir no interior do solo depende do tamanho do diâmetro dos vazios, uma vez que a altura de ascensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro dos mesmos (FIGURA 3). Para solos arenosos, a altura da ascensão capilar é da ordem dos centímetros, enquanto que para solos argilosos pode atingir vários metros. Acima da zona capilar, o solo encontra-se na condição não saturada com sucção crescente (FERNANDES, 2011).

FIGURA 3 – ASCENSÃO CAPILAR EM TUBOS DE DIFERENTES DIÂMETROS

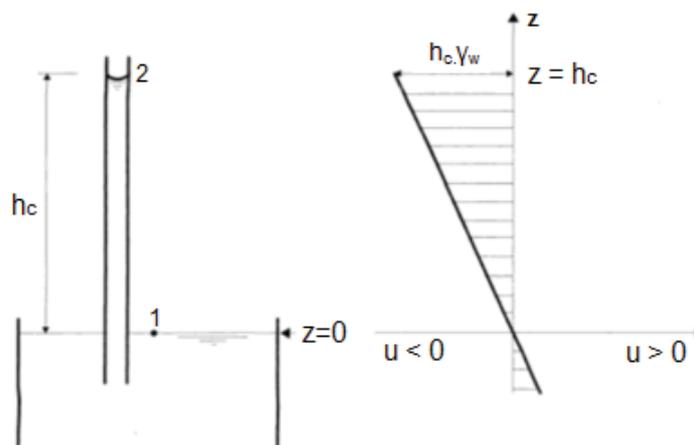


FONTE: A autora (2019).

Segundo Fernandes (2011), a água retida nos vazios do solo acima do nível d'água encontra-se submetida a uma pressão inferior à atmosférica. Observando a FIGURA 4, nota-se que no ponto 1 a pressão é igual à pressão

atmosférica ($h_1 = 0$). Logo, no ponto 2, a pressão é igual à pressão atmosférica menos a altura deste ponto em relação à superfície da água vezes o peso específico da água.

FIGURA 4 - ASCENSÃO CAPILAR NO MENISCO E DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO



FONTE: Adaptado de Fernandes (2011).

Esta pressão negativa acima do nível d'água é denominada sucção (ψ). A sucção representa a força com que o solo retém a água e está diretamente relacionada ao volume de água presente nos vazios. Os valores de sucção podem variar de zero, quando o solo está saturado, até valores muito elevados quando o solo tende a secar. As pressões negativas tendem a aproximar as partículas, ou seja, aumentam a tensão efetiva no solo. Desse modo, o solo na região não saturada ganha uma resistência extra, cuja grandeza depende do valor da sucção (GERSCOVICH, 2012).

A sucção pode ser dividida em duas parcelas: mátrica e osmótica. A sucção mátrica é a pressão negativa desenvolvida na água do solo devida aos efeitos de capilaridade e forças de adsorção. Depende da estrutura e da composição do solo e refere-se quantitativamente a diferença entre a poropressão de água (u_w) e a poropressão de ar (u_a), tendendo a desaparecer com a saturação do solo. A sucção osmótica é função da concentração química da água no interior do solo. A diferença de pressão necessária para anular o fluxo de uma solução de água pura para uma solução mais concentrada, através de uma membrana semipermeável, por osmose, é chamada de sucção

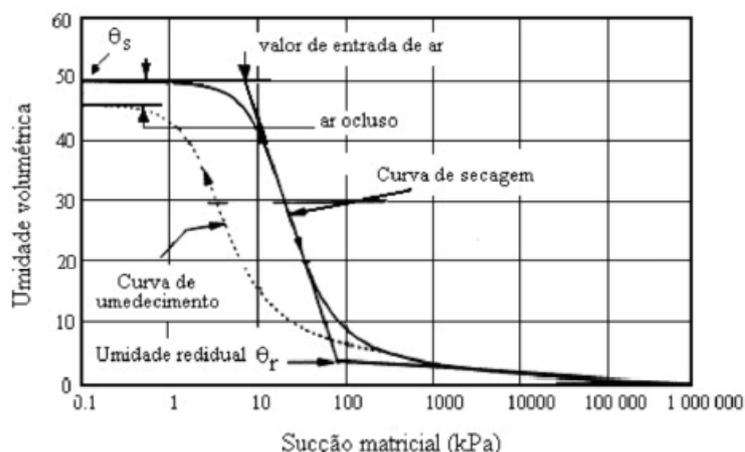
osmótica. A sucção total em um solo pode ser admitida como a soma entre essas duas parcelas (MIGUEL *et al.*, 2004).

2.1.2 Curva característica de retenção de água

A curva característica de retenção de água representa graficamente a relação entre a umidade volumétrica (θ), umidade gravimétrica (ω) ou grau de saturação (S) do solo e a sucção mátrica (ψ) presente no mesmo. A relação entre ψ e θ geralmente apresenta uma curva em forma de S, com características que dependem do tipo de solo, da distribuição granulométrica, dos tamanhos dos vazios e da estrutura e mineralogia das partículas (GERSCOVICH, 2012).

Da curva característica do solo, é possível definir alguns importantes parâmetros utilizados na descrição do comportamento de um solo não saturado: a umidade volumétrica de saturação (θ_s), a umidade residual (θ_r) e a pressão de entrada de ar. A FIGURA 5 mostra os elementos da curva. Um ponto importante na curva característica é o ponto definido pelo decréscimo acentuado da umidade volumétrica com o aumento da sucção mátrica, que se refere ao valor de entrada de ar, sendo caracterizado pela diferença entre a pressão de ar e de água (sucção mátrica) necessária para causar a drenagem do maior poro do solo. Ao atingir a sucção mátrica correspondente a entrada de ar, o solo deixa de estar saturado, já apresentando pressões d'água negativas (GERSCOVICH, 2012).

FIGURA 5 - ELEMENTOS DA CURVA CARACTERÍSTICA

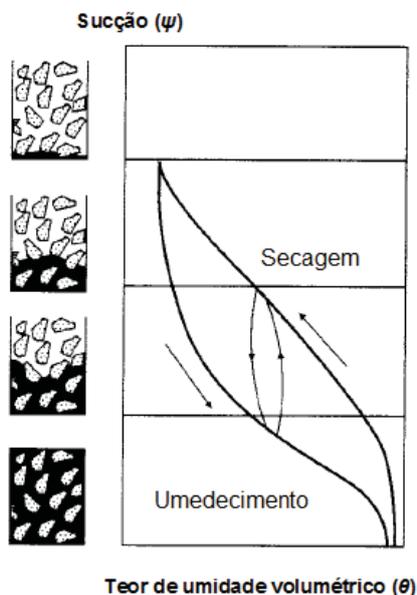


FONTE: Adaptado de Fredlund e Xing (1994, *apud* Georgetti, 2010).

Quatro regiões distintas de dessaturação podem ser verificadas na FIGURA 5. Para cada região, a água se encontra no interior do solo em diferentes condições. Na primeira região, zona a de efeito de contorno, o solo está saturado, preenchido por água, podendo haver ar ocluso. Na região de transição, dividida em duas zonas, ocorre intensa dessaturação, entrando ar na amostra até atingir a zona residual.

Segundo Gerscovich (2012), a curva de retenção de água do solo é obtida em laboratório seguindo trajetórias de secagem ou de umedecimento. O procedimento de secagem ocorre quando a amostra previamente saturada é exposta a sucções crescentes, o que implica ir diminuindo a umidade do solo, enquanto o procedimento por umedecimento ocorre quando uma amostra seca tem sua sucção mátrica reduzida gradativamente, incrementando-se a umidade. As curvas obtidas por ambos os processos não coincidem, dando origem ao fenômeno de histerese da curva de retenção, como mostra a FIGURA 6. Essa histerese decorre de alguns fatores, como: não uniformidade geométrica dos vazios; presença de ar; e mudanças na estrutura do solo.

FIGURA 6 - CURVA CARACTERÍSTICA: PROCESSO DE SECAGEM E UMEDECIMENTO

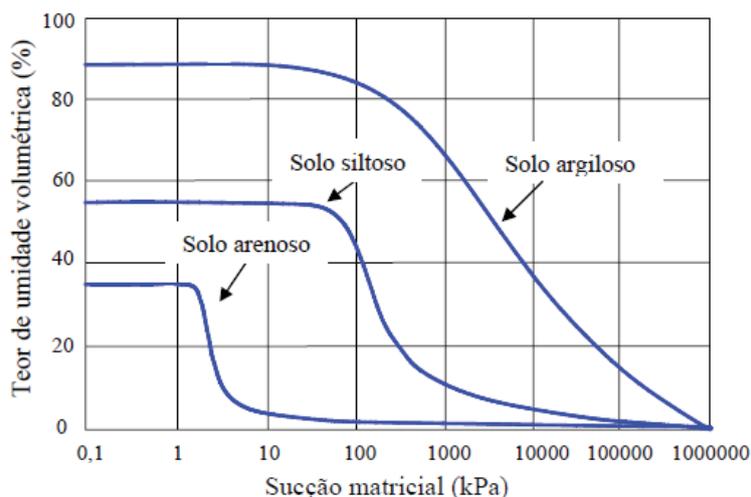


FONTE: Adaptado de Gerscovich (2012).

Além da histerese, diversos outros fatores interferem na forma da curva de retenção de água: tipo de solo, umidade de moldagem e histórico de tensões. Segundo Pecapedra (2016), nos solos argilosos, a distribuição de

poros é mais uniforme, drenando a água em parcelas a cada sucção mátrica imposta. Com isso, dessaturam de forma mais lenta e tendem a apresentar curvas mais suaves (solos argilosos apresentam maior capacidade de retenção de água para uma mesma sucção mátrica). A redução no tamanho do grão conduz a um aumento no valor de entrada de ar e a uma suavização da curva característica. Quanto mais fina a granulometria do material, menos determinado é o estágio residual. Por outro lado, os solos de granulometria mais grosseira apresentam menor valor de entrada de ar, um início do estágio residual bem definido e tendem a apresentar uma perda brusca de umidade quando ultrapassado certo valor de sucção mátrica. Alguns exemplos de curvas características para diferentes tipos de solos estão apresentados na FIGURA 7.

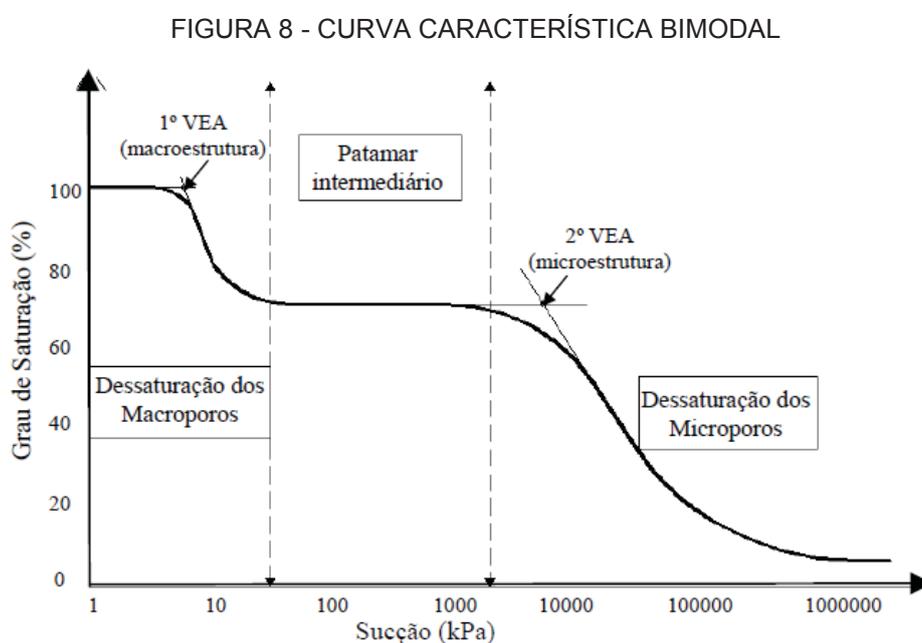
FIGURA 7 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO NA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA



FONTE: Adaptado de Fredlund e Xing (1994, *apud* Georgetti, 2010).

Os solos de origem residual, encontrados em regiões de clima tropical e subtropical, não apresentam necessariamente comportamento similar às curvas de retenção apresentadas na FIGURA 7. Esses solos frequentemente apresentam macroestrutura e microestrutura bem definidas, sendo compostos por partículas de argila agregadas de tal forma que se assemelham, em tamanho, a grãos de silte ou areia. Isso se deve principalmente ao efeito da cimentação natural que normalmente ocorre em solos residuais. A representação do solo com uma macroestrutura e microestrutura bem definidas é realizada num comportamento bimodal na curva de retenção. A distribuição

bimodal dos poros é frequentemente relacionada com a boa ou má graduação da curva granulométrica do material, mas também pode estar relacionada com algumas estruturas de solos. Devido à estrutura e à distribuição dos poros nestes solos, suas curvas de retenção podem apresentar patamares (curva bimodal ou trimodal), causados pela ausência de poros que definem a faixa de sucção mátrica para este patamar. Uma curva característica bimodal é apresentada na FIGURA 8 e três estágios de dessaturação são propostos: estágio de dessaturação dos macroporos, patamar intermediário e estágio de dessaturação dos microporos (FEUERHARMEL, 2007).



Os solos com distribuição bimodal de poros apresentam dois pontos de entrada de ar. O primeiro ocorre nos macroporos, para baixas sucções, e quando atingido há uma redução significativa do teor de umidade para pequenos aumentos de sucções, até atingir o término de entrada de ar nos macroporos. Nesse momento, o aumento da sucção não acarreta grandes variações no teor de umidade até a segunda entrada de ar (entrada de ar nos microporos). Para valores de sucção intermediários, a remoção de água da microestrutura do solo praticamente não ocorre devido à ausência de poros com tamanho intermediário (FEUERHARMEL, 2007).

A análise e determinação da curva característica tem se mostrado importante na obtenção de outras relações constitutivas necessárias para a previsão do comportamento do solo não saturado.

2.1.3 Equações de ajuste da curva característica

Diversas equações empíricas foram propostas na literatura para modelar a curva característica. Vários pesquisadores propuseram equações para definir a curva de retenção do solo. Cada autor apresentou a sua simplificação na equação a partir de resultados experimentais de diversos solos. Em geral, essas equações são restritas a certos tipos de solos, com um formato particular de curva característica, ou faixas limitadas de sucções. A maioria das equações modela a função que correlaciona sucção com teor de umidade (ou grau de saturação); entretanto algumas proposições sugerem que a curva característica pode ser estimada diretamente a partir da distribuição granulométrica e de propriedades físicas dos solos. Cabe salientar que os modelos de obtenção da curva característica a partir da curva granulométrica supõem a existência de uma relação unívoca entre diâmetro de vazio e sucção e conseqüentemente desconsideram a influência de aspectos como, arranjo estrutural, estado de tensões, teor de umidade inicial, energia de compactação e não uniformidade geométrica do solo (FEUERHARMEL, 2003).

As equações de Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) são largamente empregadas na literatura devido à sua versatilidade e por se ajustarem bem à maioria dos solos. Para solos que apresentam distribuição bimodal de poros, Gitirana e Fredlund (2004) propuseram uma equação que representa este comportamento. Os parâmetros de cada equação podem ser obtidos a partir de procedimentos gráficos e com o auxílio de ferramentas de alguns softwares, como o LAB Fit (TEIXEIRA, 2014).

2.1.3.1 Equação de Van Genuchten (1980)

A expressão proposta por Van Genuchten (1980) para estimar a curva de retenção é definida pela equação (1):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (1)$$

Onde:

θ = umidade volumétrica;

θ_s = umidade volumétrica na saturação;

θ_r = umidade volumétrica residual;

ψ = carga de pressão (sucção mátrica);

$m = 1 - \frac{1}{n}$, com $0 < m < 1$;

α, n, m = parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção.

O parâmetro α está diretamente relacionado ao valor da pressão de entrada de ar. Este parâmetro não é responsável por alterações na forma da curva, mas sim pela posição da curva (fazendo-a tender a regiões com valores maiores ou menores de sucção mátrica). O parâmetro n controla a inclinação da curva e relaciona-se com a distribuição granulométrica, de tal modo que, quanto mais uniforme for o solo maior será o valor de n . O parâmetro m determina o ponto de inflexão da parte inferior da curva de retenção e o patamar mínimo da mesma (VAN GENUCHTEN, 1980).

2.1.3.2 Equação de Fredlund e Xing (1994)

A equação proposta por Fredlund e Xing (1994) é baseada nas hipóteses de que a curva de retenção depende da distribuição de poros e que os meniscos formados possuem formato esférico, que se justifica assumindo que os poros apresentam seção circular e os canais que interligam os mesmos são cilíndricos e dispostos de forma aleatória. Os autores propuseram a seguinte relação entre a umidade volumétrica e a sucção mátrica, expressa pela equação (2):

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (2)$$

Onde:

θ_s = teor de umidade volumétrico na saturação;

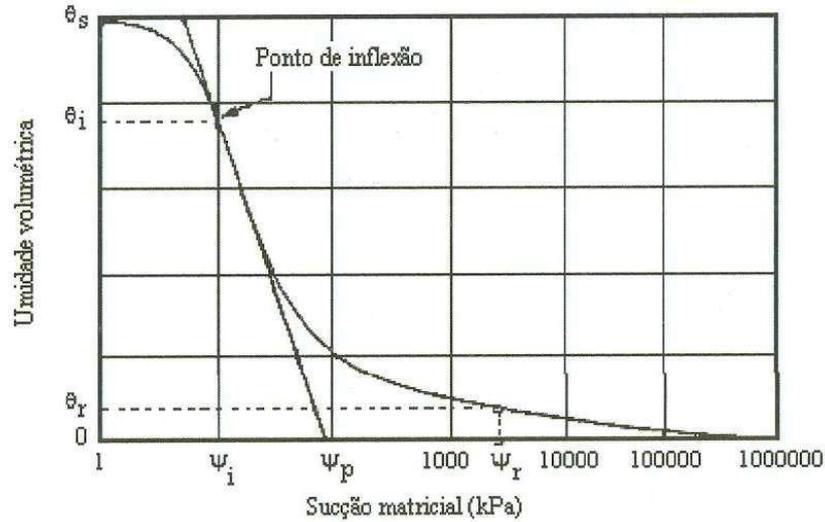
a, n, m = parâmetros de ajuste da curva.

O valor da umidade volumétrica normalizada (θ), dada pela relação entre a umidade volumétrica e a umidade volumétrica na saturação, é igual ao grau de saturação (S_r) e a equação (2) pode ser representada por:

$$S_r = \frac{1}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (3)$$

Os valores de a , n e m podem ser obtidos graficamente, conforme apresentado na FIGURA 9. O ponto de inflexão da curva de retenção corresponde às coordenadas (ψ_i, θ_i) . Passando-se uma tangente pelo ponto de inflexão, a reta intercepta o eixo das abscissas no valor de sucção mátrica correspondente a ψ_p . As coordenadas (ψ_r, θ_r) representam o ponto onde a curva de retenção passa a decrescer linearmente até 10^6 kPa. O procedimento gráfico para se encontrar os parâmetros a , n e m fornece apenas valores aproximados. A partir desses parâmetros determina-se a equação da curva que melhor se aproxima dos pontos experimentais. Um melhor ajuste aos pontos experimentais pode ser obtido ao se utilizar programas computacionais, aplicando-se o método dos mínimos quadrados (BONDER, 2008).

FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO GRÁFICA DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CALCULAR OS VALORES DE a , n E m



FONTE: Bonder (2008).

Os parâmetros a , n e m estão relacionados ao formato da curva de retenção. Com o aumento do valor do parâmetro a , a curva se desloca para a direita, alterando assim o valor da sucção mátrica de entrada de ar. O valor do parâmetro n faz com que a curva de retenção gire em torno do ponto de inflexão. À medida que o valor de n aumenta, a curva gira no sentido horário. O aumento do valor de m faz com que, para valores elevados de sucção mátrica, a curva de retenção se aproxime do eixo das abscissas (BONDER, 2008).

2.1.3.3 Equação de Gitirana e Fredlund (2004)

Não foram apresentadas na literatura muitas equações que representassem curvas características bimodais. Gitirana e Fredlund (2004) propuseram uma equação para modelar curvas bimodais com quatro pontos de quebra. Esta proposta é definida por dois valores de entrada de ar e dois pontos residuais, dando um total de quatro pontos de inflexão da curva. Um parâmetro a é usado para definir o formato de transição das flexões das curvas. Esta expressão é representada por:

$$S_r = \frac{S_{r1} - S_{r2}}{1 - (\psi/\sqrt{\psi_{b1} \cdot \psi_{res1}})^{d1}} + \frac{S_{r2} - S_{r3}}{1 - (\psi/\sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{res1}})^{d2}} + \frac{S_{r3} - S_{r4}}{1 - (\psi/\sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{res2}})^{d3}} + S_{r4} \quad (4)$$

Ou seja, oito parâmetros são identificados para representar uma curva bimodal. São eles:

ψ_{b1} = sucção de entrada de ar no 1º trecho (macroporos);

ψ_{res1} = sucção residual do 1º trecho (macroporos);

S_{r1} = grau de saturação residual do 1º trecho (macroporos);

ψ_{b2} = sucção de entrada de ar no 2º trecho (microporos);

S_{r2} = grau de saturação na entrada de ar do 2º trecho (microporos);

ψ_{b1} = sucção de entrada de ar no 2º trecho (microporos);

ψ_{res2} = sucção residual do 2º trecho (microporos);

S_{res2} = grau de saturação residual do 2º trecho (microporos);

d_i = variável de formato das hipérboles.

2.1.3.4 Outras equações

Há um grande número de equações que podem ser usadas para descrever a curva característica do solo não saturado a partir de dados obtidos experimentalmente. A seguir, na TABELA 1, serão expostas algumas destas equações encontradas na literatura (FREDLUND e XING, 1994; GERSCOVICH, 2001):

TABELA 1 – RELAÇÕES EMPÍRICAS PROPOSTAS NA LITERATURA PARA MODELAGEM DA CURVA CARACTERÍSTICA

Modelo	Equação	Definição de variáveis
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + q\psi^\eta}$ $\theta = \frac{(\theta - \theta_s)}{(\theta_s - \theta_r)}$	θ = teor de umidade normalizado; q e η = parâmetros de ajuste; ψ = sucção; θ , θ_s e θ_r = teores de umidade volumétrica, saturada e residual, respectivamente.
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda$	λ = índice de distribuição de diâmetro de vazios; ψ_b = sucção correspondente ao valor de entrada de ar.
Visser (1966)	$\psi = \frac{a(\theta_s - \theta)^b}{\theta^c}$	a , b e c = parâmetros de ajuste.
Farrel e Larson (1972)	$\psi = \psi_b e^{\alpha(1-\theta)}$	α = parâmetro de ajuste.
Roger e Hornberger (1978)	$\psi = a(S_s - b)(S_s - 1)$	$S_s = \theta/\theta_s$ a e b = parâmetros de ajuste.
William <i>et al.</i> (1983)	$\ln \psi = a + b \ln \theta$	a e b = parâmetros de ajuste.
Mckee e Bumb (1984)	$\theta = e^{-(\psi-a)/b}$	a e b = parâmetros de ajuste.
Saxton <i>et al.</i> (1986)	$\psi = a\theta^b$	a e b = parâmetros de ajuste.
Gallipoli <i>et al.</i> (2003)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$ $\alpha = \varphi(\nu - 1)^\psi$	ν = volume específico; φ , ψ = constantes do solo; (correção do modelo de Van Genuchten (1980) Para solos deformáveis).

FONTE: Adaptado de Fredlund e Xing (1994) e Gerscovich (2001).

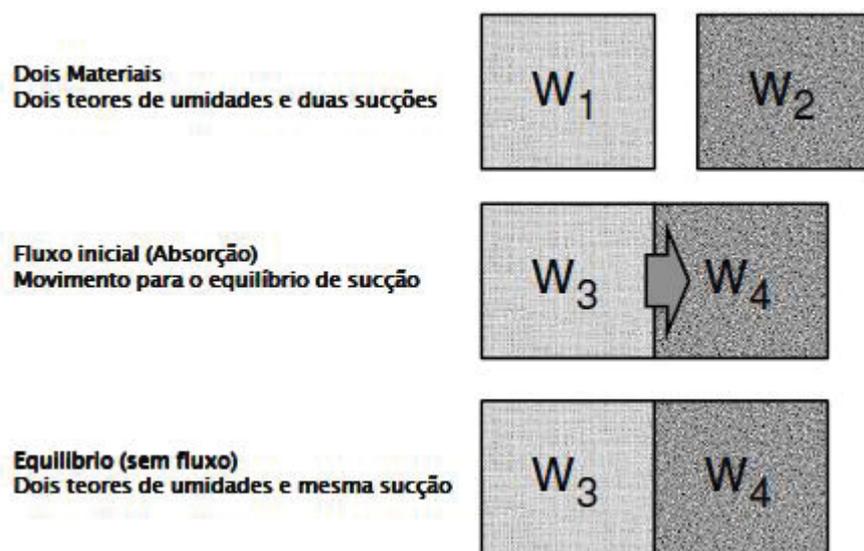
2.1.4 Ensaio para determinação da sucção - Método do Papel Filtro

A sucção é um parâmetro muito importante para o estudo de um solo não saturado. Para defini-la, o método do papel filtro tem se mostrado muito útil, devido a simplicidade do método, seu baixo custo e a possibilidade de medir a sucção mátrica total ou mátrica em largos limites (30 - 30000 kPa). Entretanto possui como inconveniente o tempo para obtenção da curva e a necessidade de extremo cuidado na execução. Esta técnica trata-se de um método indireto cujo objetivo é determinar a tensão de sucção do solo a partir de uma curva de calibração, que relaciona sucção mátrica com a umidade de uma folha de papel filtro (referência Whatman nº 42) colocada sobre a amostra

de solo num arranjo selado com um filme plástico dentro de um recipiente fechado (FEUERHARMEL, 2003).

Quando um solo úmido (w_1) é colocado em contato com um material poroso (w_2) que possua capacidade de absorver água, a mesma tenderá a passar do solo para o material poroso, até que o equilíbrio de pressão seja estabelecido, ou seja, até que não ocorra mais fluxo entre o solo (w_3) e o papel (w_4) (FIGURA 10). O tempo de equilíbrio é muito importante para a obtenção da sucção mátrica correta, pois no equilíbrio se observa que a sucção mátrica é a mesma para os dois materiais, ainda que estes possuam umidades diferentes. Logo, a água absorvida pelo papel filtro pode ser utilizada para obter a sucção mátrica do sistema (FEUERHARMEL, 2003).

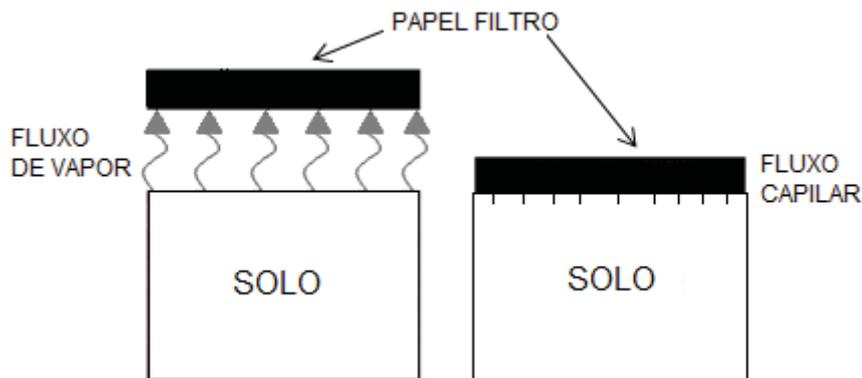
FIGURA 10 - FLUXO DE ÁGUA ENTRE MATERIAIS



FONTE: A autora (2019).

Segundo Marinho (1995), a troca de água entre os materiais pode ocorrer de duas formas: através de fluxo de vapor, quando não há contato entre os materiais; ou através de fluxo capilar, quando há contato entre os materiais. A FIGURA 11 representa os dois tipos de fluxos entre solo e papel filtro.

FIGURA 11 - TIPOS DE FLUXOS DO SOLO PARA O PAPEL FILTRO



FONTE: Adaptado de Marinho (1994).

Se o fluxo ocorrer a partir de vapor, a sucção medida será a total, pois as moléculas devem se separar e sair dos poros vencendo forças capilares e osmóticas. Se o fluxo ocorrer por capilaridade, mede-se a sucção mátrica, pois o componente osmótico não atua como uma força adicional que impede o fluxo de água para o papel filtro. A única maneira de estabelecer a sucção osmótica pelo método do papel filtro é realizando a diferença entre a sucção total e a sucção mátrica (FEUERHARMEL, 2003).

Para obter o valor de sucção, faz-se necessário o uso de uma curva de calibração, obtida do equilíbrio do papel com soluções salinas de sucção osmótica conhecida. Após o equilíbrio, o papel filtro é retirado, pesado e seco em estufa para determinação do seu teor de umidade. O teor de umidade obtido é relacionado com a sucção já conhecida. A curva de calibração é dependente do tipo de papel filtro utilizado. Nos últimos cinquenta anos, diversas equações de calibração foram propostas na literatura, principalmente para os papéis filtro das marcas Whatman nº 42 e Schleicher e Schuell nº 589. Marinho (1995) sugere algumas equações de calibração para esses papéis, como apresentado na TABELA 2. Também se deve observar que o tipo de sucção mátrica avaliada, total ou mátrica, influencia a curva de calibração, pois há uma curva diferente para cada uma delas, visto que para cada sucção mátrica o tipo de contato é diferente. Ou seja, a curva de calibração só deve ser usada para medir a sucção mátrica para a qual o papel filtro foi calibrado e com o mesmo tipo de papel utilizado na calibração.

TABELA 2 - EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO DO PAPEL FILTRO

Papel	Calibração	Referência
Whatman n° 42	$S(kPa) = 10^{(6,05-2,48 \log wp)}$ $wp > 47\%$ $S(kPa) = 10^{(4,84-0,0622 wp)}$ $wp \leq 47\%$	Chadler <i>et al.</i> (1992) (Sucção mátrica)
Whatman n° 42	$S(kPa) = 10^{(2,412-0,0135 wp)}$ $wp > 45,3\%$ $S(kPa) = 10^{(5,327-0,0779 wp)}$ $wp \leq 45,3\%$	Greace <i>et al.</i> (1987) ASTM D5298-94 (Sucção total)
Schleider e Schuell n° 589	$S(kPa) = 10^{(1,882-0,01202 wp)}$ $wp > 54\%$ $S(kPa) = 10^{(5,056-0,0688 wp)}$ $wp \leq 54\%$	ASTM D5298-94 (Sucção total)

FONTE: Marinho (1995).

A técnica do método do papel filtro é muito simples, mas é necessário que seja realizada e analisada cuidadosamente para aumentar o grau de confiabilidade nos resultados. Alguns aspectos da realização do ensaio devem receber uma atenção especial. Entre eles, está o tipo de contato entre o papel filtro e o solo. Se o solo estiver mais úmido, o papel filtro adere-se bem ao material. Já se o solo estiver mais seco, o papel fica mais solto, nesse caso propõe-se colocar um peso sobre a amostra a fim de garantir um bom contato solo-papel (FEUERHARMEL, 2003).

Algumas limitações do método são: o tempo exigido para atingir o equilíbrio da sucção mátrica entre o papel e o solo, necessidade de medições exatas de massa do papel filtro e o efeito da variação da temperatura. A variação da temperatura é uma das limitações do método, já que pode provocar evaporação ou condensação, alterando, assim, o tempo de equilíbrio necessário. Assim, recomenda-se o uso de caixas isolantes, como caixa de isopor, para conservação das amostras durante o período de espera até a obtenção do equilíbrio. Para obtenção da massa do papel filtro, um dos problemas é que quando desfeito o contato com o solo, o papel perde água rapidamente e quando retirado da estufa, absorve rapidamente água do ambiente, variando, assim, a massa do papel (TEIXEIRA, 2014). De acordo com Marinho (1995), deve-se utilizar uma balança com precisão de leitura de 0,0001 g e um tempo de transferência de no máximo 5 segundos.

O tempo de equalização é uma das considerações mais importantes para o método do papel filtro. O tempo exigido pela norma ASTM D5298/1994 é de sete dias, independentemente do nível e tipo de sucção mátrica. Como citado em Marinho (1994), para o papel filtro em contato com a água de poro (medição da sucção mátrica), grande parte da água é absorvida nos primeiros

minutos e a partir daí e lentamente absorvida até chegar ao equilíbrio em aproximadamente sete dias. No caso de o papel não estar em contato com a água de poro (medição da sucção total), quanto mais baixo o valor da sucção mátrica, maior o tempo de equilíbrio. Feuerharmel (2007) sugere o tempo de equalização de sete dias para valores de sucção mátrica acima de 10000 kPa e de quatro dias para valores menores que 10000 kPa. A TABELA 3 apresenta sugestões para o tempo de equilíbrio em função do nível de sucção total para o papel filtro Whatman N°42.

TABELA 3 - TEMPO DE EQUÍLIBRIO PARA MEDIR SUCÇÃO TOTAL EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE SUCÇÃO

Nível de sucção total (kPa)	Tempo de equilíbrio sugerido
0 – 100	>30 dias
100 – 250	30 dias
250 – 1000	15 dias
1000 – 30000	7 dias

FONTE: Marinho (1994).

Irregularidades superficiais ou descontinuidades na face da amostra em relação ao papel filtro podem causar imprecisão nas aferições, acarretando medições incorretas. Para compensar eventuais deficiências de contato entre o papel e o solo, pode-se aumentar o tempo de reserva no ambiente hermético, aumentando assim o tempo de interação entre o papel filtro e solo (GOMES, 2007). Aconselham que, após o tempo estabelecido para equilíbrio (o qual não há mais movimentação significativa de água entre papel-solo), o papel filtro seja removido do ambiente hermético e aferida sua massa o mais rápido possível, a fim de evitar alteração de sua umidade.

Feuerharmel (2003) lembra que outro fator importante é a *histerese* do papel filtro, ou seja, o teor de umidade final depende da direção do fluxo da água. Se o papel estiver inicialmente seco, a água fluirá do solo para o papel. Se o papel estiver úmido no início, a água fluirá do papel para o solo. Para isso, existem duas curvas de calibração do papel filtro: uma para a trajetória de secagem (primeiro caso) e outra para a trajetória de umedecimento (segundo caso). Para a execução do método, é aconselhável usar o papel nas mesmas condições em que ele foi calibrado.

2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS NÃO SATURADOS

Teorias de resistência ao cisalhamento para solos não saturados têm sido propostas como uma extensão dos conceitos e das equações matemáticas utilizadas em solos saturados, como, por exemplo, o critério de Mohr-Coulomb. Diversas tentativas para se obter uma equação para tensões efetivas em solos não saturados foram estudadas. Devido à complexidade do problema, por relacionar ar, água e solo no sistema, não era razoável utilizar uma única variável de estado de tensão para representar a contribuição da tensão total e da sucção mátrica na tensão efetiva (PECAPEDRA, 2016).

Bishop (1959), contornando essa dificuldade, propôs uma equação para a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, representada pela equação (5):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi' + \chi(u_w - u_a)\tan\varphi' \quad (5)$$

Onde:

τ = resistência ao cisalhamento;

c' = intercepto coesivo efetivo;

φ' = ângulo de atrito efetivo;

σ_n = tensão normal total;

$(\sigma_n - u_a)$ = tensão normal líquida;

u_a = poropressão do ar;

u_w = poropressão da água;

$(u_w - u_a)$ = sucção mátrica;

χ = parâmetro de tensão efetiva em função do grau de saturação.

O parâmetro χ equivale a 1 para o solo na condição saturada e zero quando totalmente seco. Porém, autores, como Escario e Sáez (1986), constataram que esse parâmetro depende de diversos fatores tais como histórico de tensões, estrutura dos solos e histerese.

Diante da dificuldade de definir uma equação para tensões efetivas em solos não saturados, Fredlund *et al.* (1978) propuseram escrever resistência ao

cisalhamento de um solo em condições não saturadas em termos de estados de tensões, como expresso na Equação 5:

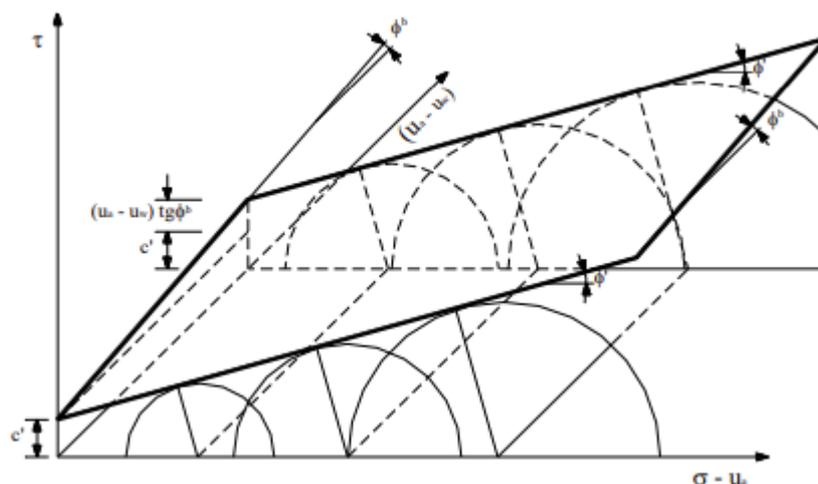
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_w - u_a)\tan\phi_b \quad (6)$$

Em que:

ϕ_b = razão do incremento da resistência com a sucção mátrica.

A FIGURA 12 mostra a representação da equação proposta por Fredlund *et al.* (1978) para a resistência ao cisalhamento, que pode ser representada de forma gráfica tridimensionalmente pelos eixos tensão normal líquida, resistência ao cisalhamento e sucção mátrica.

FIGURA 12 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA SOLOS NÃO SATURADOS PROPOSTA POR FREDLUND ET AL. (1978)



FONTE: Adaptado de Fredlund *et al.* (1978)

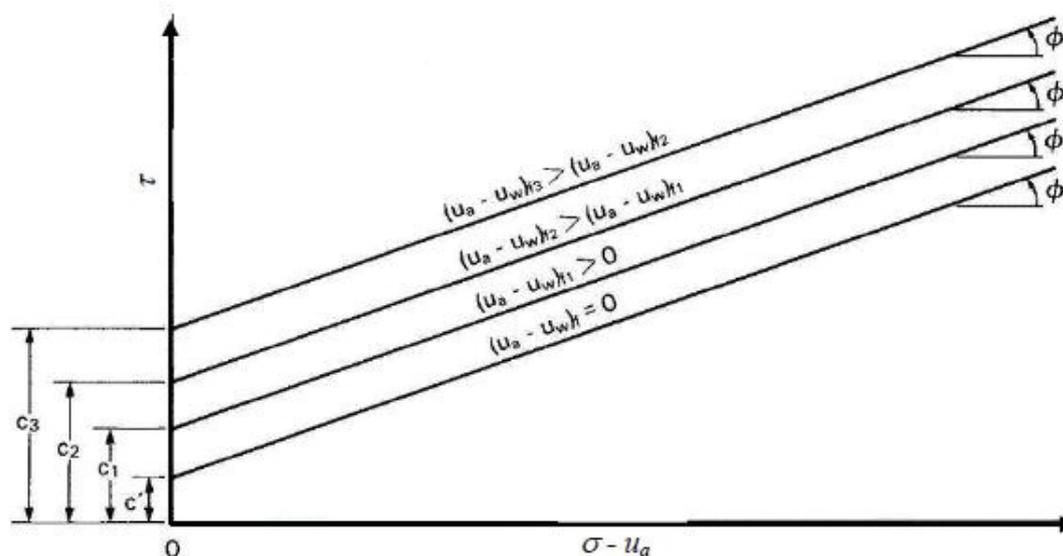
Para possibilitar aplicação dos conceitos convencionais de resistência ao cisalhamento de solos saturados a problemas práticos envolvendo solos não saturados, Ho e Fredlund (1982) sugeriram que o termo de sucção mátrica da equação (6) seja considerado como contribuinte para a parcela coesiva do solo, como mostram a equação (7) e a FIGURA 13.

$$c = c' + (u_w - u_a)\tan\phi_b \quad (7)$$

Em que:

c = coesão aparente do solo.

FIGURA 13 – LINHAS DE CONTOURO DA ENVOLTÓRIA DE RUPTURA NO PLANO τ VERSUS $(\sigma_n - u_a)$



FONTE: Fredlund e Rahardjo (1993).

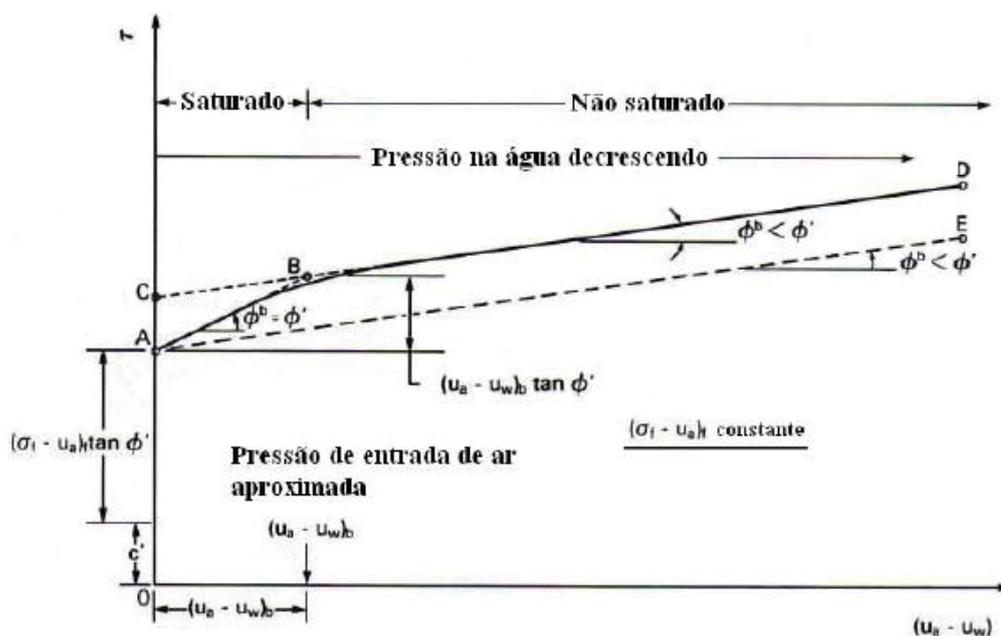
Quando se comparam as equações (5) e (6), verifica-se que $\tan\varphi_b = \chi \tan\varphi'$ e conclui-se que se o parâmetro χ de Bishop (1959) não é uma constante do solo, portanto não há razão para que φ_b o seja. Experimentalmente, embora a linearidade da envoltória de resistência em relação ao eixo de sucção mátrica tenha sido representativa para os dados analisados por Fredlund *et al.* (1978), dados de outros tipos de solos apresentaram variação de φ_b com o nível de sucção mátrica (GEORGETTI, 2010).

Frente às evidências de não linearidade de envoltórias de resistência, Fredlund *et al.* (1987) apresentaram uma justificativa teórica para o comportamento do solo e sugeriram um modelo de ajuste para a envoltória. Os autores explicaram a variação no ângulo φ_b considerando o volume do poro no qual a pressão na água age. Quando atuam baixas sucções, o solo permanece saturado e todo o poro é preenchido por água. Neste caso, os efeitos da pressão na água e da tensão normal total na resistência ao cisalhamento são caracterizados pelo mesmo ângulo de atrito φ' e, portanto, um aumento na sucção mátrica produz o mesmo aumento na resistência ao cisalhamento do

que um aumento na tensão normal líquida. Com o aumento da sucção mátrica, a água é drenada do solo e quando o valor de entrada de ar $(u_w - u_a)_b$ é atingido, o ar principia a substituir a água nos poros. Nesta fase, um aumento adicional na sucção mátrica demonstra não ser tão efetivo quanto um aumento na tensão normal líquida em aumentar a resistência ao cisalhamento do solo, indicando uma redução no ângulo ϕ_b para um valor menor que ϕ' (GEORGETTI, 2010).

A FIGURA 13 mostra uma envoltória não linear típica em relação ao eixo de sucção mátrica. Nota-se que esta envoltória tem um intercepto coesivo (c') acrescido do termo $(\sigma_n - u_a)\tan\phi'$, que é devido à tensão normal líquida aplicada na ruptura (ponto A). O ângulo ϕ_b é igual à ϕ' para baixos valores de sucção mátrica, e diminui a partir do ponto B, sendo que a sucção mátrica correspondente a este ponto se correlaciona com o valor de entrada de ar do solo. Isso quer dizer que com o aumento da sucção mátrica o incremento da resistência ao cisalhamento pelo efeito da sucção mátrica tende a diminuir. Com isso, Fredlund *et al.* (1987) sugeriram, entre outros modelos, um ajuste simples para a envoltória não linear utilizando duas retas (AB e BD).

FIGURA 14 – NÃO LINEARIDADE DA ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS $(u_a - u_w)$



FONTE: Adaptado de Fredlund *et al.* (1987).

Ainda segundo Georgetti (2010), dentre as técnicas de determinação experimental da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, as mais comuns são o ensaio de compressão triaxial e o ensaio de cisalhamento direto com sucção mátrica controlada. Para realização desses ensaios, geralmente se faz necessário o controle ou medida da sucção mátrica do solo, o que requer o emprego de técnicas específicas, e equipamentos adaptados para realizar este tipo de ensaio.

2.2.1 Modelos de previsão de resistência ao cisalhamento de solos não saturados

Tendo em vista as dificuldades para se determinar experimentalmente a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, alguns autores propuseram métodos de previsão da resistência desses solos que podem ser usados para uma estimativa de seu comportamento. Esses métodos propõe a utilização de resultados obtidos por ensaios rotineiros de laboratório, como os de obtenção dos parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento do solo saturado, e ensaios um pouco mais elaborados, porém voltados para diversas aplicações, como o ensaio para obtenção da curva característica de retenção de água.

Alguns desses métodos foram propostos por Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006). Para ambos os modelos, os parâmetros efetivos do solo, obtidos de ensaios triaxiais ou cisalhamento direto em condição saturada, são necessários. O modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998), utiliza apenas o valor da sucção mátrica referente à entrada de ar, enquanto o modelo proposto por Vilar (2006) não utiliza dados da curva de retenção para sua aplicação.

2.2.1.1 Modelo de Khalili e Khabbaz (1998)

O modelo de Khalili e Khabbaz (1998) baseia-se na equação de tensões efetivas em solos não saturados proposta por Bishop (1959), a qual foi dada pela equação (5). Na saturação, $u_w = u_a$ e essa equação se reduz a:

$$\tau_0 = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi' \quad (8)$$

A diferença entre as equações (5) e (8) representa o acréscimo de resistência atribuída à sucção mátrica, podendo ser determinado χ experimentalmente segundo a equação (9):

$$\chi = \frac{\tau - \tau_0}{(u_w - u_a)\tan\varphi'} \quad (9)$$

Khalili e Khabbaz (1998), a fim de tornar a equação em uma previsão de resistência ao cisalhamento, analisaram 14 casos publicados na literatura nos quais foram fornecidos os valores de resistência ao cisalhamento em função da sucção mátrica. Os valores de χ em função da sucção mátrica, obtidos a partir desses dados, estão apresentados na FIGURA 15. Os valores de χ em função da sucção mátrica foram normalizados em relação às respectivas sucções de entrada de ar. Esses resultados são apresentados na FIGURA 16. Observa-se que os valores experimentais apresentam uma dispersão, cujos limites são representados pelas linhas pontilhadas, em que a linha inferior representa os solos granulares, enquanto a linha superior representa os solos finos (OLIVEIRA, 2004).

O valor médio da faixa de variação dos dados apresentados na FIGURA 16 é dado pela bissetriz do ângulo formado entre as duas linhas limites, sendo expressa pela equação (10). Essa equação estabelece uma relação única para o valor de χ , dada pela relação entre a sucção mátrica e a sucção mátrica correspondente à entrada de ar, a uma potência de η .

$$\chi = \left[\frac{(u_w - u_a)}{(u_w - u_a)_b} \right]^\eta \quad (10)$$

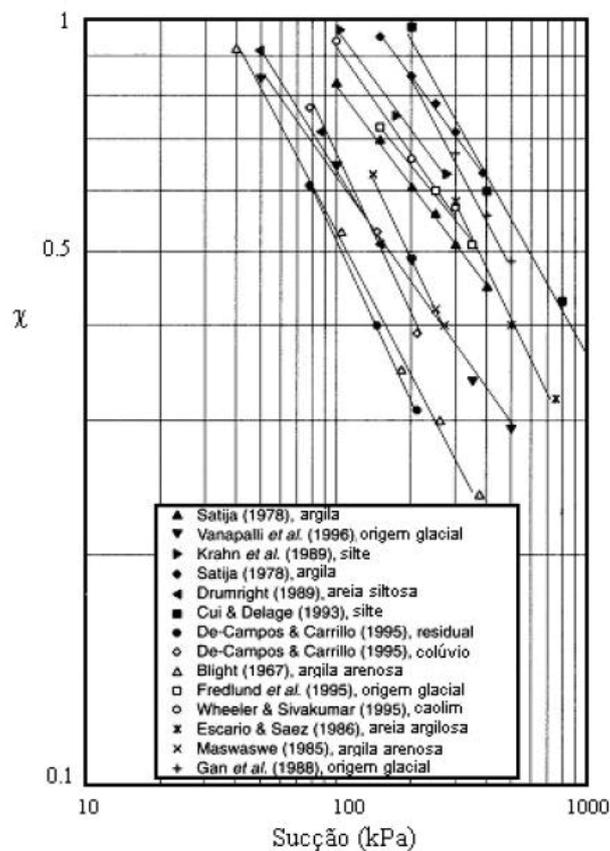
Em que:

χ = parâmetro de tensão efetiva;

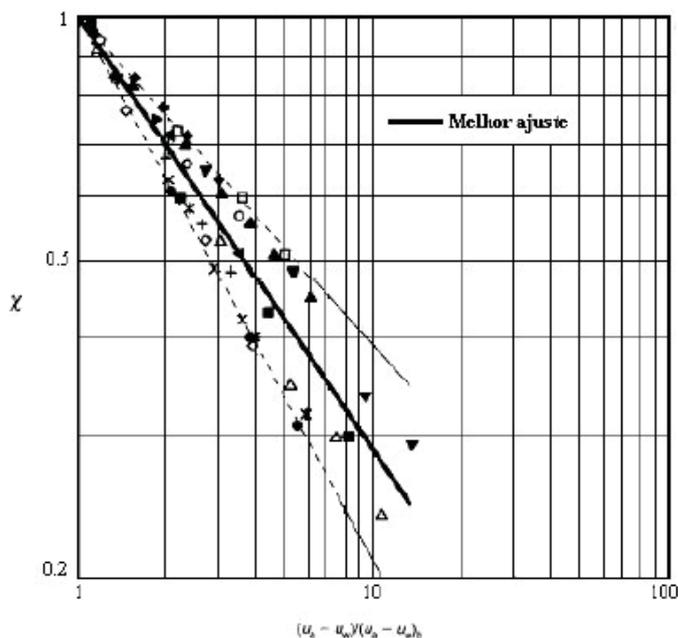
$(u_w - u_a)$ = sucção mátrica;

$(u_w - u_a)_b$ = pressão de entrada de ar do solo;

η = parâmetro de ajuste, com valor sugerido pelos autores de -0,55.

FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE χ E A SUCCÃO MÁTRICA

FONTE: Khalili e Khabbaz (1998, *apud* Oliveira, 2004).

FIGURA 16 – VARIÇÃO DE χ EM FUNÇÃO DA SUCCÃO MÁTRICA NORMALIZADA EM RELAÇÃO À ENTRADA DE AR

FONTE: Khalili e Khabbaz (1998, *apud* Oliveira, 2004).

Khalili e Khabbaz (1998) analisaram dados experimentais de diversos solos e obtiveram boa concordância entre os valores experimentais e previstos para o método proposto. No entanto, ao avaliar esse modelo de previsão de resistência para solos brasileiros, alguns autores não identificaram bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

Na aplicação deste modelo a dados experimentais de um solo residual compactado, Oliveira (2004) obteve resistência ao cisalhamento subestimada. O autor determinou então um novo expoente para o cálculo de χ , com valor de -0,321, e obteve melhor ajuste.

Georgetti (2010) avaliou a aplicabilidade do modelo proposto para um solo laterítico compactado. A autora detectou que a resistência ao cisalhamento prevista para o solo estudado estava aquém dos valores experimentais, embora o formato da curva parecesse adequado. Buscando um melhor ajuste do modelo, a autora propôs um novo expoente no valor de -0,240.

2.2.1.2 Modelo de Vilar (2006)

Vilar (2006) propôs um método empírico para expressar a contribuição da sucção mátrica na resistência ao cisalhamento dos solos não saturados, conforme apresenta a equação (11).

$$\tau = c + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' \quad (11)$$

Vilar (2006) percebeu que a relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção mátrica é não linear, pois φ_b tende a diminuir com o aumento da sucção mátrica e encaminhando-se para um valor constante. Por este motivo definiu que a contribuição da sucção mátrica é representada por uma função hiperbólica de ajuste (FIGURA 17). A função hiperbólica foi ajustada aos pontos experimentais pela equação (12).

$$c = c' + \frac{\psi}{a + b\psi} \quad (12)$$

Onde:

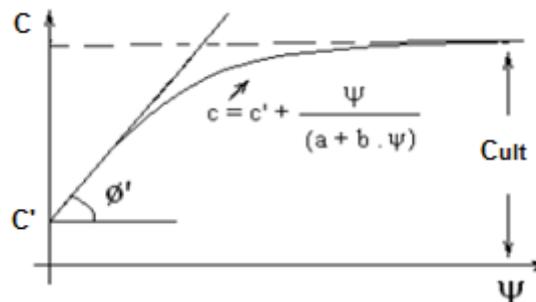
c = intercepto coesivo;

c' = intercepto coesivo efetivo do solo na condição saturada;

ψ = sucção mátrica de interesse.

a e b = parâmetros de forma da hipérbole;

FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE SUÇÃO MÁTRICA E COESÃO APARENTE UTILIZADA PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS a E b DA PREVISÃO



FONTE: Reis e Vilar (2004).

Os parâmetros a e b do modelo, definidos pelas equações (13) e (14), são determinados a partir dos parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento do solo e da coesão aparente de ensaios realizados em amostras de solo com umidade residual, na qual se admite que a contribuição da sucção mátrica atinja seu valor máximo. Uma alternativa sugerida pelo autor é a substituição do ensaio com solo na umidade residual por um ensaio cuja sucção mátrica atinja o limite do intervalo de interesse, e neste caso, o parâmetro b passa a ser calculado pela equação (15), e não mais pela equação (14).

$$a = \frac{1}{\tan\varphi'} \quad (13)$$

$$b = \frac{1}{c_{cult} - c'} \quad (14)$$

$$b = \frac{1}{c_m - c'} - \frac{1}{\psi \tan\varphi'} \quad (15)$$

Onde:

φ' = ângulo de atrito efetivo,

c_{ult} = coesão aparente última, determinada nos ensaios em solo com umidade residual;

c_m = coesão aparente máxima, correspondente a sucção mátrica máxima de interesse.

A determinação do parâmetro a é relativamente simples, pois depende do ângulo de atrito obtido em ensaios de resistência em amostras saturadas. Já o parâmetro b requer a estimativa da coesão aparente última (c_{ult}) para altos valores de sucção mátrica, o que exigiria a realização de ensaios especiais de sucção mátrica controlada (FERREIRA, 2010).

Com o intuito de encontrar alternativas simples para determinação dos parâmetros do solo não saturado, Vilar (2006) propôs assumir que, na condição do solo seco ao ar, a variação da sucção mátrica pouco afeta a resistência. Assim sendo, c_{ult} poderia ser determinado a partir de ensaios de resistência convencionais, em amostras na umidade seca ao ar.

Vilar (2006) tem tido sucesso usando a equação hiperbólica empírica para representar a influência da sucção mátrica na resistência ao cisalhamento de alguns solos brasileiros. Vários outros autores avaliaram a aplicabilidade do modelo proposto por Vilar (2006) em diferentes solos brasileiros, entre eles podemos citar Vilar e Rodrigues (2007), Ferreira e Gerscovich (2010), Georgetti (2010) e Fagundes (2014). A aplicação do modelo hiperbólico a esses solos apresentou bons resultados, embora a resistência seja subestimada em alguns casos (PECAPEDRA, 2016). As FIGURAS 18 a 20 apresentam os resultados obtidos por alguns dos autores citados anteriormente.

FIGURA 18 – APLICAÇÃO DO MODELO DE VILAR (2006) EM UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE JOVEM

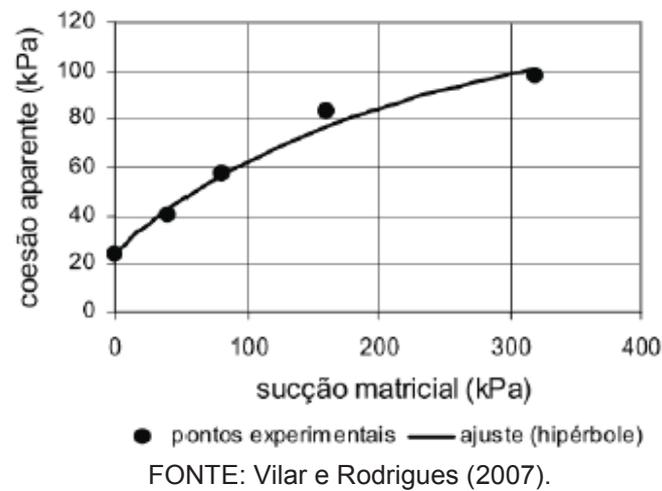


FIGURA 19 – APLICAÇÃO DO MODELO DE VILAR (2006) EM UM SOLO ARENOSO COMPACTADO

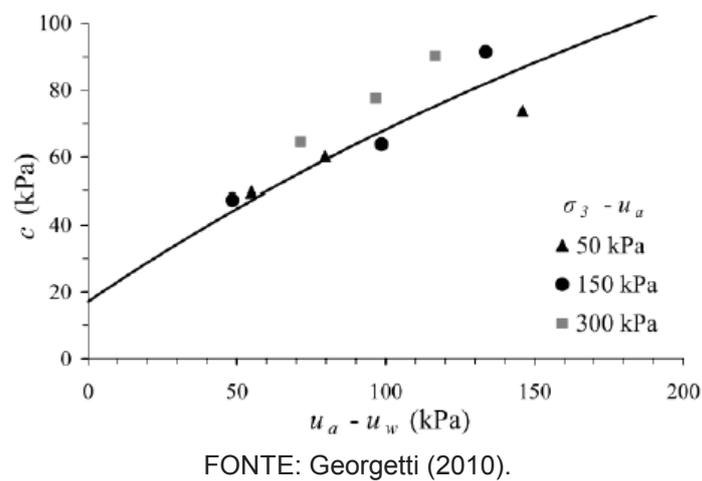
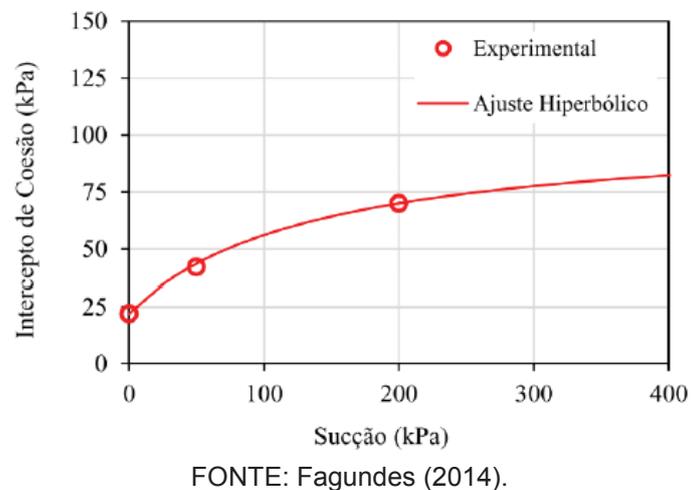


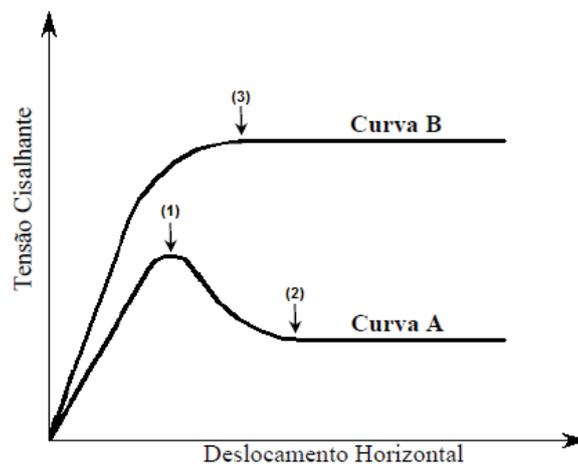
FIGURA 20 – APLICAÇÃO DO MODELO DE VILAR (2006) EM UM SOLO COMPACTADO



2.2.2 Critérios de ruptura propostos

Para a determinação da envoltória de resistência ao cisalhamento de um solo (saturado ou não saturado) é necessária a definição de critérios de ruptura. Esses critérios são definidos para o ensaio de cisalhamento direto a partir da análise da curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal apresentada pelo solo submetido a determinado estado de tensões (FEUERHARMEL, 2007). A FIGURA 21 apresenta duas possíveis formas para as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal encontradas para os solos ensaiados e os critérios de ruptura propostos.

FIGURA 21 - ALGUMAS POSSÍVEIS FORMAS PARA AS CURVAS TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL E CRITÉRIOS DE RUPTURA PROPOSTOS



FONTE: Adaptado de Feuerharmel (2007).

Segundo Feuerharmel (2007), a curva “A” representa o comportamento de um solo do tipo frágil, com pico de resistência ao cisalhamento, onde a ruptura pode ser definida pela máxima tensão cisalhante (ponto 1) suportada pelo solo antes de romper. Nota-se, por outro lado, que atingida esta resistência máxima, ao continuar a deformação do corpo de prova, a tensão cisalhante decresce lentamente até se estabilizar em torno de um valor que é definido como resistência residual (ponto 2).

A curva “B” descreve um comportamento dúctil, onde a resistência ao cisalhamento cresce até atingir um valor máximo, a partir do qual permanece praticamente constante. Para curvas desse tipo, a ruptura pode ser considerada no ponto onde o solo inicia o trecho de resistência constante

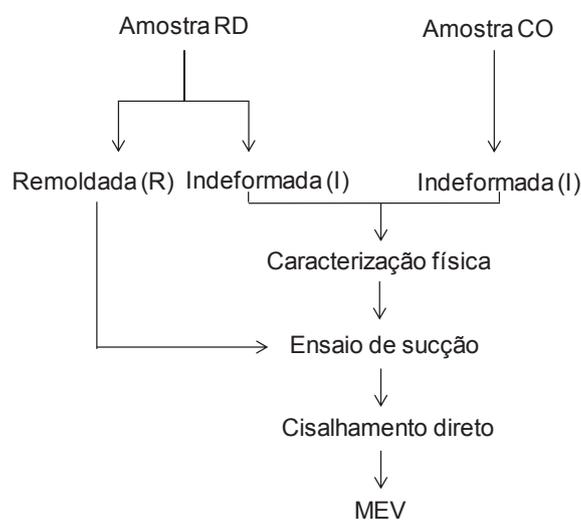
(ponto 3), mesmo quando um pequeno acréscimo de resistência é observado (FEUERHARMEL, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os estudos e técnicas experimentais utilizados para o desenvolvimento desta dissertação. Na caracterização dos solos são descritas a área de estudo e a geologia regional. Estes dados foram obtidos a partir de levantamentos de campo e pesquisa bibliográfica.

Nas técnicas experimentais são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física dos dois solos estudados, bem como os equipamentos e procedimentos adotados durante a realização do programa experimental. O programa experimental inclui: ensaios para determinação da curva característica pela técnica do papel filtro; ensaios de resistência ao cisalhamento (cisalhamento direto convencional em amostras inundadas e não saturadas); e ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A FIGURA 22 apresenta o fluxograma com as etapas do programa experimental realizado para o desenvolvimento deste trabalho.

FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL



FONTE: A autora (2019).

Para a amostra RD, os ensaios de sucção mátrica, cisalhamento direto e MEV foram realizados para as condições indeformada (I) e remoldada (R). Esses mesmos ensaios foram realizados para a amostra CO apenas na condição indeformada (I).

Os ensaios na condição remoldada foram realizados de modo a avaliar o efeito da desagregação da estrutura do solo residual sob a resistência ao cisalhamento do solo.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na região da Serra Pelada, a qual integra a cadeia montanhosa da Serra do Mar entre os estados de São Paulo e Paraná. Esta área está localizada no município de Barra do Turvo – SP, às margens da rodovia BR-116 (pista PR – SP) no km 552+000 PN, conforme ilustra a FIGURA 23. A BR-116 também é conhecida por rodovia Régis Bittencourt e liga a capital paulista a Curitiba.

FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BARRA DO TURVO - SP



FONTE: A autora (2019).

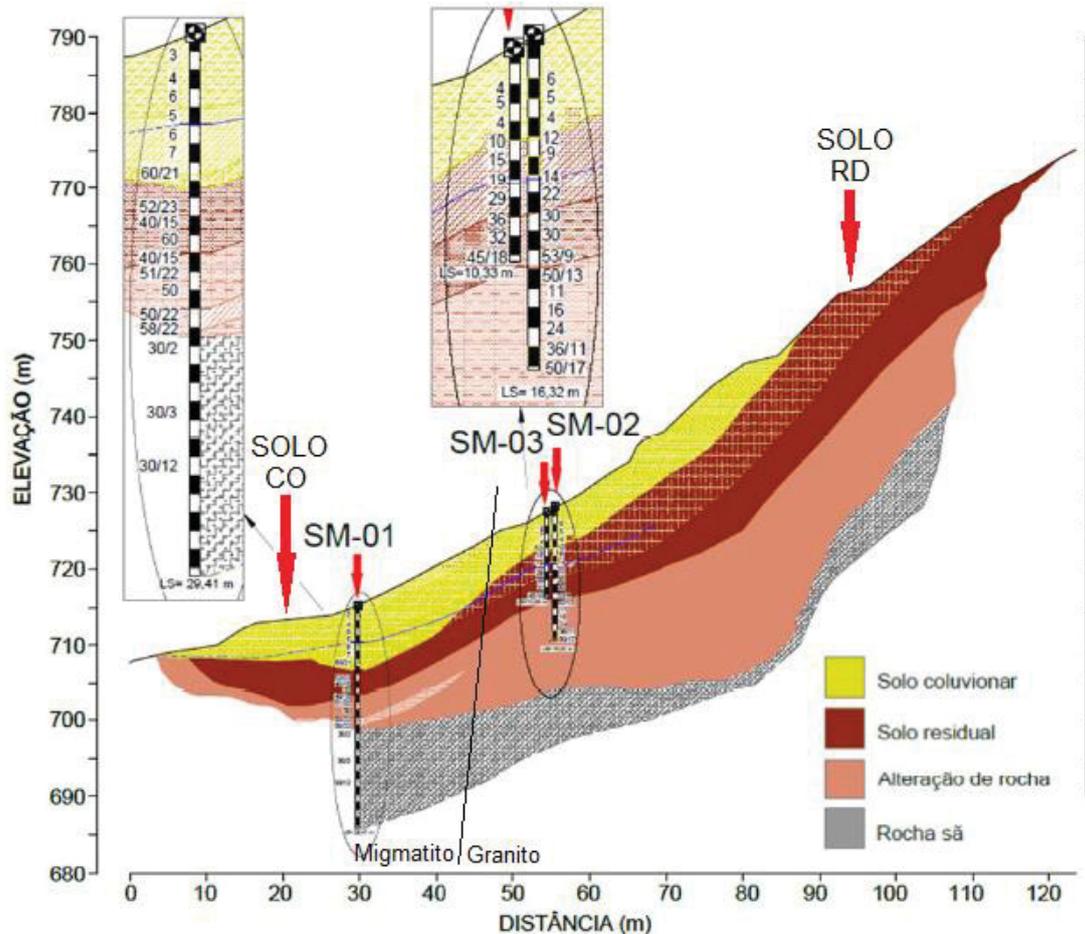
A área de interesse faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape e Litoral Sul, localizada na porção ao sul do estado de São Paulo. Caracterizada por um desenvolvimento aproximadamente paralelo à orla marítima, a bacia delimita-se a sudoeste com o estado do Paraná, ao norte com a Bacia Alto Paranapanema, Sorocaba e Médio Tietê, a nordeste com o

Alto Tietê e Baixada Santista e a leste com o Oceano Atlântico. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima nessa região enquadra-se principalmente no tipo Cfa (subtropical úmido com verão quente), que corresponde a 50% da bacia, 45% no tipo Cfb (subtropical úmido com verão fresco) e 5% no tipo Af (tropical úmido sem estação seca) (TREVIZOLLI, 2018).

O talude apresenta altura de aproximadamente 230 metros e inclinação de 45°. Esse talude foi escolhido para os ensaios geotécnicos de laboratório em virtude de ser uma região sujeita a ocorrências de fenômenos de movimentos de massa, apresentando, inclusive, evidências de processos de deslizamentos pretéritos, evidenciados a partir da presença de cicatrizes ao longo do mesmo. Durante as inspeções de campo observou-se a presença de material granítico intrusivo próximo à crista do talude e solo coluvionar nas cotas inferiores.

Trevizolli (2018) apresenta em seu trabalho os resultados de três sondagens rotativas mistas realizadas no local de estudo. As sondagens mostraram uma estratigrafia formada por uma camada de colúvio, composto por argila arenosa de baixa resistência a penetração e espessura variando de 4,0 m a 8,5 m na região do pé do talude. No topo do talude encontrou-se um solo residual composto por areia fina e com a presença de pequena quantidade de argila e mica. Subjacente ao solo residual encontrou-se uma camada de alteração de rocha (saprólito), caracterizada por um solo composto de areia média à grossa com silte e mica, e espessura de aproximadamente 5,0 m. Em maior profundidade (a partir de 16,5 m) atingiu-se a rocha sã de granito no topo do talude e rocha migmatítica no pé do talude. A FIGURA 24 apresenta a seção transversal esquemática do talude estudado, com a representação das sondagens realizadas e dos locais de coleta dos blocos indeformados de solo.

FIGURA 24 - PERFIL ESQUEMÁTICO DA SEÇÃO PRINCIPAL DO TALUDE



FONTE: Adaptado de Trevizolli (2018).

No local de estudo foram coletadas duas amostras indeformadas de solo, as quais foram ensaiadas em laboratório. No terço superior do talude foi coletada a amostra de solo RD representativa do solo residual, na elevação aproximada de 758 m. O solo CO é um colúvio, provavelmente oriundo de intemperismo e erosão do solo residual, e está localizado no sopé da encosta, na cota de 713 m. Buscou-se dessa maneira coletar duas amostras distintas que representassem as características geotécnicas do talude. A FIGURA 25 apresenta uma vista do talude com indicação dos locais de coleta das amostras.

FIGURA 25 - LOCAIS DE COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS

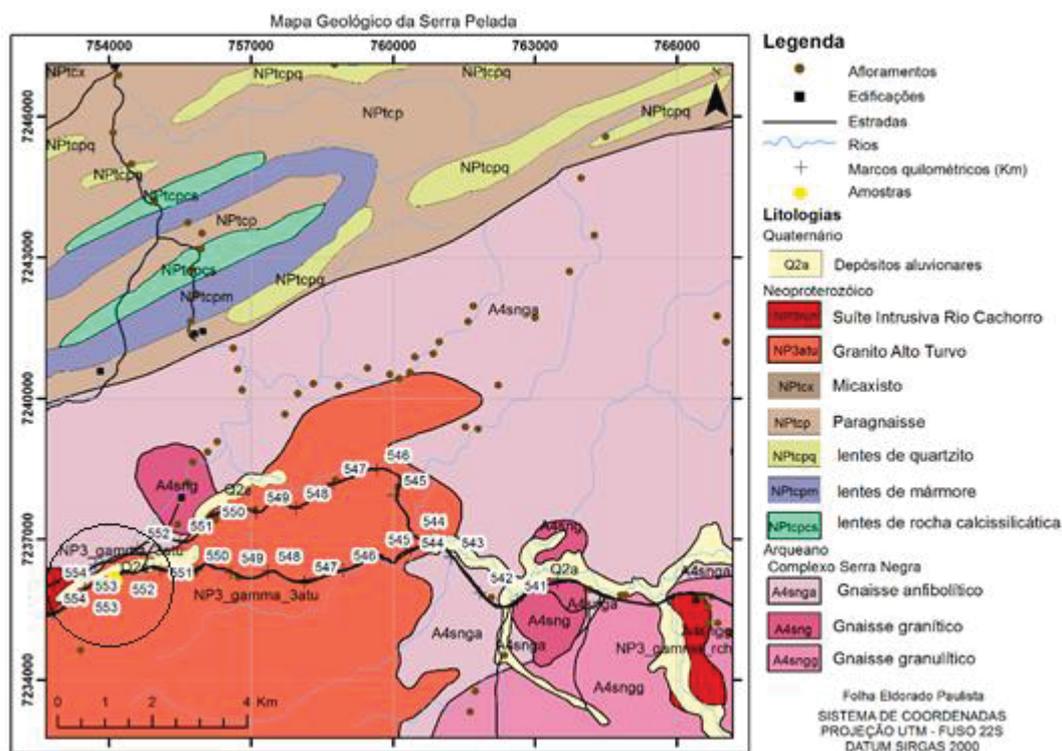


FONTE: A autora (2019).

3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A FIGURA 26 mostra o mapa geológico da área de estudos e arredores e indica o local de retirada das amostras indeformadas. De acordo com o mapeamento, a área de estudo está localizada sobre a formação Granito Alto Turvo. O Granito Alto Turvo ocorre praticamente em todo o trecho da rodovia que corta a Serra Pelada. Trata-se de uma rocha de granulometria fina a média e localmente grosseira, equigranular, de cor rósea a levemente amarronzada, com 5% a 15% de minerais máficos disseminados, dominados por biotita e hornblenda. Localmente, ocorrem porções com textura rapakivi. Como característica principal, o granito apresenta-se fraturado, mas sem exibir um padrão regular (PONTES, 2017).

FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE BLOCOS INDEFORMADOS NO MAPA GEOLÓGICO - SERRA PELADA



FONTE: Adaptado de Faleiros *et. al.* (2013).

3.3 COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

Os solos estudados foram amostrados na forma de blocos indeformados, com dimensões aproximadas de 30 x 30 x 30 cm, seguindo as recomendações da norma NBR 9604/1986.

Os locais de coleta dos blocos indeformados foram definidos em função de visitas a campo. A localização dos pontos de coleta e as respectivas coordenadas geográficas em UTM dos locais onde as amostras foram retiradas são apresentadas na TABELA 4.

TABELA 4 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE RETIRADA DOS BLOCOS INDEFORMADOS

Amostra	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Prof. (m)
CO	7236166	754108	713	0,90
RD	7236117	754138	758	1,30

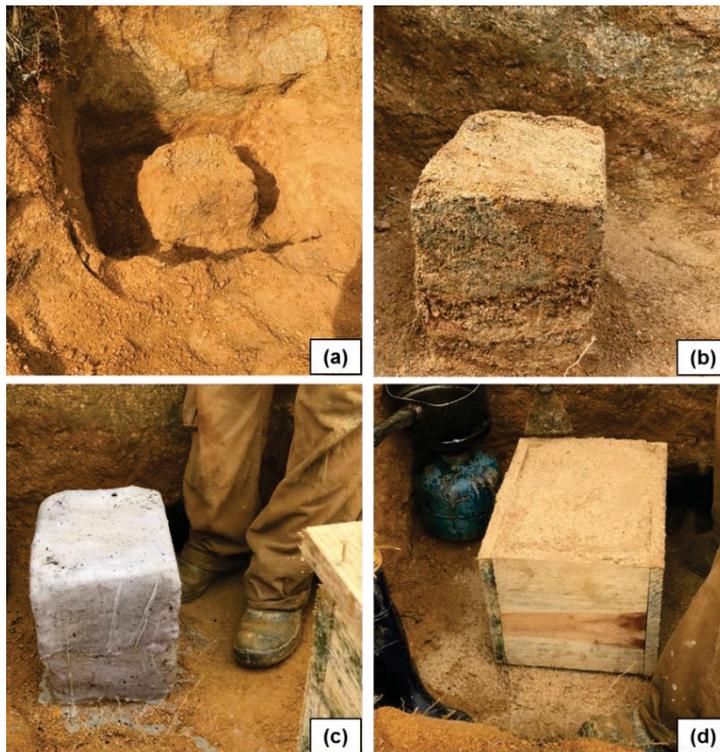
FONTE: A autora (2019).

Os procedimentos adotados para coleta das amostras indeformadas constaram de escavação manual até a cota desejada, obtendo-se um poço exploratório (FIGURAS 27a e 28a). Em seguida, os blocos foram moldados com uma faca afiada até atingirem o formato cúbico nas dimensões desejadas (FIGURAS 27b e 28b). Os blocos, depois de moldados, foram envolvidos em plástico filme de PVC, em um tecido de algodão, sendo em seguida parafinados até formar uma capa suficientemente rígida (FIGURAS 27c e 28c). Posteriormente, a base dos blocos foi seccionada com o auxílio de uma faca e os blocos foram acondicionados dentro de uma caixa de madeira contendo serragem, para minimizar perturbações durante o transporte (FIGURAS 27d e 28d).

Durante as coletas, observaram-se as características tátil-visuais das amostras. A amostra RD é formada principalmente por material arenoso medianamente compacto, com pouca matéria orgânica em sua cobertura e com a presença de veias de quartzo transversais ao bloco, fato condizente com um material de origem residual.

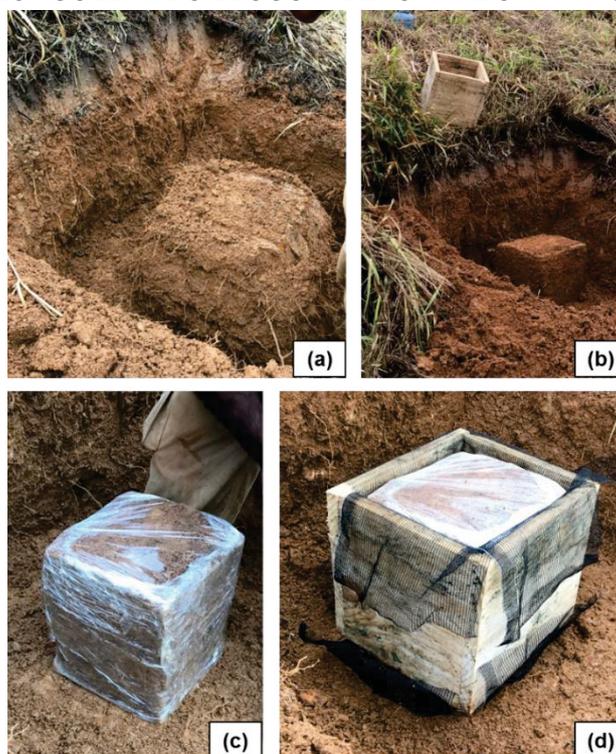
Com relação às características observadas durante a coleta da amostra CO, retirada próximo ao pé do talude, observou-se um material heterogêneo, não consolidado, com considerável percentual de matéria orgânica e alto grau de saturação.

FIGURA 27 - COLETA DO BLOCO INDEFORMADO DA AMOSTRA RD



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 28 - COLETA DO BLOCO INDEFORMADO DA AMOSTRA CO



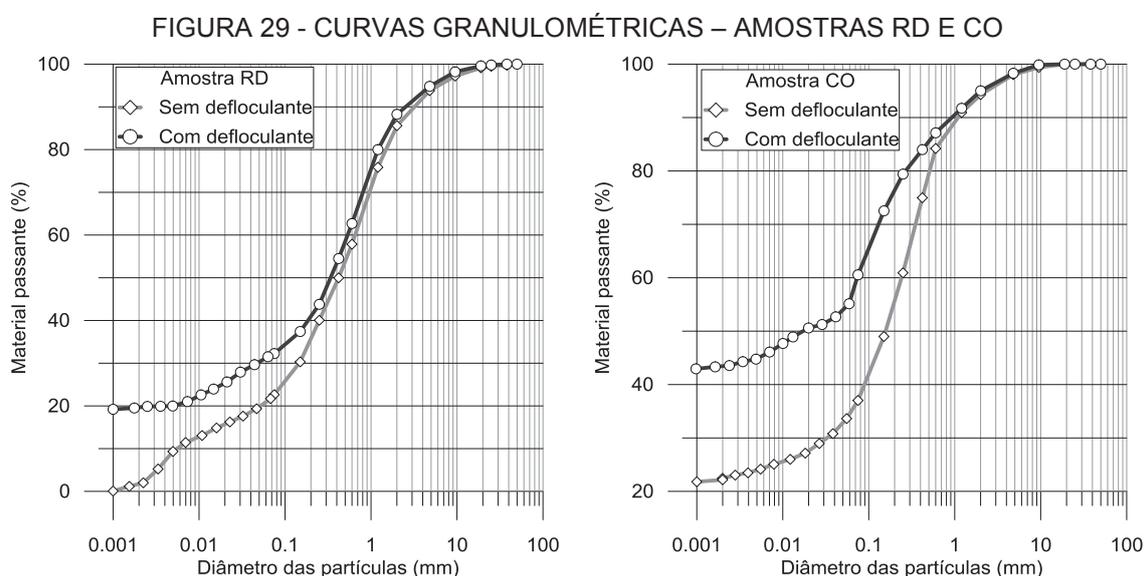
FONTE: A autora (2019).

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física dos solos amostrados foi realizada em amostras deformadas obtidas durante o processo de coleta dos blocos indeformados. As amostras obtidas foram preparadas para os ensaios seguindo as recomendações da NBR 6457/2016 e com secagem prévia em estufa a 40 °C.

A caracterização física dos solos RD e CO compreendeu ensaios de peso específico dos grãos (DNER-ME 093/1994), limites de liquidez (NBR 6459/2016) e plasticidade (NBR 7180/2016) e análise granulométrica (NBR 7181/2016).

Os ensaios para determinação das curvas granulométricas foram realizados com e sem o uso de agente defloculante (hexametáfosfato de sódio) durante a fase de sedimentação. A análise granulométrica sem a adição de agente defloculante foi realizada para melhor expressar as condições de campo e verificar eventuais anomalias na estrutura do solo. A FIGURA 29 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de granulometria nas amostras RD e CO, respectivamente.



FONTE: A autora (2019).

As curvas de distribuição granulométrica indicam que os solos estudados exibem uma diferença significativa de granulometria em função do uso ou não de agente defloculante, isto porque neste último as partículas

agrupadas sedimentam mais rapidamente, indicando diâmetros maiores, que não são das partículas propriamente ditas, mas sim das agregações existentes dos elementos do solo de granulometria fina. Esses resultados sugerem que ambos os solos, em seu estado natural, são compostos por partículas de argila agregadas de tal maneira que se assemelham em tamanho às de areia ou de silte. Esta constatação interfere diretamente na classificação dos solos.

Na TABELA 5 é apresentado um resumo geral dos resultados dos ensaios de caracterização física. A amostra RD apresentou comportamento não plástico e massa específica dos grãos de $2,58 \text{ g/cm}^3$. A amostra CO apresentou limite de liquidez de 29% e limite de plasticidade de 23%, o que resulta em um índice de plasticidade igual a 6, e massa específica dos grãos de $2,65 \text{ g/cm}^3$.

TABELA 5 - RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Propriedades	Amostra RD		Amostra CO		
	Agente Defloculante	Água	Agente defloculante	Água	
Granulometria	Pedregulho ($2\text{mm} < \phi \leq 60\text{mm}$)	11,0	14,0	5,3	5,5
	Areia ($0,06\text{mm} < \phi \leq 2\text{mm}$)	57,5	65,0	39,7	60,3
	Silte ($0,002\text{mm} < \phi \leq 0,06\text{mm}$)	12,0	19,5	11,6	11,7
	Argila ($\phi \leq 0,002\text{mm}$)	19,5	1,5	43,4	22,5
	Classificação				
Peso específico dos grãos (g/cm^3)		2,58		2,65	
Plasticidade	Limite de Liquidez (LL)	30		29	
	Limite de Plasticidade (LP)	NP		23	
	Índice de Plasticidade (IP)	-		6	

FONTE: A autora (2019).

3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Neste item são descritos a forma de preparação e moldagem dos corpos de prova indeformados e remoldados, os quais foram utilizados nos ensaios de curva característica e resistência ao cisalhamento. Os corpos de

prova da amostra RD foram moldados nas condições indeformada (I) e remoldada (R), enquanto os corpos de prova da amostra CO foram moldados apenas para a condição indeformada (I). Durante a moldagem foram coletadas informações para determinação dos índices físicos iniciais das amostras. A TABELA 6 apresenta um resumo das propriedades iniciais das amostras ensaiadas.

TABELA 6 - ÍNDICES FÍSICOS INICIAIS MÉDIOS

Amostra	Teor de umidade natural (%)	Grau de saturação inicial (%)	Massa específica natural (g/cm ³)	Massa específica dos grãos (g/cm ³)	Índice de vazios
RD (I)	18,6	50,6	1,57	2,58	0,95
RD (R)	19,2	51,0	1,56	2,58	0,97
CO (I)	31,4	74,1	1,64	2,65	1,12

FONTE: A autora (2019).

3.5.1 Corpos de prova indeformados

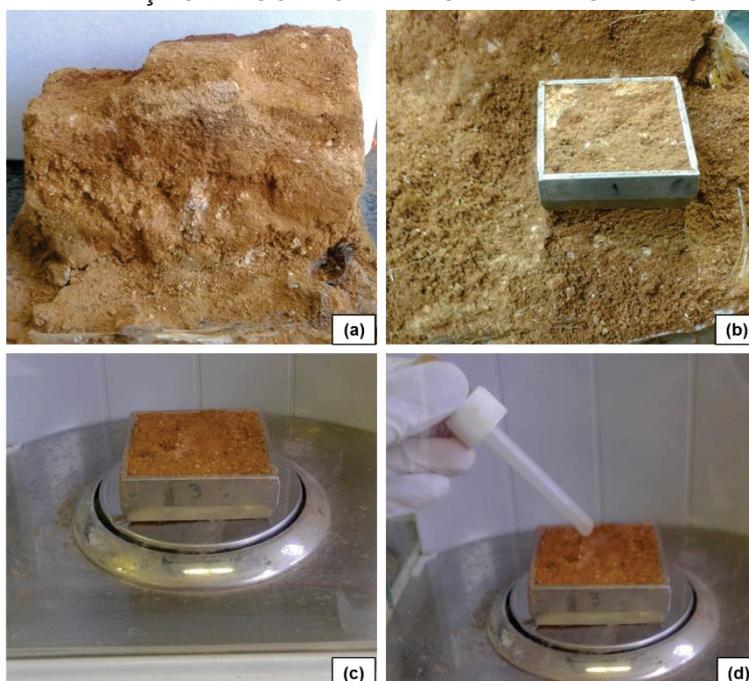
Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em corpos de prova com dimensões de 50 mm de lado e 20 mm de altura. Para os ensaios de sucção mátrica foram moldados corpos de prova em anéis circulares de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

Os corpos de prova indeformados foram moldados diretamente dos blocos amostrados em campo (FIGURA 30a) a partir da inserção de anéis metálicos biselados, tomando-se o cuidado para minimizar o amolgamento do solo.

No início da moldagem, o anel metálico foi posicionado sobre o bloco, com a borda biselada em contato com o solo (FIGURA 30b). O solo em volta do anel foi removido como auxílio de uma faca pelo processo de talhagem e o anel foi inserido até o preenchimento completo do anel com solo, reduzindo o efeito do amolgamento. Após o corpo de prova separado do bloco, o mesmo foi “rasado” no topo e na base, utilizando-se as sobras de material para determinar sua umidade, e pesado para a determinação da massa específica natural (FIGURA 30c).

Ao final do processo de moldagem, todos os corpos de prova foram deixados em estufa a 40°C por 72 horas ou até a constância da massa. Após este período, os mesmos receberam água com o auxílio de um conta-gotas (FIGURA 30d) até atingir a umidade de interesse e foram deixados em repouso para possibilitar o equilíbrio na distribuição da umidade interna. Este procedimento foi adotado para estabelecer um padrão para todas as amostras, de modo que todo o processo seguisse a trajetória de umedecimento da curva característica. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), é importante que todas as amostras tenham as mesmas características iniciais.

FIGURA 30 - PREPARAÇÃO DE CORPO DE PROVA INDEFORMADO – AMOSTRA RD



FONTE: A autora (2019).

3.5.2 Corpos de prova remoldados

Na confecção dos corpos de prova remoldados, utilizou-se o solo que havia sobrado do processo de moldagem das amostras indeformadas. O material foi preparado a partir de solo previamente seco e destorroadado, passando na peneira 4,8 mm, tendo-se adicionado água destilada na quantidade necessária para se formar uma pasta com teor de umidade próximo ao natural.

As amostras foram remoldadas de acordo com as propriedades do solo *in situ* (umidade e índice de vazios). No cálculo foram considerados os valores médios de teor de umidade e índice de vazios dos corpos de prova indeformados ensaiados na condição natural, para que o corpo de prova tivesse características iniciais próximas das apresentadas pela amostra indeformada. Para isto calculou-se a quantidade de material necessária a ser colocada no molde (FIGURA 31a), sendo cada uma das três camadas apiloada até atingir a altura desejada (FIGURA 31b). Para verificar se os corpos de prova estavam nas condições especificadas, avaliou-se a densidade úmida das amostras e o teor d umidade no momento da moldagem. Em seguida, o corpo de prova foi retirado do molde (FIGURA 31c) e a partir dele foram moldados os corpos de prova nos anéis biselados. Após esse processo, seguiu-se o mesmo procedimento de secagem e umedecimento dos corpos de prova indeformados.

FIGURA 31 - REMOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: A autora (2019).

3.6 MÉTODO DO PAPEL FILTRO

A determinação da curva característica é fundamental para a previsão do comportamento de um solo não saturado e fornece informações importantes para análises de problemas relacionados à resistência ao cisalhamento nesses solos. Nessa dissertação as curvas características do solo residual RD foram determinadas para as condições indeformada e remoldada, enquanto a curva característica do solo coluvionar CO foi definida apenas para a condição

indeformada. As amostras utilizadas nos ensaios foram moldadas segundo a descrição do item 3.5.

As curvas foram determinadas a partir da técnica do papel filtro, que consiste em colocar um pedaço de papel filtro com área superior a 1 cm^2 em contato direto com uma amostra de solo até que seja estabelecido o equilíbrio de sucção mátrica entre a amostra e o papel.

A sucção mátrica de equilíbrio é estimada a partir da curva de calibração do papel filtro. Nesta pesquisa foi utilizado o papel filtro Whatman n°42 e as equações de calibração adotadas foram as propostas por Chandler *et al.* (1992). De acordo com Marinho (1997), o papel Whatman n°42 tem capacidade de absorção de umidade da ordem de 6% a 175%, o que corresponde a sucções entre 3 kPa e 29000 kPa.

A curva característica é influenciada pelo teor de umidade inicial da amostra. Dessa forma, optou-se por iniciar as curvas características no teor de umidade higroscópica e a partir desta umedecê-las até a umidade desejada. Este procedimento visou reproduzir o ciclo de umedecimento e manter um padrão entre todas as amostras ensaiadas, inclusive para aquelas submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, e evitar o efeito da histerese da curva característica.

Os corpos de prova foram moldados em anéis circulares, com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. O teor de umidade inicial foi obtido com o excesso de solo das moldagens e determinaram-se os índices físicos iniciais (peso específico natural, umidade e índice de vazios). Esses parâmetros foram importantes para determinar a quantidade de água a ser adicionada a cada amostra. A execução do ensaio seguiu as recomendações descritas por Feuerharmel (2003) e a sucção mátrica medida foi a mátrica.

Para a trajetória de umedecimento, os corpos de prova foram secos em estufa a 40°C (FIGURA 32a) e depois umedecidos em diferentes teores de umidade com o auxílio de conta-gotas e balança com precisão de 0,0001g (FIGURA 32b). Após o umedecimento, esperou-se aproximadamente 1 hora para o fechamento da amostra para garantir que a água penetrasse na amostra. Antes do fechamento, as amostras eram novamente pesadas para verificar se não houve perda de umidade para o ambiente.

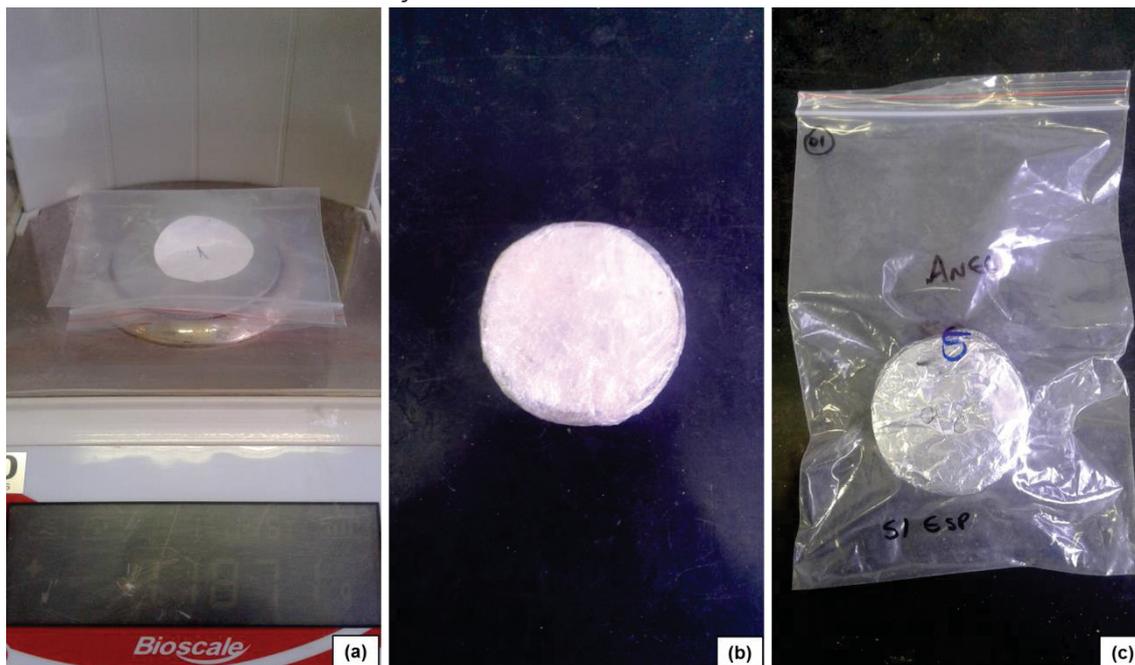
FIGURA 32 - CORREÇÃO DA UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: A autora (2019).

Dois pedaços de papel filtro, com área equivalente ao corpo de prova, foram retirados da caixa com o auxílio de uma pinça plástica. Cada papel foi colocado em uma cápsula e levado a estufa de 105°C por 24 horas. Após esse período de secagem, o papel filtro foi colocado em um recipiente vedado e pesado na balança de precisão de 0,0001g para a obtenção do peso seco (FIGURA 33a). Colocaram-se, então, os dois pedaços de papel filtro, um no topo e outro na base do corpo de prova. Em seguida, o conjunto amostra e papel filtro foram protegidos por filme plástico de PVC, papel alumínio e pacote zipado (FIGURAS 33b e 33c). As amostras protegidas foram mantidas em ambiente isolado com temperatura de 20°C (variação máxima de 3°C) até a obtenção do tempo de equalização. Para medir a sucção mátrica, o tempo para o equilíbrio é de 7 a 30 dias, dependendo do nível de sucção mátrica pretendido. Na oportunidade dos ensaios o tempo mínimo de equalização foi de 15 dias, tendo sido obtidos bons resultados.

FIGURA 33 - PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA COM O PAPEL FILTRO



FONTE: A autora (2019).

Depois de alcançado o tempo de equalização, os papéis filtro foram removidos rapidamente e colocados em um recipiente vedado, dentro de 3 a 5 segundos, e pesados na balança com precisão de 0,0001g para obtenção do peso úmido. Com os dados obtidos foi possível calcular o teor de umidade do papel filtro.

Com o teor de umidade do papel filtro e a correspondente equação de calibração pôde-se obter a sucção mátrica do papel filtro, considerada igual para a amostra. Esse valor de sucção mátrica e o teor de umidade (ou grau de saturação) correspondem a um ponto da curva característica.

Durante a determinação da umidade do papel filtro, alguns cuidados são fundamentais para garantir a qualidade dos resultados, sendo eles: retirar o papel filtro da amostra com cuidado sem que ocorra perda significativa de umidade e retirar o papel filtro da estufa sem que ocorra ganho de umidade. Para tal, o papel filtro deve ser colocado em recipiente fechado e o procedimento deve ser realizado com o menor intervalo de tempo possível. A temperatura do local em que o ensaio é realizado também deve ser controlada para que não haja evaporação e condensação, o que poderia interferir no processo de transferência entre os materiais porosos. Recomenda-se que a

temperatura seja constante em torno dos 20°C, com uma variação máxima de 3°C.

3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A técnica de MEV permite a visualização da microestrutura do solo, pois o equipamento é capaz de produzir imagens de alta ampliação e alta resolução. A MEV tem como grande vantagem a observação direta de bordas ou contornos de grãos e a caracterização da porosidade inter e intragranular.

O princípio de funcionamento do MEV consiste na incidência de um feixe de elétrons de alta energia na superfície da amostra, onde ocorre uma interação e parte do feixe é refletido e coletado pelo detector. As imagens são normalmente obtidas por elétrons secundários que provêm de interações inelásticas entre os elétrons e fornecem maior resolução com impressão tridimensional e fácil interpretação.

A técnica de preparação do corpo de prova utilizado consiste em cortar uma amostra medindo aproximadamente 25 mm de diâmetro por 25 a 30 mm de altura. Para a realização do ensaio, as amostras foram colocadas na estufa a 40°C por um período de 72 horas, tempo suficiente para secar o solo com temperatura que não compromettesse as características dos argilominerais presentes nas amostras.

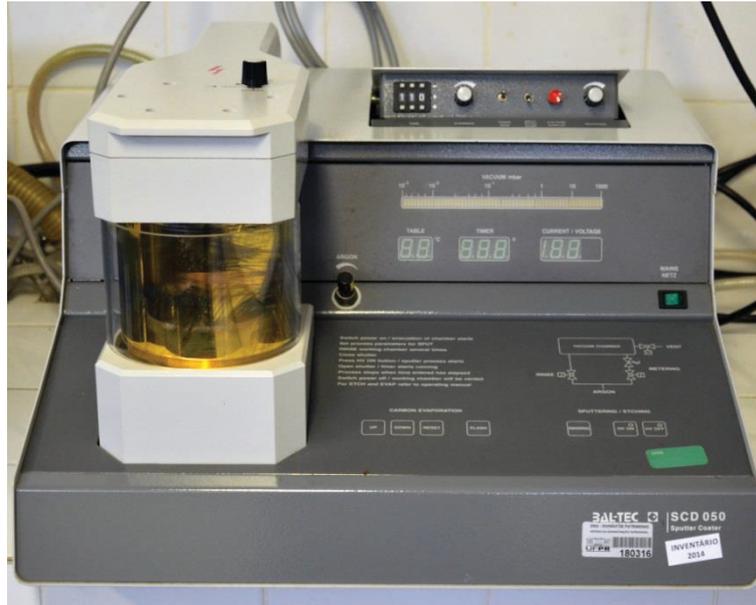
As amostras foram então coladas sobre um pino cilíndrico (FIGURA 34) e levadas para uma evacuadora (FIGURA 35) para metalização da superfície com ouro, a fim de dar uma boa condutividade.

FIGURA 34 - AMOSTRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE MEV



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 35 – EQUIPAMENTO PARA METALIZAÇÃO DE AMOSTRAS



FONTE: A autora (2019).

Finalmente, as amostras puderam ser colocadas dentro da câmara de vácuo do equipamento para iniciar a observação na câmara de MEV. O equipamento utilizado para ensaio foi o microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo da marca JEOL, modelo JSM 6360-LV, do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná, que está mostrado na FIGURA 36.

FIGURA 36 - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA



FONTE: A autora (2019).

3.8 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O cisalhamento direto é considerado um dos ensaios pioneiros no estudo das propriedades de resistência da mecânica dos solos. Ele permite uma avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos em um único plano de ruptura imposto mecanicamente à amostra, apresentando vantagens como simplicidade, rapidez de execução e versatilidade. Os ensaios deste trabalho foram realizados em um equipamento de cisalhamento direto tipo deformação controlada, da marca *Pavitest*, como apresentado na FIGURA 37, pertencente ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Paraná.

FIGURA 37 – EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO



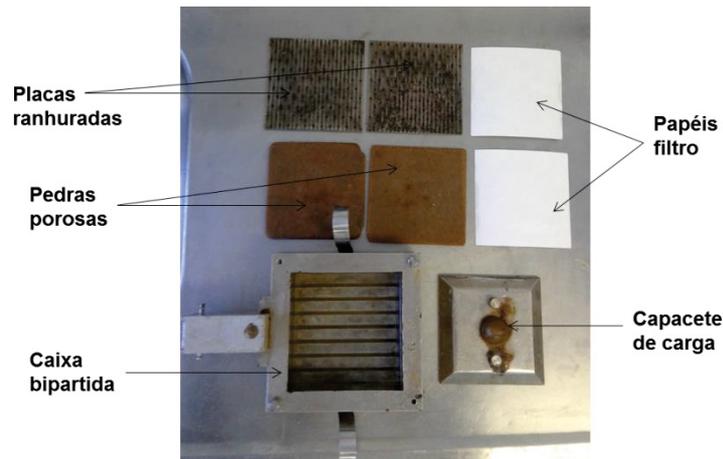
FONTE: A autora (2019).

Foram executados ensaios de cisalhamento direto em três níveis de tensão normal: 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Os procedimentos respeitaram as recomendações da norma britânica BS 1377-8/1990, exceto no quesito da não inundação dos corpos de prova nos ensaios não saturados. Os ensaios não saturados foram realizados nos seguintes graus de saturação: 1%, 20%, 35%, 50%, 65%. Para o solo CO não foram realizados ensaios nos graus de saturação de 20 e 35%.

Após a moldagem, o material foi transferido para a caixa bipartida do equipamento de cisalhamento. De acordo com os procedimentos normatizados, dentro da caixa bipartida também são colocadas placas ranhuradas, pedras porosas e papéis filtro, como apresentado nas FIGURAS 38 e 39. As ranhuras

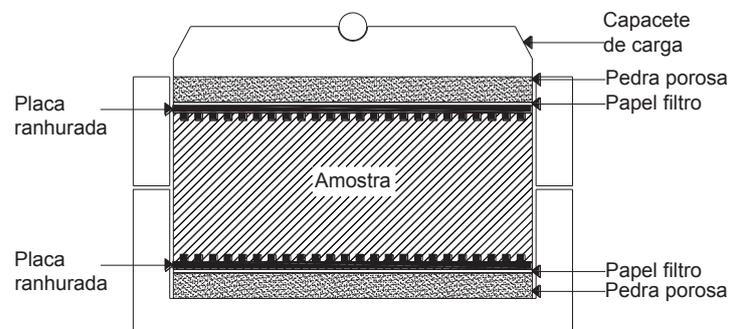
foram posicionadas de modo a ficarem perpendiculares à direção de deslocamento da amostra. As pedras porosas são colocadas entre a amostra para facilitar a drenagem da água dos vazios do solo, os papéis filtro são utilizados para evitar a colmatação das pedras porosas e o capacete serve para distribuir a carga aplicada.

FIGURA 38 - COMPONENTES DA CÉLULA DE CISALHAMENTO



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 39 - ESQUEMA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL



FONTE: A autora (2019).

Após a montagem da célula de cisalhamento, a mesma foi inserida no equipamento e o pórtilo para aplicação da carga foi posicionado com o medidor de deslocamento vertical ajustado e zerado. Em seguida, a célula de cisalhamento foi inundada, enchendo-se o carrinho do equipamento com água destilada. Para os ensaios de cisalhamento direto em amostras não saturadas, as amostras foram ensaiadas sem inundação, partindo-se diretamente para a fase de adensamento. Nesses casos, a caixa de cisalhamento foi protegida

com tecido de algodão e saco plástico para minimizar a perda de umidade do solo.

A fase de inundação, realizada apenas para os ensaios na condição inundada, teve duração de aproximadamente 24 horas. Como limitações do ensaio, ressalta-se que não foi possível garantir previamente a saturação das amostras, mas, ao final do ensaio, parte do material foi coletada para determinação do teor de umidade final. Foram consideradas saturadas as amostras que apresentaram grau de saturação superior a 95%.

A fase de adensamento consistiu em aplicar a tensão vertical de ensaio, monitorando-se as variações volumétricas no corpo de prova até completa estabilização. Essa tensão vertical foi imposta a partir de pesos colocados em um pórtico metálico sobre um capacete localizado no topo da amostra. A tensão normal foi dada pela razão entre a somatória da carga e a área da seção transversal da amostra. Imediatamente após a aplicação da carga, efetuaram-se leituras do adensamento até um período de 24 horas ou até estabilizarem-se as deformações verticais.

Após a fase de adensamento, iniciou-se a etapa de cisalhamento. Nesta, impôs-se uma velocidade constante de deslocamento na parte inferior da caixa. Esse deslocamento provoca o aparecimento de uma força tangencial na parte superior da caixa, mantida imóvel durante o ensaio.

A velocidade de deslocamento horizontal utilizada na fase de cisalhamento das amostras foi calculada com base na curva de variação do índice de vazios com a maior tensão efetiva para a amostra em questão. A velocidade depende do coeficiente de adensamento (C_v), que reflete características do solo como permeabilidade e compressibilidade.

A determinação da velocidade dos ensaios de cisalhamento direto pode ser obtida a partir do Método de Taylor (raiz quadrada do tempo), utilizado para a determinação do coeficiente de adensamento. A partir deste método, obtém-se t_{100} , que corresponde ao tempo necessário para que a amostra atinja uma deformação correspondente ao final do adensamento primário. Gibson e Henkel (1954, *apud* HEAD, 1994), propuseram que o tempo estimado para a ruptura (t_f) no ensaio de cisalhamento lento pode ser determinado pela equação (16). A partir deste parâmetro, a velocidade de

ruptura (v_f) pode ser calculada como a razão entre o deslocamento até a ruptura (d_f) e o tempo estimado para a ruptura (t_f), conforme apresentado na equação (17).

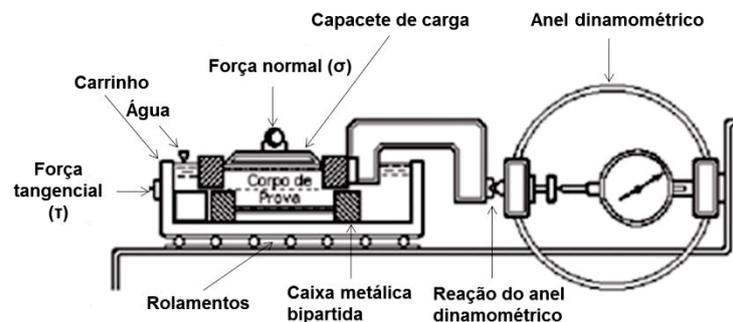
$$t_f = 12,7t_{100} \quad (16)$$

$$v_f = \frac{d_f}{t_f} \quad (17)$$

Salienta-se que o ensaio de cisalhamento direto deve ser realizado sob condições drenadas, ou seja, impedindo o estabelecimento de pressões neutras nos poros da amostra. Nas areias, devido à alta permeabilidade característica, isto ocorre instantaneamente, mas, em solos argilosos, é necessário reduzir a velocidade de execução. O procedimento consistiu na imposição de um deslocamento horizontal em uma das partes da caixa em relação à outra (com velocidade constante de 0,10 mm/min) e medir a força de cisalhamento no plano de ruptura imposto e os deslocamentos horizontal e vertical da amostra.

A força tangencial foi medida utilizando-se um anel dinamométrico, devidamente calibrado, que permitiu a medição da carga aplicada. Os deslocamentos verticais e horizontais foram medidos a partir de relógios comparadores devidamente posicionados. A FIGURA 40 apresenta os detalhes do equipamento.

FIGURA 40 - DETALHE DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO



FONTE: A autora (2019).

Durante a fase de cisalhamento medem-se a força horizontal, o deslocamento horizontal, a variação de altura do corpo de prova e o tempo

decorrido a intervalos regulares de deslocamento horizontal de maneira que sejam obtidos, no mínimo, 20 intervalos de leitura até a carga máxima.

O cisalhamento se encerra após atingir-se o pico de força de cisalhamento ou até atingir-se o deslocamento máximo, que corresponde de 10 a 20% do lado da amostra. Cada corpo de prova foi cisalhado até um deslocamento horizontal máximo de aproximadamente 5 mm (FIGURA 41), totalizando um tempo mínimo de 50 minutos de duração para cada ensaio realizado. Todos os corpos de prova foram cisalhados em um único estágio.

FIGURA 41 - DESLOCAMENTO HORIZONTAL DA AMOSTRA AO FINAL DO ENSAIO



FONTE: A autora (2019).

Ao final de cada ensaio, a umidade final da amostra foi determinada de modo a calcular o grau de saturação final do solo. Verificou-se que a perda de umidade do solo ao longo dos ensaios foi ínfima, correspondendo a variações inferiores a 1%. Nos casos em que foram verificadas perdas de umidade significativas, os ensaios foram refeitos de modo a manter a qualidade dos resultados.

Finalizada a campanha de ensaios, foi possível determinar, a partir dos dados obtidos, a envoltória de resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, os parâmetros de resistência dos solos. Para o cálculo da tensão normal e da tensão de cisalhamento, optou-se pela não correção da área efetiva do corpo de prova, tendo em vista que não ocorreram variações significativas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos quando a tensão normal e a tensão cisalhante eram corrigidas conjuntamente. A provável sucção mátrica das amostras foi estimada a partir da curva característica de retenção.

O ensaio de cisalhamento direto convencional em amostras de solo não saturado, apesar de limitado por não permitir o controle da sucção mátrica durante a realização do ensaio, apresenta resultados satisfatórios, em conjunto a curva característica, para se determinar o acréscimo de resistência ao cisalhamento devido à sucção.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos ao longo das campanhas de ensaios. Inicialmente são apresentadas as curvas características dos solos RD (para as condições indeformada e remoldada) e CO (para a condição indeformada). Na sequência apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.

Este capítulo também se destina a uma discussão comparativa acerca dos resultados. A discussão desses resultados visa expor a importância dos mesmos ao entendimento do comportamento dos materiais estudados.

A fim de verificar a adequabilidade dos métodos propostos por Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006) para previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, foram realizadas análises utilizando os dados experimentais.

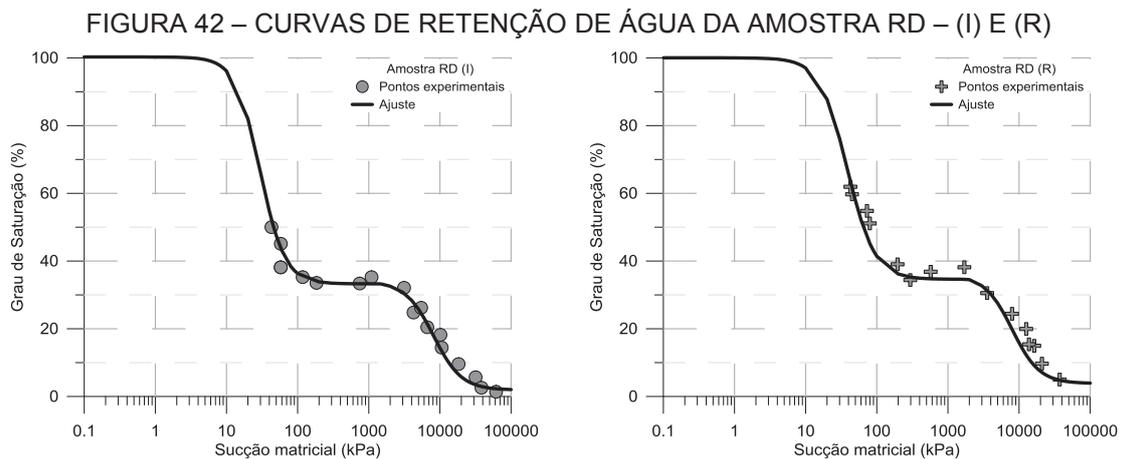
4.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO

A determinação da curva característica é fundamental para o entendimento do comportamento do solo não saturado, pois expressa a variação da quantidade de água dentro dos poros do solo quando o mesmo é submetido a diferentes valores de sucção mátrica, em trajetórias de umedecimento e/ou secagem. A quantidade de água contida dentro dos poros do solo é definida pela umidade (gravimétrica ou volumétrica) ou pode, também, ser representada pelo grau de saturação. As curvas características dos materiais estudados neste trabalho foram expressas em termos da sucção mátrica *versus* grau de saturação.

Os dados experimentais obtidos para os solos RD e CO, a partir da técnica do papel filtro, permitiram a definição das curvas características de retenção de umidade dos referidos materiais. Um ponto teórico, com sucção mátrica igual a 0 kPa e grau de saturação igual a 100%, foi adicionado a todas as curvas para facilitar o ajuste matemático dos dados.

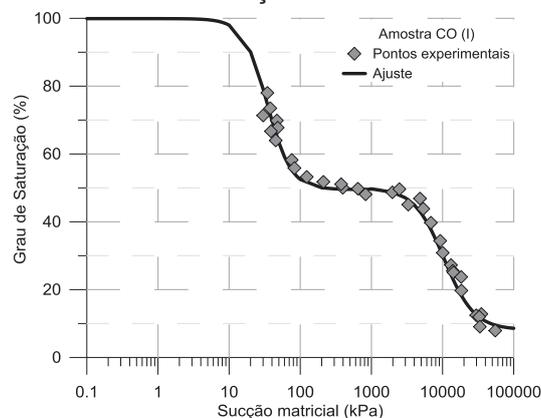
A partir dos pontos experimentais, observou-se que essas curvas não apresentaram formato unimodal, como normalmente ocorre, e sim formato bimodal, ao qual os modelos de Van Genuchten (1980) e de Fredlund e Xing

(1994) não se adequam. Desse modo, a equação de Gitirana e Fredlund (2004) foi utilizada para ajustar as curvas de retenção desses solos para um intervalo de sucção mátrica de 0 a 100000 kPa. As FIGURAS 42 e 43 apresentam as curvas de retenção representativas dos solos RD e CO em conjunto aos pontos experimentais.



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 43 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DA AMOSTRA CO (L)



FONTE: A autora (2019).

Feuerharmel *et al.* (2007) apontam que as curvas unimodais podem não representar o comportamento de muitos solos de origem residual ou sedimentar encontrados em regiões de clima tropical e subtropical. Segundo a autora, isto se dá porque esses solos frequentemente apresentam macroestrutura e microestrutura bem definidas, sendo compostos por partículas de argila agregadas de tal forma que se assemelham, em tamanho, a grãos de silte ou areia. A forma da curva característica desses materiais

sugere uma distribuição bimodal de tamanho de poros: macroporos entre os agregados de argila, e microporos no interior destes.

A curva de retenção permite determinar os teores de umidade residuais e as pressões de entrada de ar. O formato das curvas indica três trechos distintos. Inicialmente o solo apresenta um primeiro ponto de entrada de ar (1º VEA), que corresponde ao início da dessaturação dos macroporos, e um valor de umidade residual dos macroporos (1º VUR). Depois se observa um patamar onde o grau de saturação praticamente não varia. Por último, a curva apresenta um segundo valor de entrada de ar (2º VEA), correspondente a dessaturação dos microporos, e um valor de umidade residual dos microporos (2º VUR), a partir do qual a remoção de água requer o fluxo de vapor. A TABELA 7 apresenta os valores de entrada de ar e de umidade residual estimados graficamente.

TABELA 7 - VALORES DE ENTRADA DE AR E DE UMIDADE RESIDUAL

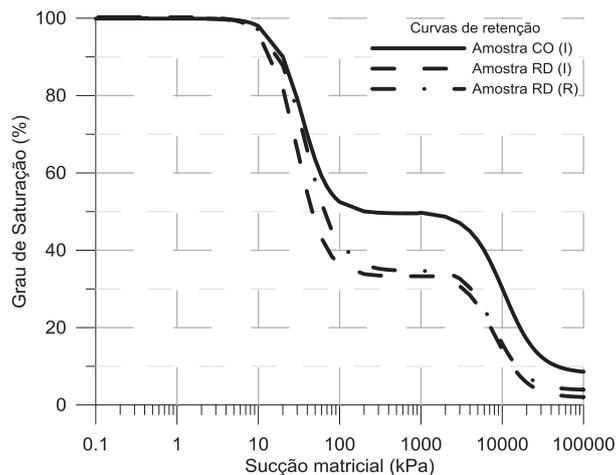
Amostra	1º VEA (kPa)	1º VUR (kPa)	2º VEA (kPa)	2º VUR (kPa)
RD (I)	13	65	3100	18000
RD (R)	15,5	97	3500	18500
CO (I)	14	80	4100	24000

FONTE: A autora (2019).

A curva característica descreve a capacidade de armazenamento de água do solo quando o mesmo está submetido a diferentes valores de sucção mátrica. Quanto mais para baixo está localizada a curva característica, menor é a capacidade de retenção do solo para uma dada sucção mátrica. A FIGURA 44 apresenta um comparativo entre as curvas obtidas para os solos RD e CO.

Para as duas condições de moldagem do solo RD, os dados experimentais apresentaram em geral pequena dispersão e as curvas apresentaram-se de forma quase paralela.

FIGURA 44 – COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO



FONTE: A autora (2019).

As curvas características, tanto do solo RD, quanto do solo CO, exibiram formato bimodal (duplo “S”), caracterizando a existência de dois valores de entrada de ar e um patamar intermediário. Entre os dois valores de entrada de ar ocorre uma variação muito pequena na quantidade de água no solo, uma vez que o grau de saturação permanece aproximadamente constante com o aumento da sucção mátrica. Este patamar quase horizontal está relacionado provavelmente à ausência de poros com tamanho intermediário nesses solos, como foi confirmado a partir dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

É importante notar que esse comportamento de dessaturação da amostra RD ocorre para as duas condições de moldagem, ou seja, o processo de remoldagem adotado não foi capaz de destruir totalmente os agregados de partículas de argila. Desta forma, quando o solo é desagregado e remoldado, apenas uma parcela da estrutura natural é destruída, causando uma pequena elevação nos valores de entrada de ar e o formato da curva resultante permanece bimodal, como no caso do solo indeformado.

Quando comparado o comportamento do solo RD indeformado e remoldado, como mostrado na FIGURA 42, percebe-se que a degradação do solo durante a remoldagem aumenta os níveis de sucção mátrica mobilizados. Assim, sob mesma condição de umidade, o solo remoldado desenvolve níveis de sucção mátrica maiores que o solo indeformado. O primeiro valor de entrada de ar do solo RD aumentou de 13 kPa (condição indeformada) para 15,5 kPa

(condição remoldada). O segundo valor de entrada de ar aumentou de 3100 kPa (condição indeformada) para 3500 kPa (condição remoldada).

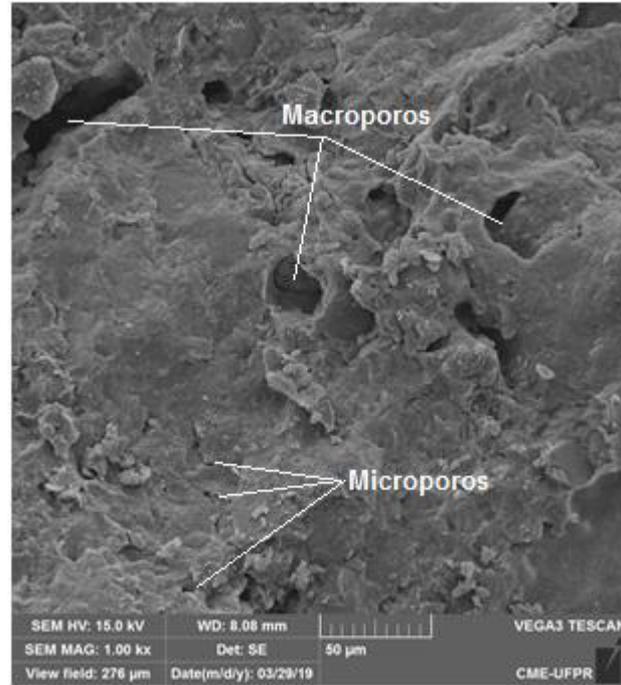
Com relação às taxas de dessaturação verifica-se que, para baixas sucções, o solo que dessatura mais rapidamente é o solo RD na condição indeformada, seguido pelo solo RD na condição remoldada. Por último está o solo CO na condição indeformada, apresentando maior capacidade de armazenamento.

Para altas sucções, as taxas de dessaturação do solo RD nas duas condições de moldagem são semelhantes, indicando que o processo de moldagem parece exercer maior influência sobre a macroestrutura desse material do que sobre a microestrutura. Adicionalmente, essa convergência indica que a composição mineralógica do solo RD não foi alterada pelo processo de remoldagem. Já a curva característica do solo CO se apresenta um pouco mais deslocada para a direita, ou seja, possui maior capacidade de retenção para um determinado valor de grau de saturação.

4.2 ENSAIOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

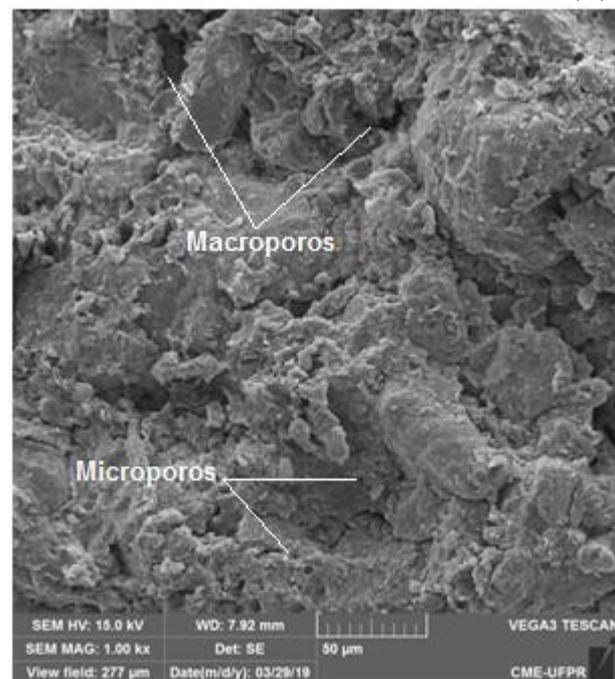
O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) objetiva caracterizar o solo do ponto de vista microestrutural e confirmar as informações obtidas pelas demais ferramentas de análise empregadas. Nas FIGURAS 45 a 47 são apresentadas as imagens referentes ao solo RD, nas condições indeformada e remoldada, e ao solo CO na condição indeformada, respectivamente.

FIGURA 45 - IMAGEM MEV - AMOSTRA RD (I)



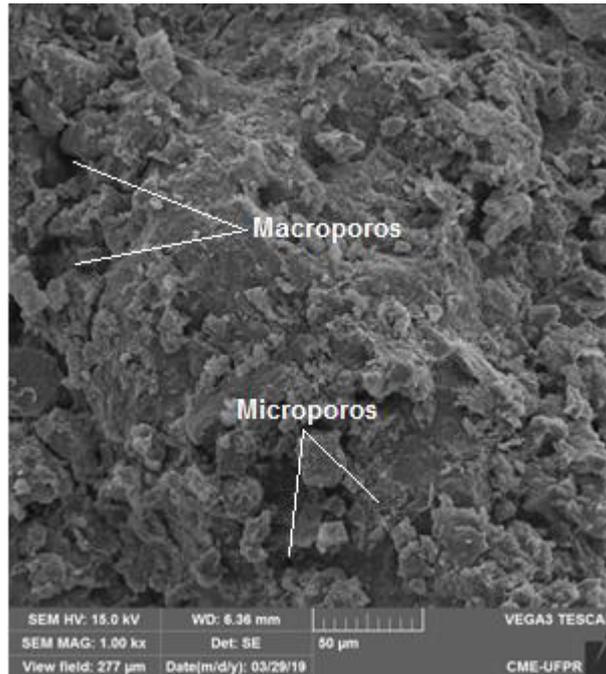
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 46 - IMAGEM MEV - AMOSTRA RD (R)



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 47 - IMAGEM MEV - AMOSTRA CO (I)



FONTE: A autora (2019).

Apesar do ensaio de microscopia eletrônica de varredura ser realizado em uma região específica da amostra de solo, as imagens de MEV confirmam a mudança na estrutura dos materiais. Na FIGURA 45, que representa o solo RD indeformado, observa-se que o solo se encontra estruturalmente formado por agregados possuindo macroporos entre eles e microporos em seu interior. Nas FIGURAS 46 e 47 observa-se que ocorre a desagregação das partículas, seja pelo efeito da remoldagem, no caso do solo RD (R), ou pelo efeito do intemperismo ou do processo de formação, no caso do solo CO (I).

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

O resultado de um conjunto composto por no mínimo três ensaios sob diferentes tensões normais ao plano de ruptura definem a envoltória de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb. Com a envoltória de cisalhamento definida, podem-se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo em termos de tensões efetivas: ângulo de atrito interno (ϕ') e intercepto coesivo (c'). Além disso, é possível obter-se a variação da tensão cisalhante e da altura do corpo de prova com o aumento dos

deslocamentos horizontais, permitindo avaliar o comportamento tensão-deformação do solo.

Para possibilitar a aplicação dos conceitos convencionais de resistência ao cisalhamento de solos saturados a solos não saturados, o termo da sucção mátrica foi considerado como contribuinte para a coesão aparente do solo, conforme apresentado no item 2.2.

Neste trabalho, a resistência ao cisalhamento dos solos estudados foi determinada a partir de ensaios de cisalhamento direto convencionais, realizados em amostras nas condições inundada e não saturada. Esses ensaios foram realizados para tensões de 50, 100 e 200 kPa. Nesta seção, serão apresentadas as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal e as envoltórias de ruptura, ajustadas aos pontos experimentais de resistência ao cisalhamento dos solos RD e CO.

As TABELAS 8 a 11 apresentam os resultados dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto dos solos RD, nas condições indeformada e remoldada, e CO, na condição indeformada. Nessas tabelas, são apresentados os valores de coesão aparente (c) e ângulo de atrito (φ). Os valores de sucção mátrica foram estimados pelas curvas características dos respectivos solos.

Os resultados do solo RD são apresentados nas FIGURAS 48 a 53 (condição indeformada) e nas FIGURAS 54 a 59 (condição remoldada). Nestas ainda são apresentadas as envoltórias tanto de resistência de pico quanto para a resistência residual. Para o solo CO esses resultados são apresentados nas FIGURAS 60 a 63 (condição indeformada).

TABELA 8 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO - AMOSTRA RD (I)

S (%)	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	c (kPa)	φ (°)	Ψ_{CRAS} (kPa)
S = 1%	200	218,5	81,9	34,7	100000
	100	157,3			
	50	112,5			
S = 20%	200	216,3	75,1	35,2	7000
	100	144,5			
	50	111,1			
S = 35%	200	197,1	63,0	34,5	200
	100	142,4			
	50	90,4			
S = 50%	200	179,4	31,7	38,5	45
	100	120,3			
	50	61,3			
S = 65%	200	166,5	19,6	36,3	30
	100	93,3			
	50	56,3			
S = 95%	200	151,6	8,2	35,9	0
	100	85,4			
	50	41,3			

FONTE: A autora (2019).

TABELA 9 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO AMOSTRA RD (R) – PICO

S (%)	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	c (kPa)	φ (°)	Ψ_{CRAS} (kPa)
S = 1%	200	192,2	62,3	33,7	100000
	100	138,8			
	50	89,0			
S = 20%	200	190,0	61,2	33,5	8000
	100	138,8			
	50	86,9			
S = 35%	200	184,3	52,0	33,5	300
	100	118,9			
	50	84,7			
S = 50%	200	173,7	38,1	34,5	70
	100	111,8			
	50	69,1			
S = 65%	200	160,1	21,1	34,9	40
	100	92,6			
	50	54,8			
S = 95%	200	142,4	2,9	34,9	0
	100	72,6			
	50	37,8			

FONTE: A autora (2019).

TABELA 10 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO AMOSTRA RD (R) – RESISTÊNCIA RESIDUAL

S (%)	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	Ψ_{CRAS} (kPa)
S = 1%	200	177,2	49,2	33,0	100000
	100	120,3			
	50	77,6			
S = 20%	200	173,0	48,1	31,9	8000
	100	109,6			
	50	79,8			
S = 35%	200	166,5	42,4	31,8	300
	100	104,7			
	50	73,3			
S = 50%	200	142,4	29,6	31,6	70
	100	97,5			
	50	45,6			
S = 65%	200	143,8	20,0	31,8	40
	100	82,6			
	50	50,6			
S = 95%	200	126,7	0,4	32,1	0
	100	60,5			
	50	33,4			

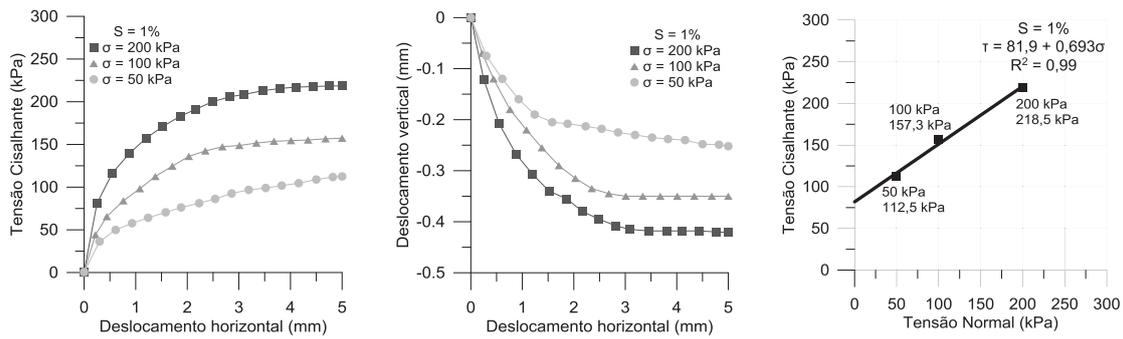
FONTE: A autora (2019).

TABELA 11 – RESULTADOS CISALHAMENTO DIRETO AMOSTRA CO (I)

S (%)	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	Ψ_{CRAS} (kPa)
S = 1%	200	168,0	42,4	32,1	100000
	100	104,7			
	50	74,1			
S = 50%	200	157,3	34,6	31,5	4000
	100	95,4			
	50	65,5			
S = 65%	200	140,2	21,4	30,8	60
	100	81,9			
	50	50,6			
S = 95%	200	116,7	13,2	27,8	0
	100	55,5			
	50	31,1			

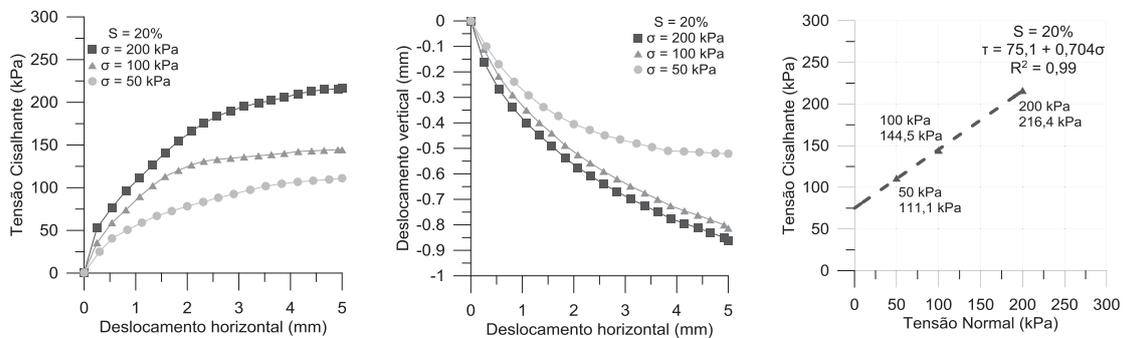
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 48 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO –
AMOSTRA RD (I) - S=1%



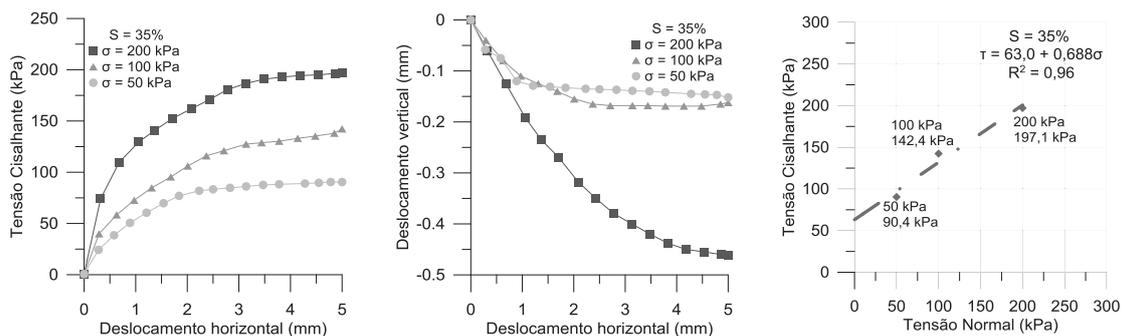
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 49 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO –
AMOSTRA RD (I) - S=20%



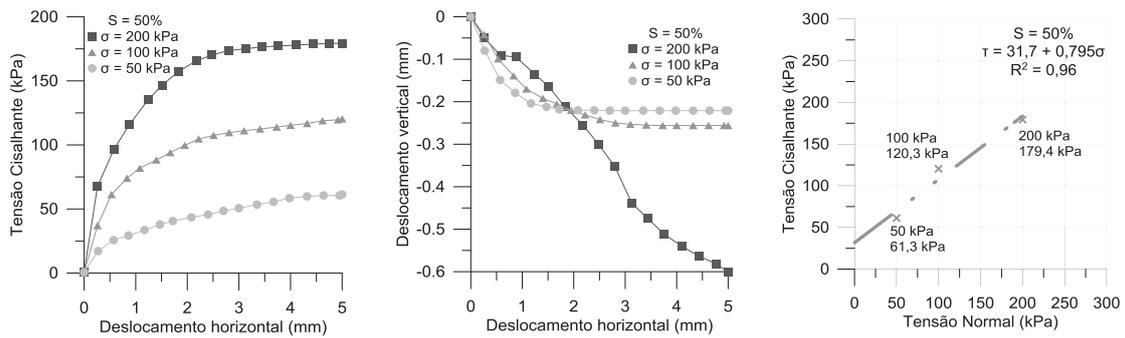
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 50 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO –
AMOSTRA RD (I) - S=35%



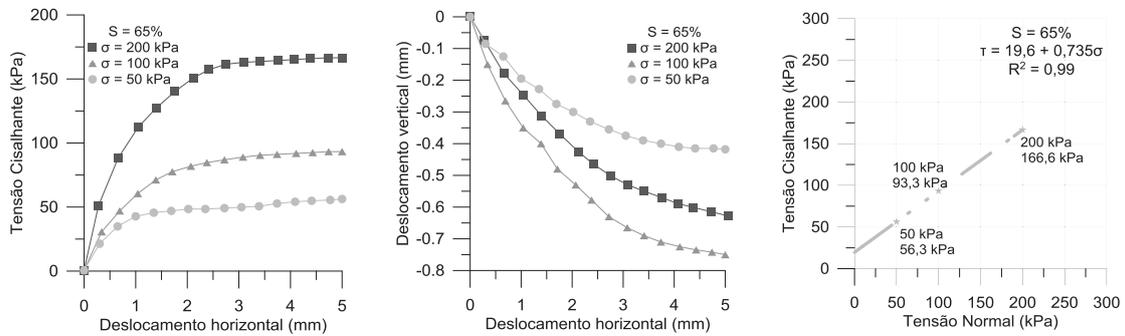
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 51 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=50%



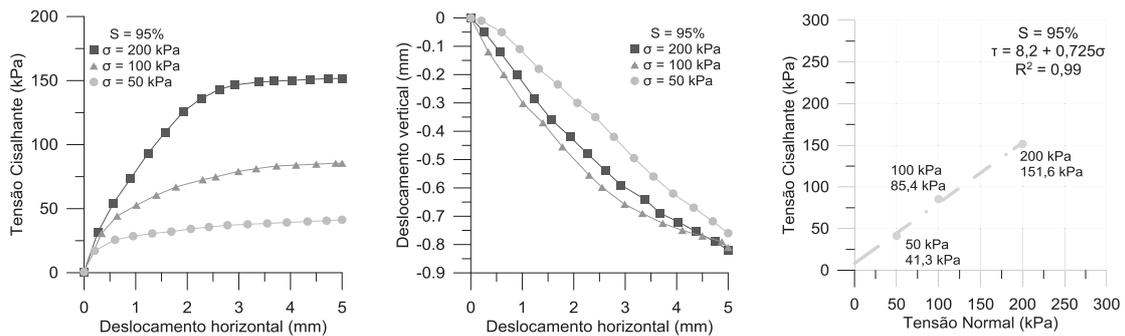
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 52 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=65%



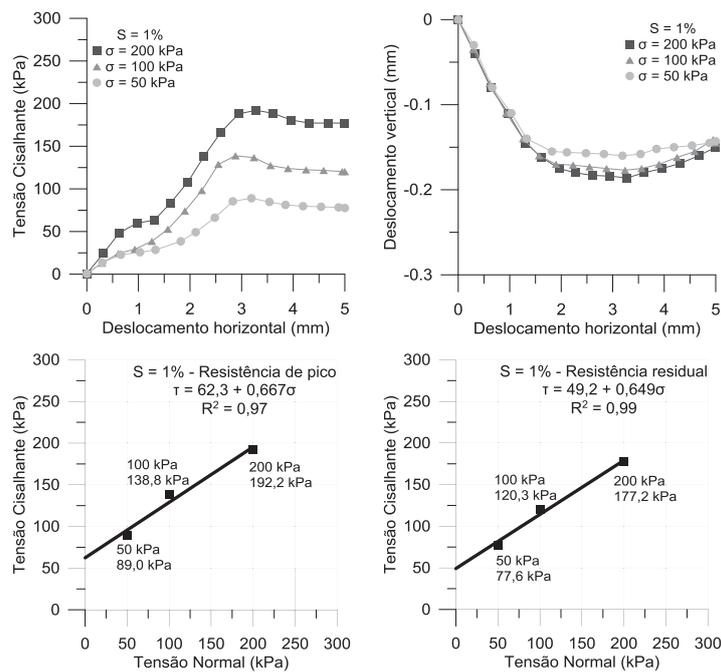
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 53 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (I) - S=95%



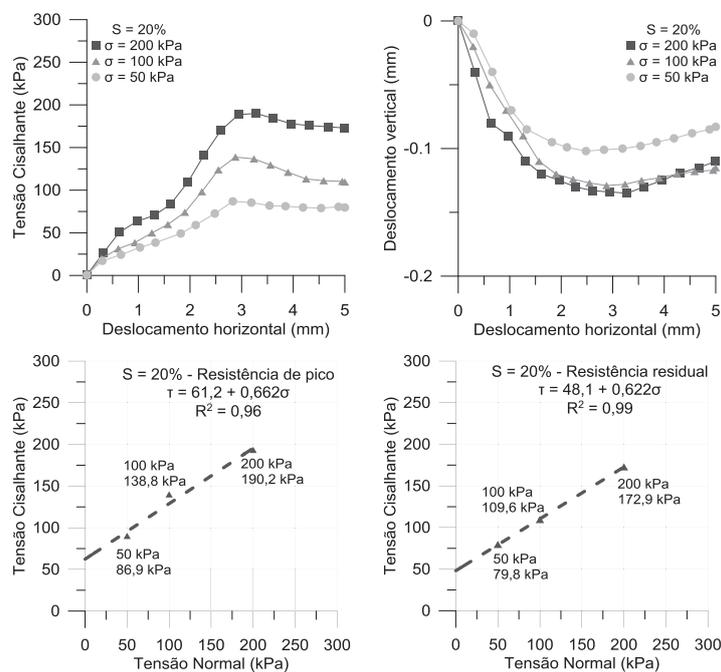
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 54 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=1%



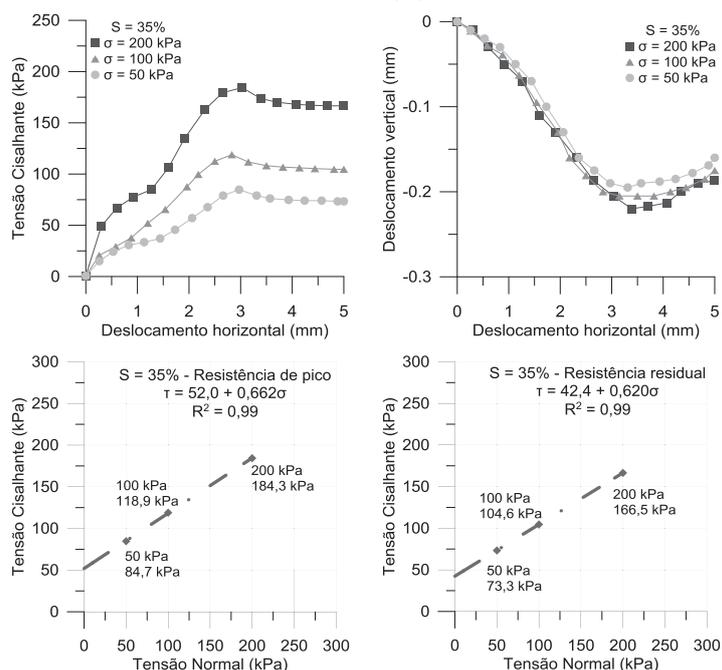
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 55 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=20%



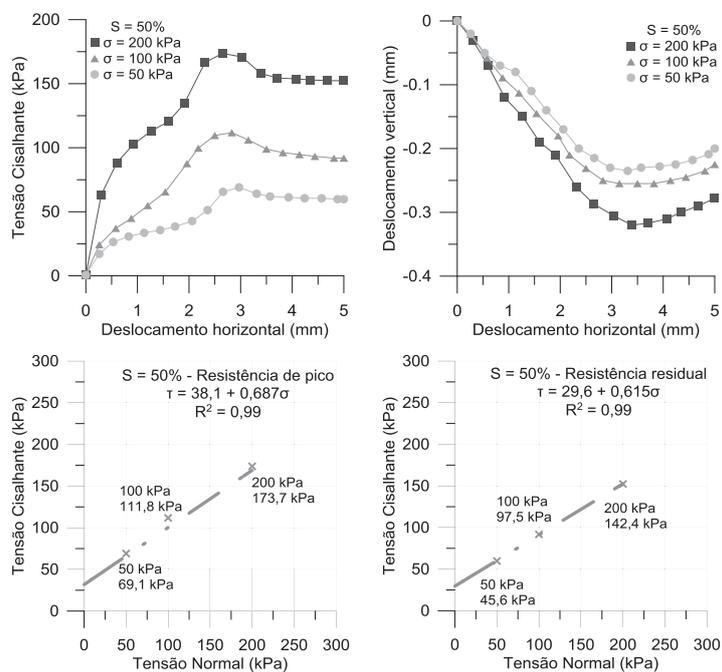
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 56 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=35%



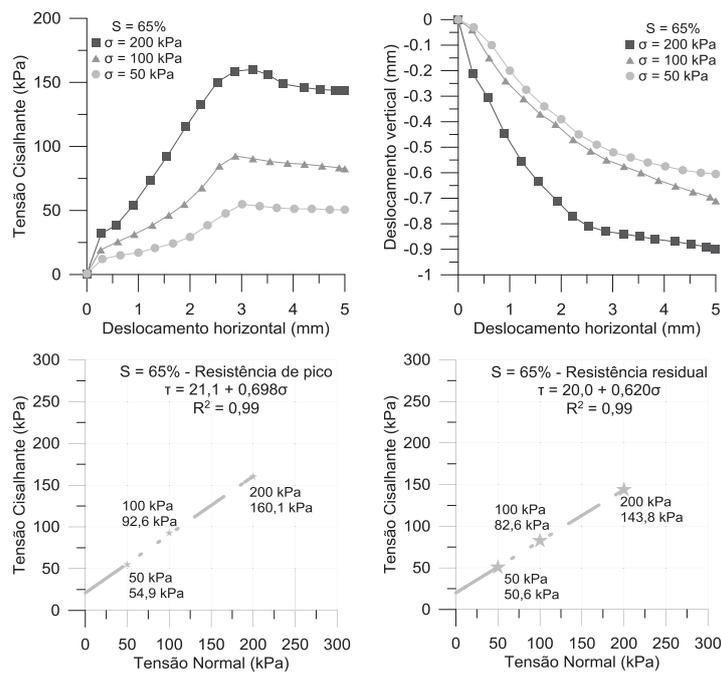
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 57 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=50%



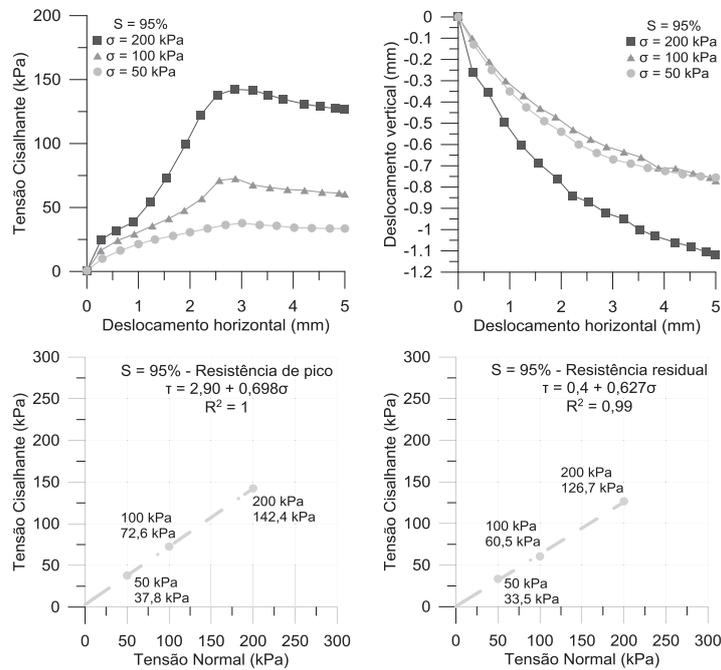
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 58 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=65%



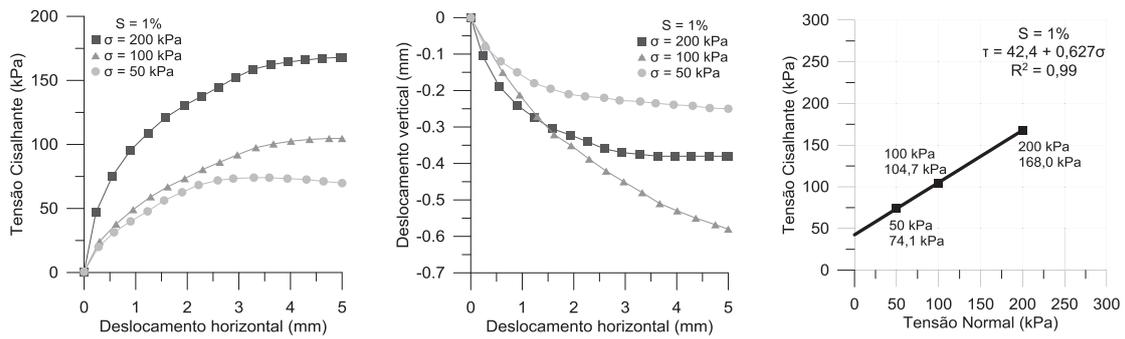
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 59 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA RD (R) - S=95%



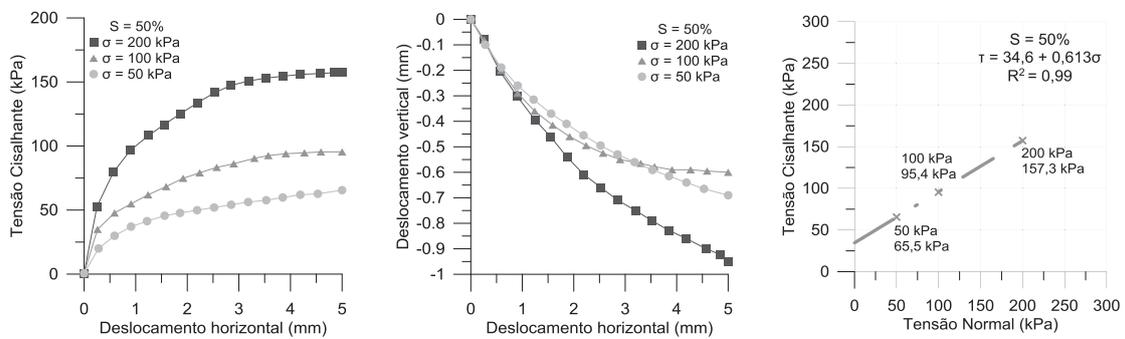
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 60 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=1%



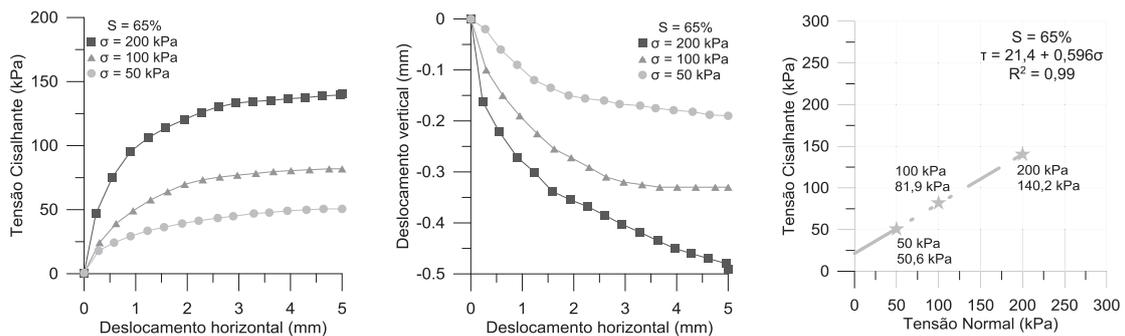
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 61 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=50%



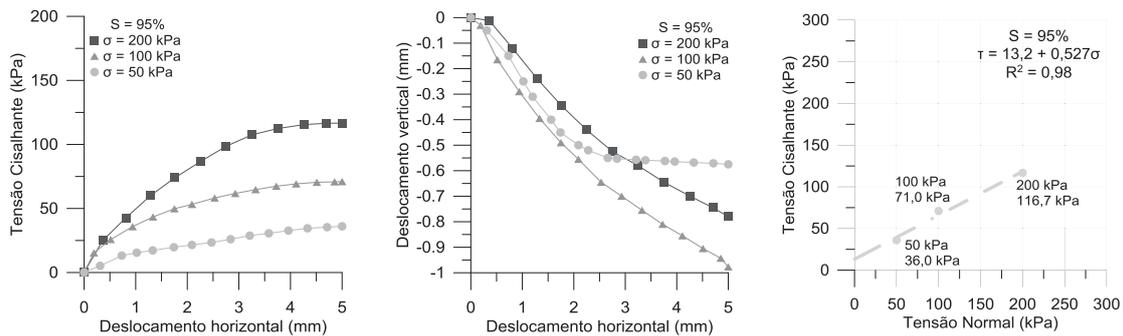
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 62 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=65%



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 63 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO – AMOSTRA CO (I) - S=95%

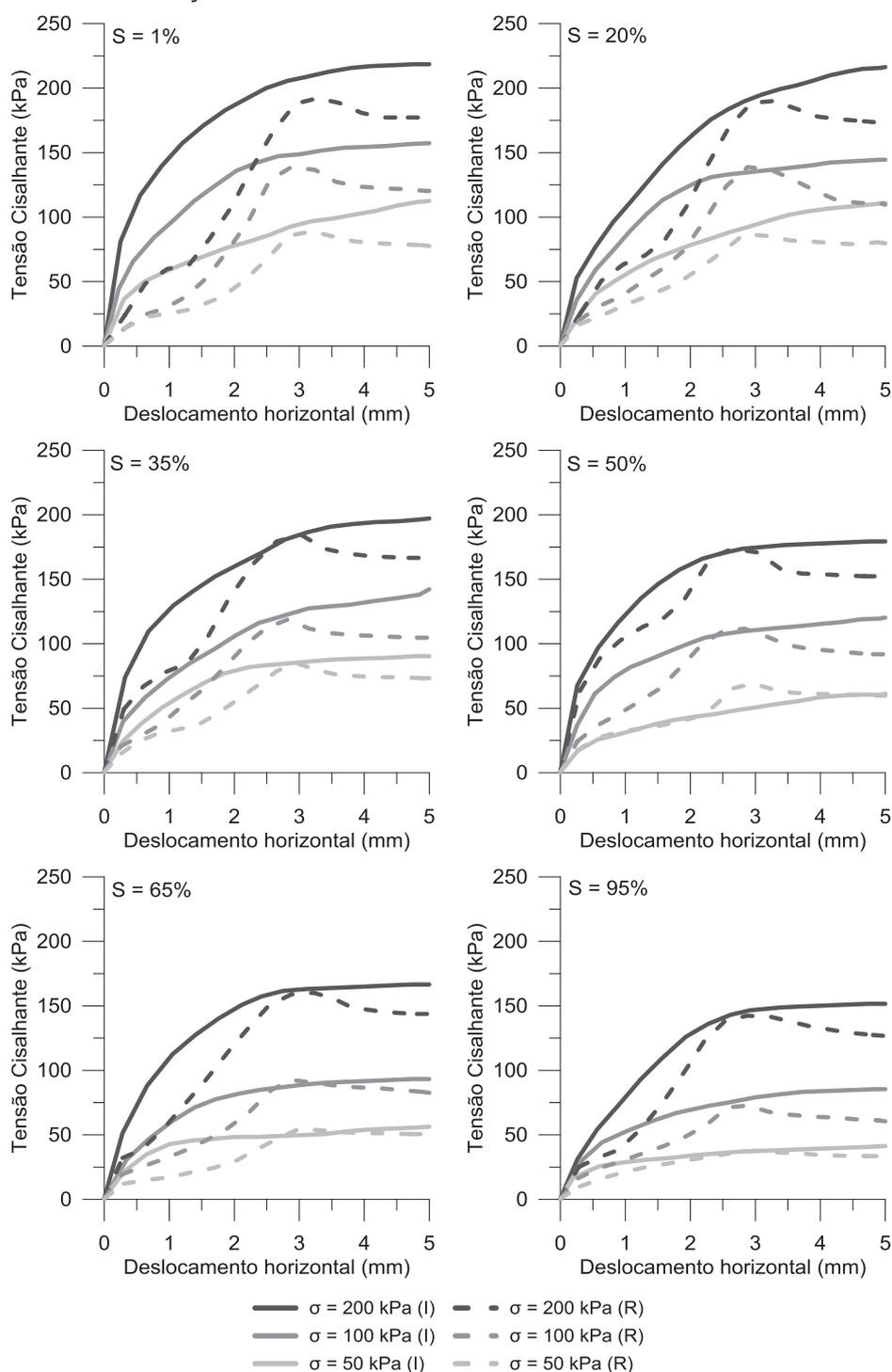


FONTE: A autora (2019).

Para os ensaios nas amostras indeformadas, tanto do solo RD quanto do solo CO, as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal apresentaram comportamento semelhante entre si. Os materiais ensaiados mostraram-se de comportamento dúctil, com tensão cisalhante crescente, não apresentando evidências de pico. Nesses casos, adotaram-se como tensões cisalhantes máximas aquelas referentes ao máximo deslocamento horizontal (5 mm). Com base nas curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para esses mesmos solos observou-se que as amostras apresentaram comportamento de compressão para todas as tensões normais avaliadas.

Comparando-se as curvas tensão *versus* deslocamento horizontal obtidas para o solo RD nas condições indeformada e remoldada, é possível identificar dois tipos de comportamento como resposta a solicitações no ensaio de cisalhamento direto. Para análise do efeito da remoldagem, agruparam-se na FIGURA 64 os gráficos de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal de mesmo grau de saturação.

FIGURA 64 - COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES INDEFORMADA E REMOLDADA DO SOLO RD



FONTE: A autora (2019).

Os ensaios no solo RD na condição indeformada apresentaram comportamento dúctil, que consiste no aumento progressivo da tensão cisalhante até ruptura, permanecendo praticamente constante a partir daí. O valor máximo ocorre para deslocamentos superiores a 4 mm, semelhante ao

comportamento de solos normalmente adensados. Os ensaios na condição remoldada evidenciaram picos em deformações horizontais de aproximadamente 3 mm, semelhante à condição de um solo sobreadensado (possivelmente ocasionado pelo efeito da compactação durante o processo de moldagem). Em tempos de deslocamentos verticais, o solo RD remoldado apresentou comportamento compressivo seguido de expansão.

O solo indeformado apresenta uma elevada rigidez inicial, principalmente nos ensaios com menor grau de saturação, expressando a atuação da sucção mátrica. À medida que houve aumento da umidade, a rigidez tendeu a diminuir. O solo remoldado apresentou uma perda de rigidez em deformações horizontais de aproximadamente 1 mm. Isso se deve principalmente a reestruturação do solo devido a remoldagem.

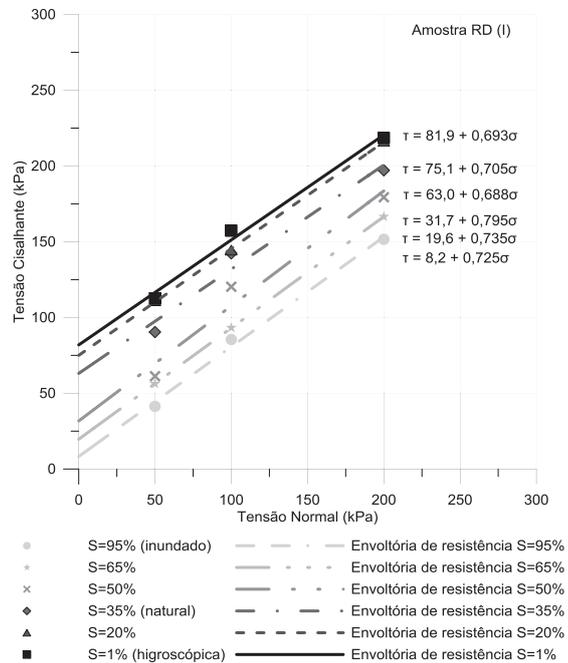
A partir dos resultados apresentados, foram definidas as envoltórias de resistência para os solos RD e CO nas diferentes condições de moldagem e diferentes valores de grau de saturação. As envoltórias de ruptura obtidas com os ensaios de cisalhamento direto foram ajustadas a partir de função linear ($y = a + bx$) aos pontos experimentais, tendo-se obtido bons ajustes, com coeficientes de determinação (R^2) próximos de 1.

O coeficiente de determinação, ou R^2 , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando em percentagem o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra. Chin (1998) recomenda, para casos gerais, que valores de R^2 maiores que 0,67 representam um ajuste forte, enquanto valores de R^2 menores que 0,33 representam um ajuste fraco. Valores intermediários representam um ajuste mediano.

As FIGURAS 65 a 67 apresentam, respectivamente, os gráficos tensão cisalhante *versus* tensão normal com a série de envoltórias de ruptura definidas para a amostra RD, na condição indeformada e na condição remoldada, e para a amostra CO na condição indeformada. Essas figuras evidenciam o acréscimo da coesão aparente com o decréscimo do grau de saturação e as envoltórias

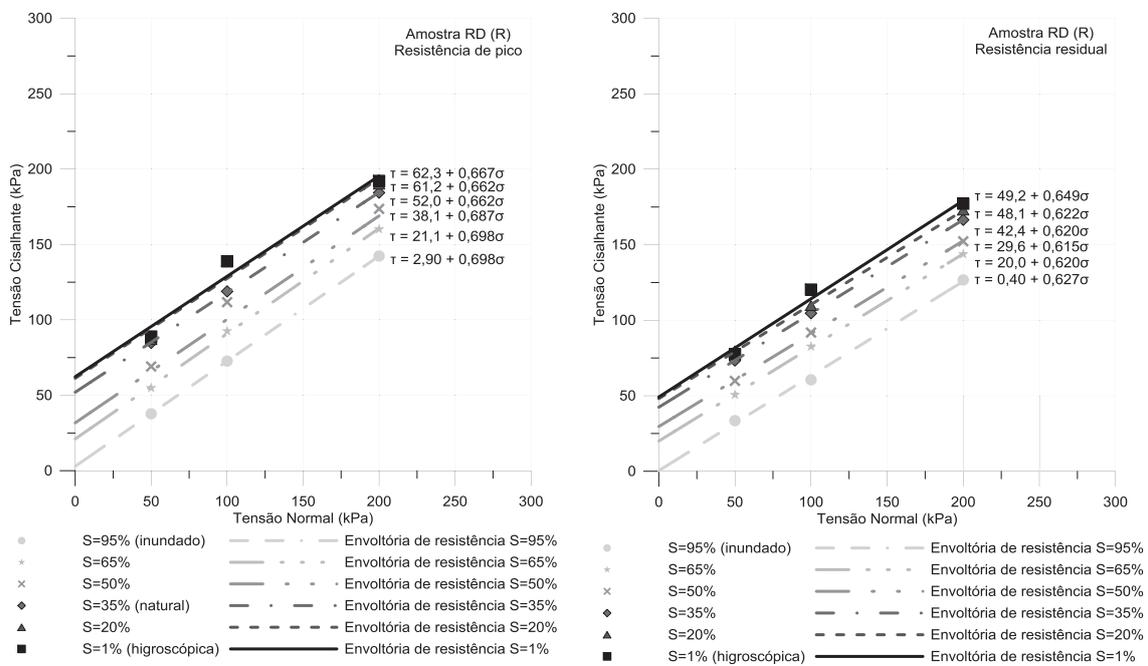
praticamente paralelas entre si, indicando que o ângulo de atrito pouco se altera.

FIGURA 65 – RESUMO DAS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA RD (I)



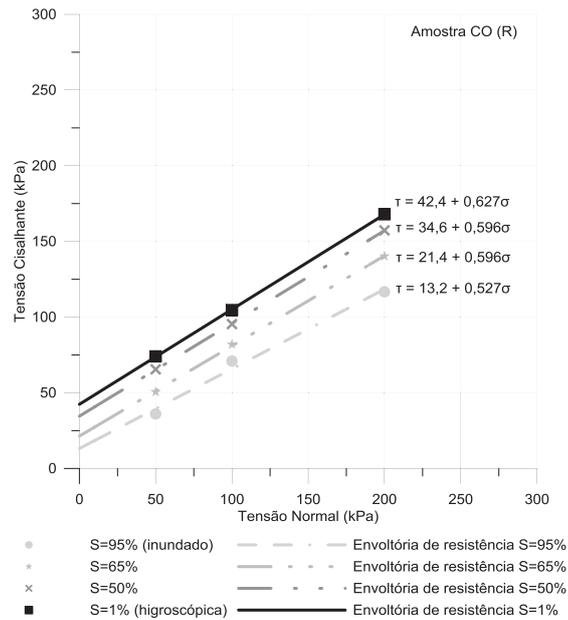
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 66 – RESUMO DAS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA RD (R)



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 67 – RESUMO DAS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DA AMOSTRA CO (I)



FONTE: A autora (2019).

As envoltórias de ruptura, obtidas a partir dos ensaios de cisalhamento direto com diferentes níveis de sucção mátrica, possibilitaram determinar a influência da sucção mátrica nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Nota-se que para os ensaios de cisalhamento direto há variação principalmente em relação ao intercepto coesivo, ou seja, o acréscimo de resistência em função da sucção mátrica ocorre principalmente na parcela coesiva do material. Os valores de coesão aparente última mostraram-se bastante elevados quando comparados com os parâmetros obtidos para os ensaios saturados. Em relação aos valores de ângulo de atrito notam-se pequenas variações para os diferentes níveis de sucção mátrica.

Os ensaios de cisalhamento direto no solo RD na condição indeformada (FIGURA 65) apresentaram maior intervalo de variação no intercepto coesivo, variando entre 8,2 e 81,9 kPa. Em relação aos valores de ângulo de atrito, o máximo valor encontrado foi de 38,5°, enquanto o mínimo foi de 34,5°, sendo o valor médio de 35,9°, sendo que o valor de ângulo de atrito obtido para o ensaio com grau de saturação de 50% (38,5°) apresentou a maior dispersão em relação aos demais resultados.

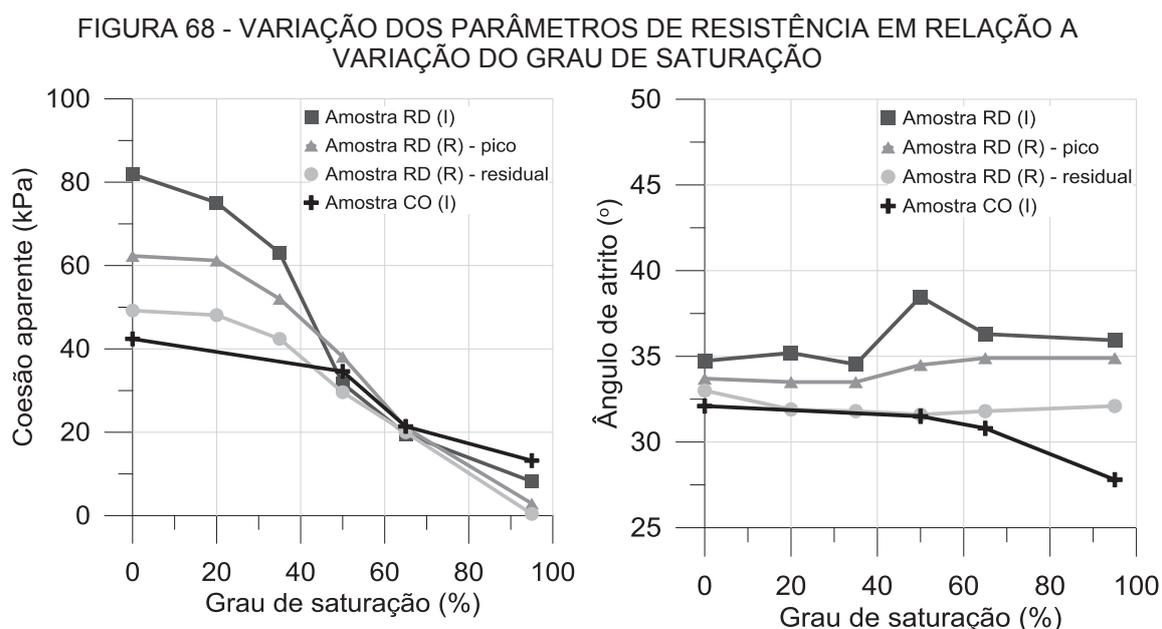
Os ensaios de cisalhamento direto no solo RD na condição remoldada (FIGURA 66) apresentaram comportamento de tipo frágil, com pico de resistência ao cisalhamento seguido de um decréscimo da tensão cisalhante

até a estabilização em torno de um valor definido. Para cada um desses ensaios foram definidas duas envoltórias de resistência distintas: uma considerando a resistência máxima obtida e outra considerando a resistência residual.

Observa-se nessas envoltórias que o intervalo de variação do intercepto coesivo é maior quando se considera a resistência máxima, variando entre 2,9 e 62,3 kPa. Quando considerado os valores de resistência residual, os valores de intercepto coesivo variam entre 0,4 e 49,2 kPa. Os valores de ângulo de atrito também são ligeiramente maiores quando se comparam as envoltórias de resistência máxima ($\sim 34^\circ$) com as envoltórias de resistência residual ($\sim 32^\circ$).

Os ensaios de cisalhamento direto no solo CO na condição indeformada (FIGURA 67) apresentaram menor intervalo de variação no intercepto coesivo, variando entre 13,2 e 42,4 kPa. Em relação aos valores de ângulo de atrito, o máximo valor encontrado foi de $32,1^\circ$, enquanto o mínimo foi de $27,8^\circ$, sendo o valor médio de $30,6^\circ$.

A FIGURA 68 apresenta a variação dos parâmetros de resistência (coesão aparente e ângulo de atrito) com o aumento do grau de saturação para os solos estudados.



FONTE: A autora (2019).

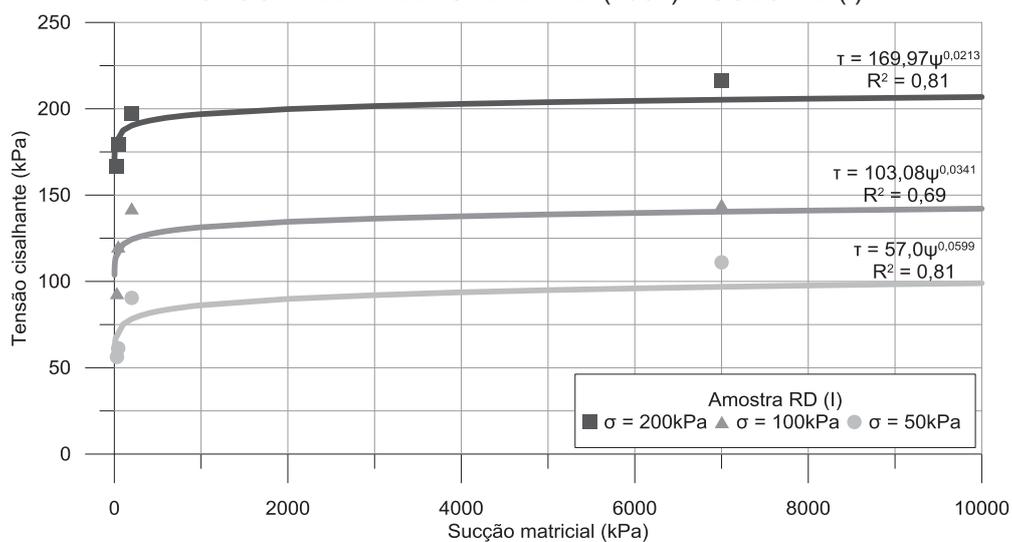
4.4 APLICAÇÃO DO MODELO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PROPOSTO POR FREDLUND ET AL. (1978)

A projeção da envoltória de resistência ao cisalhamento, proposta por Fredlund *et al.* (1978), no plano $\tau \times \psi$ define o ângulo φ_b , o qual quantifica a contribuição da sucção mátrica na resistência ao cisalhamento.

É possível perceber neste trabalho que, para os solos estudados, as pesquisas de Fredlund e Xing (1978) sobre a consideração linear não são existentes, conforme apresentado no item 2.2. Isto é percebido na função polinomial encontrada para os pontos experimentais dos solos, representadas nos gráficos das FIGURAS 69 a 72, que mostram a relação tensão cisalhante *versus* sucção mátrica aplicados para tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Observa-se que o ajuste da função polinomial aos pontos experimentais foi satisfatório, obtendo-se para todos os casos valores de R^2 superiores a 0,67, o que implica em um ajuste forte.

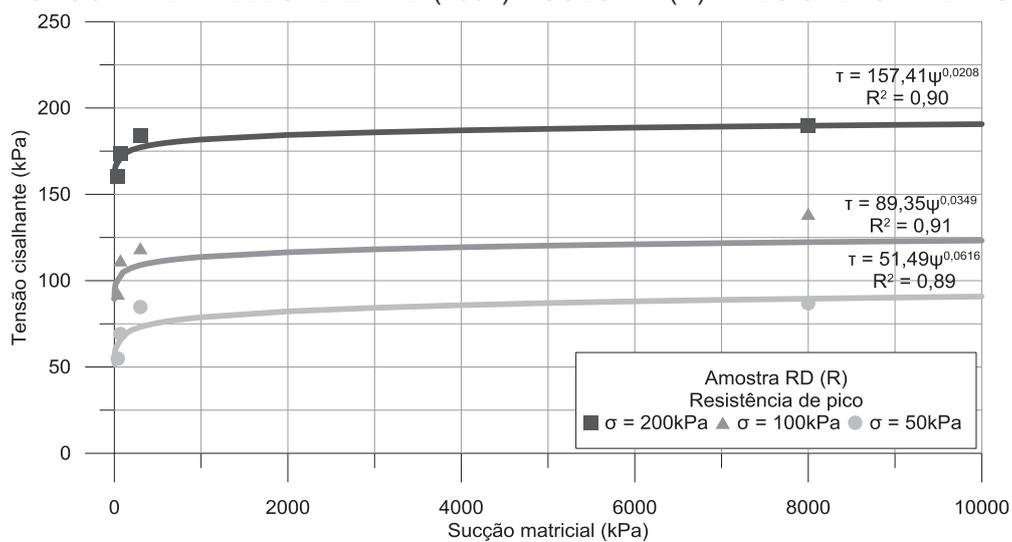
A não linearidade da relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção mátrica implica em variações nos valores de φ_b . Desse modo, ao analisar os ajustes matemáticos, observa-se que, para sucções inferiores ao valor de entrada de ar, φ_b se aproxima de φ' . Com o aumento da sucção mátrica, os valores do ângulo de atrito devido à sucção mátrica (φ_b) diminuem, tendendo a valores próximos de zero para altos valores de sucção mátrica, conforme apresentado na TABELA 12.

FIGURA 69 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND ET AL. (1987) – SOLO RD (I)



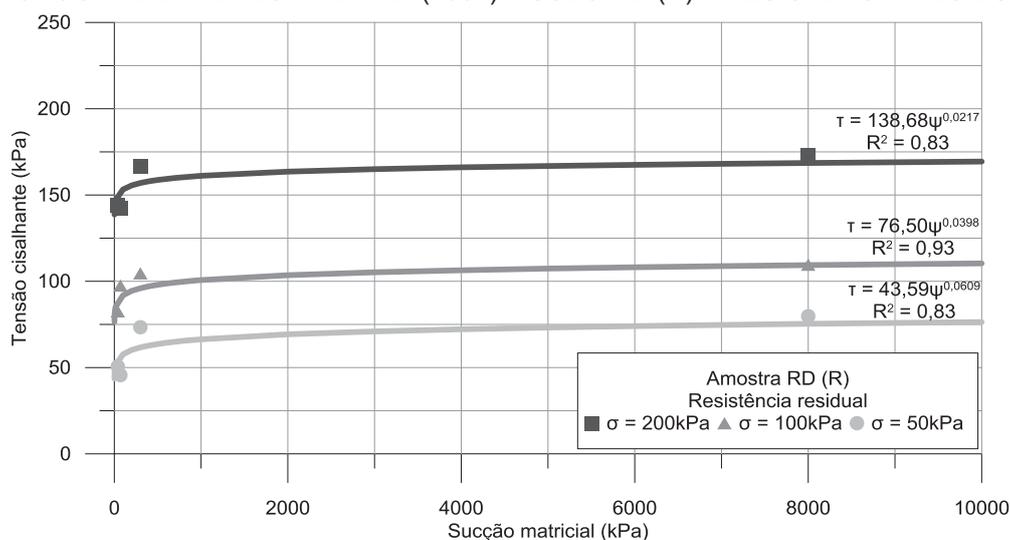
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 70 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND ET AL. (1987) – SOLO RD (R) – RESISTÊNCIA DE PICO



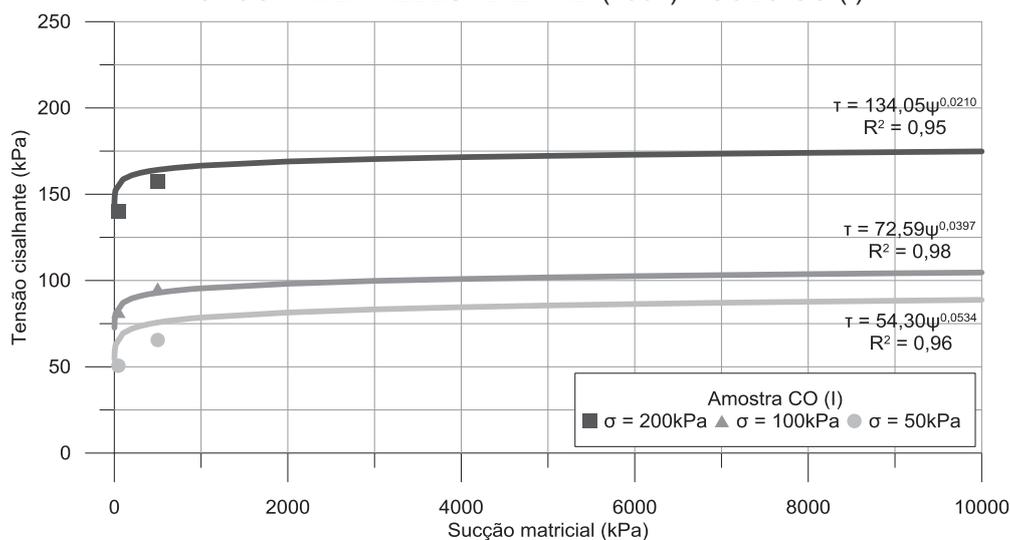
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 71 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND ET AL. (1987) – SOLO RD (R) – RESISTÊNCIA RESIDUAL



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 72 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA NO PLANO τ VERSUS ψ SEGUNDO PROPOSTA DE FREDLUND ET AL. (1987) – SOLO CO (I)



FONTE: A autora (2019).

TABELA 12 - VALORES DE φ_b PARA OS SOLOS ESTUDADOS

Solo	$\varphi'_{\text{médio}}$ (°)	VEA (kPa)	Valores médios de φ_b (°)		
			$\psi < \text{VEA}$	$\text{VEA} \leq \psi \leq 1000$	$\psi > 1000$
RD (I)	35,9°	13,0	35,7°	5,2°	0,5°
RD (R) – Resistência de pico	34,2°	15,5	33,0°	4,7°	0,5°
RD (R) – Resistência residual	32,0°	15,5	30,7°	4,3°	0,4°
CO (I)	30,6°	14,0	30,3°	4,2°	0,4°

FONTE: A autora (2019).

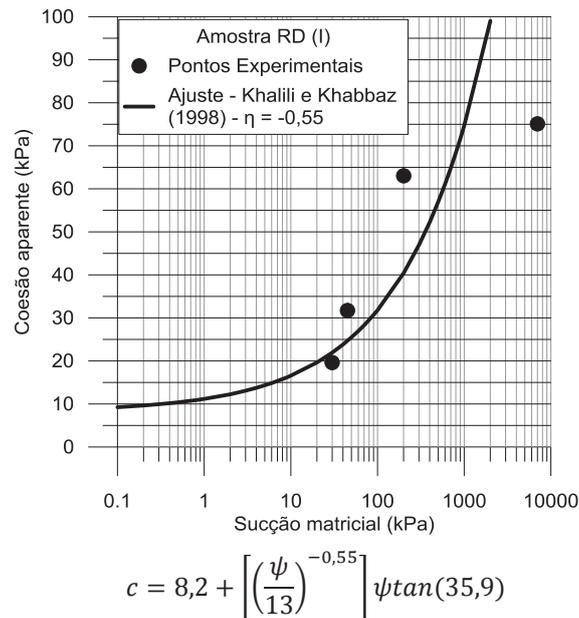
4.5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Os modelos de previsão de resistência ao cisalhamento do solo devem permitir que os resultados sejam obtidos de maneira rápida e confiável. A fim de verificar a aplicabilidade desses modelos para solos tropicais, a previsão da resistência foi realizada neste trabalho segundo dois métodos: Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006).

Neste item, a resistência ao cisalhamento do solo é representada em termos de coesão aparente (c) *versus* sucção mátrica. Com finalidade de comparação, em conjunto as curvas de ajuste, foram representados os pontos de coesão aparente, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, *versus* a sucção mátrica, obtida a partir da curva de retenção.

O primeiro método, de Khalili e Khabbaz (1998), baseia-se na resistência obtida pela equação de tensões efetivas de Bishop (1959), utilizando a pressão de entrada de ar da curva de retenção de água para cálculo do parâmetro χ . A FIGURA 73 mostra a curva de previsão obtida para o solo RD na condição indeformada utilizando a pressão de entrada de ar do solo determinada no item 4.1 deste estudo, que é de 13 kPa. Nota-se que a resistência prevista para esta pressão de entrada de ar encontra-se aquém dos valores experimentais, pois quanto maior a sucção mátrica, mais afastado da curva de ajuste o ponto experimental se encontra. Neste caso, o valor de R^2 encontrado foi igual a 0,62. Este valor representa um ajuste mediano. Porém considerando apenas os pontos experimentais com valores de sucção mátrica menores que 1000 kPa, o R^2 passa para um valor igual a 0,89, representando um ajuste forte.

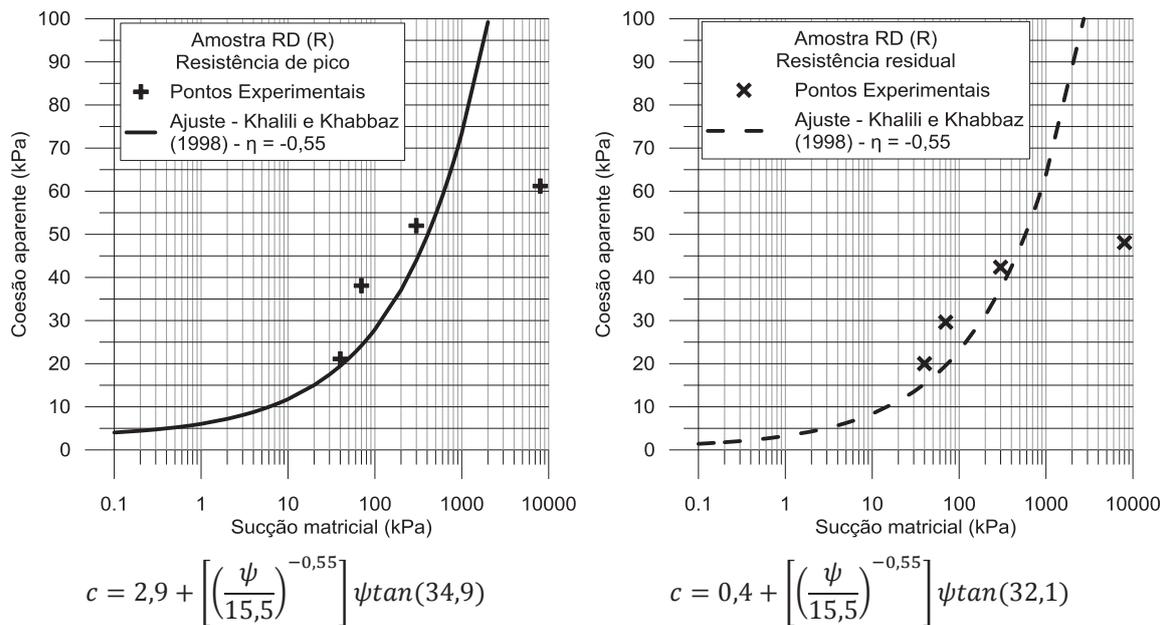
FIGURA 73 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO SOLO RD (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE KHALILI E KHABBAZ (1998)



FONTE: A autora (2019).

A FIGURA 74 mostra as curvas de previsão obtidas para o solo RD na condição remoldada, tanto para a resistência de pico quanto para a resistência residual. A pressão de entrada de ar para este solo é de 15,5 kPa. Nota-se que, para valores de sucção mátrica inferiores a 1000 kPa, a resistência prevista para esta pressão de entrada de ar encontra-se próxima dos valores experimentais, embora a curva de ajuste subestime a coesão aparente. Para valores de sucção mátrica superiores a 1000 kPa, a dispersão do ponto experimental em relação a curva de ajuste é alta, além da previsão superestimar a resistência do solo. Os valores de R^2 encontrados para os dois casos foi de 0,60, representando um ajuste mediano. Considerando apenas os pontos experimentais com valores de sucção mátrica menores que 1000 kPa, o valor de R^2 , no caso de se utilizar os valores de resistência de pico, passa a ser de 0,85 e o valor de R^2 considerando os valores de resistência residual passa a ser igual a 0,93. Nesse caso, os coeficientes de determinação passam a representar um ajuste forte.

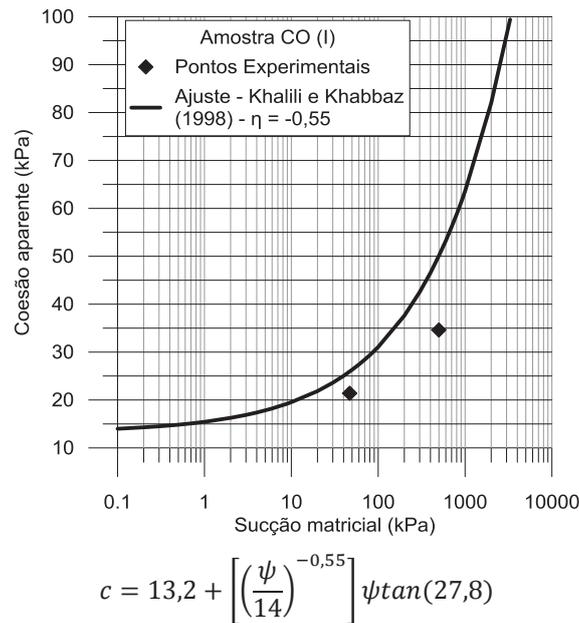
FIGURA 74 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO SOLO RD (R) SEGUNDO A PROPOSTA DE KHALILI E KHABBAZ (1998)



FONTE: A autora (2019).

A FIGURA 75 mostra a curva de previsão obtida para o solo CO na condição indeformada utilizando a pressão de entrada de ar do solo, que é de 14 kPa. Para se obter o coeficiente de determinação para o solo CO, foi adicionado o ponto teórico com sucção mátrica igual a 0 kPa e grau de saturação igual a 100%. Desse modo o valor de R^2 obtido foi de 0,76, sendo considerado um ajuste forte. Entretanto, a curva de previsão superestima a resistência do solo CO para este modelo.

FIGURA 75 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO SOLO CO (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE KHALILI E KHABBAZ (1998)



FONTE: A autora (2019).

Vilar (2006) propôs um método empírico para expressar a contribuição da sucção mátrica na resistência dos solos não saturados, que consiste em uma função hiperbólica, conforme já discutido no item 2.2.1.2. Dos ensaios de determinação da resistência última foi possível definir as envoltórias de resistência dos solos na umidade higroscópica. O intercepto de coesão aparente última, conjuntamente aos parâmetros efetivos de resistência determinados nos ensaios inundados, foi utilizado para o equacionamento da hipérbole.

A FIGURA 76 apresenta a curva obtida para o solo RD na condição indeformada, que, comparada aos pontos experimentais, forneceu valor de R^2 igual a 0,95. Tendo em vista a dispersão entre os pontos experimentais a partir dos quais foi calculado o coeficiente de determinação, a previsão obtida é considerada satisfatória para a representação da evolução da resistência do solo com a sucção mátrica.

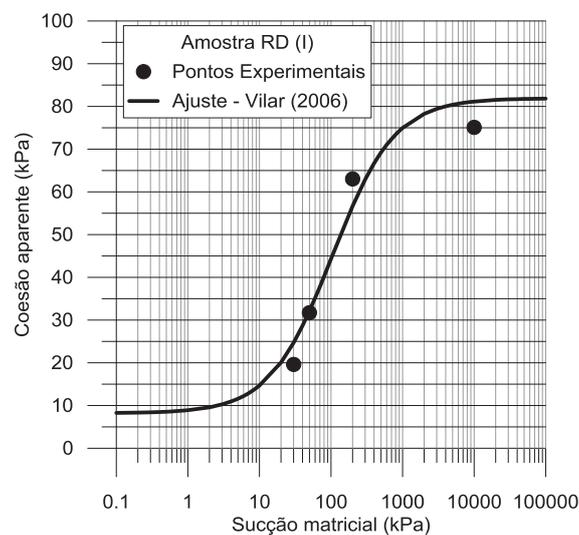
A FIGURA 77 apresenta as curvas obtidas para o solo RD na condição remoldada, considerando-se primeiro a resistência de pico e posteriormente a resistência residual. Para a primeira hipótese obteve-se um valor de R^2 igual a 0,94, enquanto que para a segunda hipótese obteve-se um valor de R^2 igual a 0,97. Tendo em vista a dispersão entre os pontos experimentais a partir dos

quais foi calculado o coeficiente de determinação, a previsão obtida é considerada satisfatória para a representação da evolução da resistência do solo com a sucção mátrica.

A FIGURA 78 apresenta a curva obtida para o solo CO na condição indeformada. Para se obter o coeficiente de determinação para o solo CO, foi adicionado o ponto teórico com sucção mátrica igual a 0 kPa e grau de saturação igual a 100%. Desse modo o valor de R^2 obtido foi de 0,94, sendo considerado um ajuste forte. Entretanto, a curva de previsão superestima a resistência do solo CO para este modelo.

Os coeficientes de determinação obtidos para o método de Vilar (2006) apresentaram um ajuste forte. Estes resultados mostram que o intercepto coesivo se relaciona com a sucção mátrica segundo um modelo não linear (possivelmente hiperbólico), afastando a possibilidade de se admitir φ_b constante.

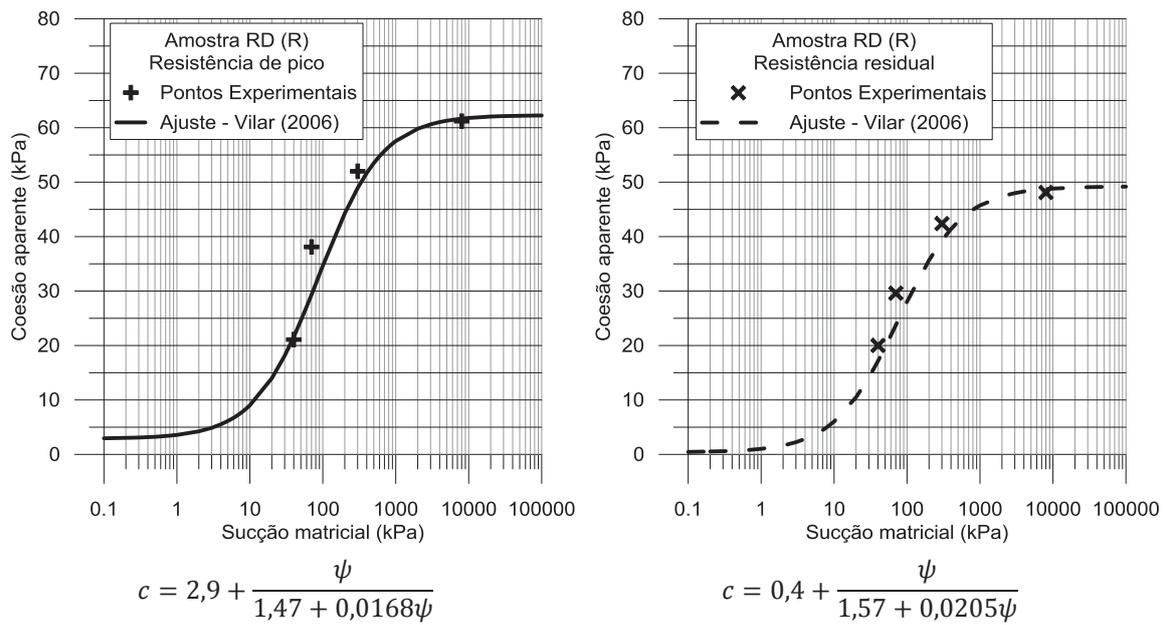
FIGURA 76 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO RD (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE VILAR (2006)



$$c = 8,2 + \frac{\psi}{1,41 + 0,0136\psi}$$

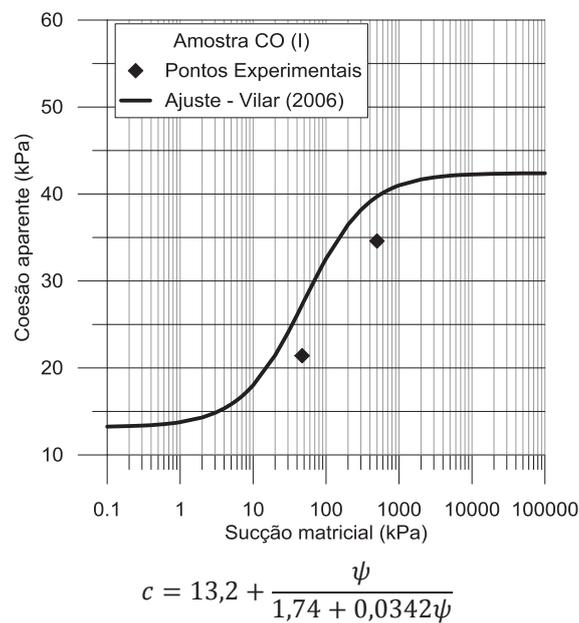
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 77 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO SOLO RD (R) SEGUNDO A PROPOSTA DE VILAR (2006)



FONTE: A autora (2019).

FIGURA 78 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO SOLO CO (I) SEGUNDO A PROPOSTA DE VILAR (2006)



FONTE: A autora (2019).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir da análise dos resultados experimentais e dos modelos de previsão. Ao final são feitas algumas sugestões para continuidade e complementação deste estudo.

5.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa analisou a resistência ao cisalhamento de dois solos não saturados da região da Serra do Mar, entre os estados de São Paulo e Paraná. O primeiro solo analisado possuía características de solo residual, enquanto o segundo era representativo de um colúvio. O programa experimental envolveu ainda a determinação das curvas de retenção desses solos, as quais foram fundamentais para a avaliação do comportamento mecânico dos mesmos frente à variação de saturação.

As curvas características dos solos estudados foram determinadas por trajetórias de umedecimento. A partir da análise gráfica observaram-se valores de entrada de ar dos macro e microporos em sucções em torno de 14 kPa e 3300 kPa em média, respectivamente. No equacionamento, foi utilizado o modelo de Gitirana e Fredlund (2004), que mostrou bom ajuste aos pontos experimentais.

Ensaio de cisalhamento direto convencionais em amostras inundadas e não saturadas foram analisados a partir de curvas tensão-deslocamento. Diferentes comportamentos foram observados, uma vez que as curvas dos ensaios das amostras RD (I) e CO (I) apresentaram comportamento dúctil, enquanto os ensaios das amostras RD (R) mostraram picos de tensões. A diferença no comportamento mecânico se deve principalmente à estrutura do solo e do processo de moldagem.

Com a finalidade de verificar a influência de diferentes graus de saturação na resistência ao cisalhamento dos solos, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras não saturadas. Como esperado, a sucção mátrica provocou aumento da coesão aparente do solo, enquanto o ângulo de atrito permaneceu praticamente inalterado.

O ensaio de cisalhamento direto convencional em amostras de solo não saturado, apesar de limitado por não permitir o controle da sucção mátrica durante a realização do ensaio, apresentou resultados satisfatórios, em conjunto a curva característica, para se determinar o acréscimo de resistência ao cisalhamento devido à sucção.

Aplicando os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto ao modelo proposto por Fredlund *et al.* (1978), verificou-se a não linearidade da relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção mátrica, o que implica em variações nos valores de φ_b . Para todos os solos analisados, os valores encontrados de φ_b são próximos ao ângulo de atrito φ' , para sucções inferiores ao valor de entrada de ar dos solos, seguindo a teoria proposta por Fredlund *et al.* em 1987.

Dois métodos de previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados foram testados. O primeiro, de Khalili e Khabbaz (1998), não apresentou ajuste satisfatório aos dados experimentais para altos valores de sucção mátrica. Isso se deve, provavelmente, ao fato de este método ter sido desenvolvido para valores de sucção mátrica inferiores a 1000 kPa.

A segunda metodologia, de Vilar (2006), mostrou maior concordância aos dados experimentais. Percebe-se que os ajustes (função hiperbólica) para previsão da resistência, quando comparados com os pontos experimentais, foram bons e muito próximos, indicando assim que a previsão da envoltória a partir do procedimento descrito anteriormente é válida para os solos estudados.

De um modo geral, o modelo proposto por Vilar (2006) apresentou um ajuste mais satisfatório em relação ao modelo de Khalili e Khabbaz (1998). O método de Vilar (2006) é interessante pela sua simplicidade. Essa simplificação se dá por necessitar apenas de dados de resistência ao cisalhamento na condição inundada e da resistência ao cisalhamento de uma amostra seca ao ar, sem a necessidade da determinação da curva de retenção de água no solo. Isto evita o uso de ensaios sofisticados que demandam elementos especiais, como pedra porosa de alta entrada de pressão de ar, e torna a obtenção da envoltória de resistência não saturada bem mais simples e também mais rápida, facilitando sua aplicação prática.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações para trabalhos futuros são as seguintes:

- a) Aplicar outros métodos de obtenção de sucção mátrica e comparar com o método demonstrado neste trabalho;
- b) Para o modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998), avaliar o comportamento do parâmetro χ em função da sucção mátrica para outros solos tropicais brasileiros;
- c) Realizar uma maior quantidade de ensaios no solo representativo do colúvio, a fim de verificar com maior fidelidade os métodos de previsão para este tipo de solo;
- d) Avaliar outros métodos de previsão de resistência ao cisalhamento para os solos estudados;
- e) Para os solos estudados, realizar ensaios de resistência ao cisalhamento com controle de sucção mátrica;
- f) A partir dos parâmetros obtidos, verificar a variação da sucção mátrica com a variação do fator de segurança do talude estudado através de um modelo computacional.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. **ASTM 5298**. West Conshohocken, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 2009.

BISHOP, A. W. The principle of effective stress. Teknisk Uke-blad, **Norwegian Geotechnical Institute**, 1959, v. 106, n. 39, p. 859–863.

BONDER, B. H. **Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de Campinas obtidas mediante técnicas de laboratório e de campo**. 152 f. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377-8**: British Standard Methods of Test for Soils for Engineering Purposes. Part 8. Shear strength tests (effective stress). London, 1990.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; SMITH, M. G.; BRE. A Low-Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-Rise Buildings. **Proceeding of the Institute of Civil Engineering**, 1992, v. 92, n. 2, p.82-89.

CHIN, W. W. **The partial least squares approach to structural equation modeling**. Modern methods for business research, Vol. 295 No.2, 295-336. Nova Jersey, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093**: Solos: Determinação da densidade real. São Paulo, 1994.

ESCARIO, V.; SÁEZ, J. The Shear Strength of Partly Saturated Soil. Technical Note. **Géotechnique**, 1986, v. 36, n. 3, p. 453-456.

FAGUNDES, L. S. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

FALEIROS, F. M. **Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR)**. 306 f. Tese de doutorado em Geoquímica e Geotectônica – Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FALEIROS, F. M.; PAVAN, M.; FERRARI, V. C. **Mapa Geológico da Folha Eldorado Paulista**, escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo, 2013.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais**. Volume 1. 2ª edição. Porto: FEUP, 2011.

FERREIRA, A. M.; GERSCOVICH, D. M. S. Avaliação das Equações para Previsão do Comportamento de Solos Residuais Brasileiros Não Saturados. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, 8 p. Gramado. **Anais...** Gramado, 2010, n. 142.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do comportamento não saturado de dois solos coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil**. 148 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral**. 332 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The Shear Strength of Unsaturated Soils. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, v. 15, n. 3, p. 313-321.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; GAN, J. K. M. Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 6., 1987, New Delhi. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1988. v.1, p.49-54.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soil**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D.G. & XING, A. Equations for the soilwater characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G. The Scope of Unsaturated Soil Mechanics: An Overview. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1. 1995, France. **Proceedings...** France, 1995, v. 3, p. 1155-1177.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. 2010, 108 p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GERSCOVICH, D. M. S. Equações para a Modelagem da Curva Característica Aplicada a Solos Brasileiros. In: **4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, p. 76-93, Porto Alegre, 2001.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GITIRANA Jr, G. de F. N.; FREDLUND, D. G. A soil water characteristic curve equation with independent properties, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 130-2, p. 209-213, 2004.

GOMES, J. E. da S. **Estudo sobre Fatores que Influenciam a Acurácia do Método do Papel Filtro**. 111 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. V. 2. 2ª ed. London: Pentech Press, 1994.

HO, D. Y. F.; FREDLUND, D. G. A multistage triaxial test for unsaturated soils. **Geotechnical Testing Journal**, v.5, n.1/2, p.18-25, 1982.

KHALILI, N., KHABBAZ, M. H. A Unique Relationship for χ for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils. **Géotechnique**, 1998. v. 48, n. 5, p. 681-687.

LAMBE, T.W. and Whitman, R.V. **Soil Mechanics**. SI Version, Wiley, New York, 1979.

MARINHO, F. A. M.; GENS, A.; JOSA, A. A. Suction measure with filter paper method. Imperial College, United Kingdom, 1994. **X Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol. 2, p. 515-522.

MARINHO, F. A. M.. A técnica do papel filtro para a medição de sucção mátrica. Encontro sobre solos não saturados, **Anais...** Porto Alegre, p. 112-125, 18-20 out. 1995.

MARINHO, F. A. M. Medição da sucção mátrica em solos. In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT97, Rio de Janeiro, **Anais...**, v.2, p. 373-397, 1997.

MIGUEL, M. G., TEIXEIRA, R. S. PADILHA, A. C. C. (2004). Curvas Características de Sucção mátrica do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba**, V. 12, n. 24, p. 63-74, jul/dez 2004.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual Compactado Não Saturado**. 2004. 361 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PECAPEDRA, L. L. **Estudo da resistência ao cisalhamento não saturada de solos residuais de granito e diabásio de Florianópolis/SC**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PONTES, A. F. R. **Avaliação da variabilidade espacial de um talude através de investigações geológico-geotécnicas diretas e indiretas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

REIS, R. M.; VILAR, O. M. Resistência ao Cisalhamento de dois solos residuais de gnaiss não saturados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, V, 2004, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2004.

SOARES, A. B. **Fluxo de água em talude arenoso: modelagem física e numérica**. 250 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

TEIXEIRA, E. K. C. **Estudo da influência da infiltração de água pluviais na estabilidade de um talude de solo residual.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics.** Wiley, New York, 1943.

TREVIZOLLI, M. N. B. **Proposta de modelo para avaliação de risco de deslizamentos baseado em cenários de eventos pluviométricos: aplicação em um talude da Serra do Mar no trecho PR/SP.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, **Soil Science Society of America Journal**, n. 44, p. 892-899, 1980.

VILAR, O. M. A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soil. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, v. 43, p. 1088-1095.

VILAR, O. M.; RODRIGUES, R. A. Métodos expeditos para previsão da resistência de solos não saturados e identificação de solos colapsíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, VI., 2007, Salvador. **Anais...** Salvador, 2007, v. 2, p. 575-592.