



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**AMANDA LEONCINI CARVALHO BARROS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO ARENOSO NÃO  
SATURADO AFETADO POR UM PROCESSO EROSIVO HÍDRICO**



Bauru  
2018

**AMANDA LEONCINI CARVALHO BARROS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO ARENOSO NÃO SATURADO AFETADO POR UM PROCESSO EROSIVO HÍDRICO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues



Bauru  
2018

Barros, Amanda Leoncini Carvalho.

Análise do comportamento de um solo arenoso não saturado afetado por um processo erosivo hídrico / Amanda Leoncini Carvalho Barros, 2018  
112 f.

Orientador: Roger Augusto Rodrigues

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade Engenharia, Bauru, 2018

1. Erosão. 2. Solo não saturado. 3. Ensaio com controle de sucção. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de AMANDA LEONCINI CARVALHO BARROS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 05 dias do mês de setembro do ano de 2018, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação / FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru, Profª Drª MARCILENE DANTAS FERREIRA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade de São Paulo - São Carlos, Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETTI do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de AMANDA LEONCINI CARVALHO BARROS, intitulada **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO ARENOSO NÃO SATURADO AFETADO POR UM PROCESSO EROSIVO HÍDRICO**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES



Profª Drª MARCILENE DANTAS FERREIRA



Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETTI



## DEDICATÓRIA

*Ao meu marido  
Itamar Rodrigo Barros*

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos meus pais, Fernando Tadeu de Carvalho e Jaquelina Coelho Leoncini Carvalho, meus orientadores da vida e aos meus irmãos Ricardo e Henrique pela felicidade de poder contar com vocês.*

*Às famílias Leoncini, Carvalho e Barros que me incentivaram na busca de meus sonhos;*

*Ao Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues pela orientação, confiança e oportunidade concedida;*

*Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti pelos diversos auxílios prestados para a realização dessa pesquisa;*

*Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental por compartilhar seus conhecimentos com comprometimento e atenção;*

*Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos, Gustavo e Sérgio pelas instruções, dedicação e paciência;*

*Aos amigos e parceiros da salinha: Alfredo, Breno, Heber, Isabela, Jhaber, Jeferson, Júnior, Roberto, Silas e Tamara, por ministrarem e apoiar os ensaios laboratoriais e ainda oferecerem companheirismo, cafés e conselhos;*

*À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida a qual tornou possível minha dedicação exclusiva ao mestrado e mudança para Bauru;*

*Àqueles que me tornaram mais forte;*

*À Karina, por me mostrar uma nova forma de encarar a vida;*

*Mais uma vez, ao meu marido Itamar, por me apoiar incondicionalmente nessa jornada, por me encorajar e sonhar junto comigo.*

## RESUMO

BARROS, A. L. C. **Análise do comportamento de um solo arenoso não saturado afetado por um processo erosivo hídrico**. 2018. 888p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2018.

Países com clima tropical sofrem frequentemente com o fenômeno da erosão. Devido às condições climáticas, que variam entre longos períodos de seca e chuvas intensas, em conjunto com a ação antrópica, este fenômeno tem seu efeito acelerado e pode causar graves consequências para o meio ambiente. Apesar do grande número de trabalhos publicados sobre o fenômeno erosivo, pouco deles aborda esse assunto sobre uma perspectiva da Mecânica dos Solos Não Saturados, muito comum nas regiões de clima tropical. Esta dissertação apresenta uma caracterização hidromecânica de um solo não saturado coletado de uma microbacia da cidade de Bauru-SP afetada por um processo erosivo hídrico e, conjuntamente, avalia o mecanismo de erodibilidade ocorrido na área. Os parâmetros hidráulicos foram obtidos pelos de retenção da água no solo e permeabilidade. Os parâmetros mecânicos foram obtidos pelos ensaios de compressão triaxial e edométricos, ambos com sucção controlada. Os resultados desses ensaios mostraram a influência da sucção tanto nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo quanto nos de compressibilidade. A avaliação do mecanismo de erodibilidade foi realizada com base nos resultados encontrados nos ensaios de compressão triaxial e Inderbitzen, sendo esse último disponível no histórico de informações da microbacia. Essa avaliação constatou que o aumento da sucção pode contribuir contra o efeito da erosão uma vez que interfere na sua resistência através do intercepto de coesão. Entretanto, caso haja uma chuva intensa na área, essa contribuição pode durar poucos minutos, pois a microbacia não possui um sistema de drenagem eficiente e a camada superficial se saturada rapidamente e, conseqüentemente, perde o intercepto de coesão que estava disponível antes da chuva. O trabalho realizado evidencia um severo processo erosivo na microbacia Água Comprida e ainda permite um avanço nos estudos desse solo em termos do conceito da Mecânica dos Solos Não Saturados.

*Palavras-chave:* Erosão, Solo Não Saturado, Ensaio com controle de sucção, Inderbitzen.

## ABSTRACT

BARROS, A. L. C. **Analysis of the behavior of unsaturated sandy soil affected by a water erosion process.** 2018. 888p. Dissertation (Master Degree) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2018.

Countries with tropical climate often suffer from the erosion phenomenon. Due to the climatic conditions, which vary between long periods of drought and intense rains, together with the anthropic action, this phenomenon has its effect accelerated and can cause serious consequences for the environment. In spite of the great number of published works on the erosive phenomenon, few of them approach this subject on a perspective of the Mechanics of Unsaturated Soils, very common in the regions of tropical climate. This dissertation presents a hydromechanical characterization of an unsaturated soil collected from a microbasin of Bauru-SP city affected by an erosive water process and, together, evaluates the mechanism of erodibility occurred in the area. The hydraulic parameters were obtained by the soil-water retention and permeability. The mechanical parameters were obtained by triaxial and edometric compression tests, both with controlled suction. The results of these tests showed the influence of suction on both the shear strength and the compressibility parameters. The evaluation of the erodibility mechanism was carried out based on the results found in the triaxial and Inderbitzen tests, the latter being available in the history of the microbasin information. This evaluation found that increased suction may contribute to the erosion effect since it interferes with its resistance through the cohesion parameter. However, if there is heavy rainfall in the area, this contribution may last for a few minutes because the microbasin does not have an efficient drainage system and the surface layer is rapidly saturated and consequently loses the cohesion intercept that was available before the rain. The work carried out evidences a severe erosive process in the *Água Comprida* microbasin and still allows an advance in the studies of this soil in terms of the concept of the Mechanics of Unsaturated Soils.

Keywords: Erosion, Unsaturated Soil, suction control test, Inderbitzen.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Sistema trifásico de um solo não saturado (RODRIGUES, 2007).....	3
Figura 3.2- Variação da pressão na água em um perfil de solo não saturado (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).-	4
Figura 3.3- Esquema para elucidar o potencial de energia da água no solo (VILAR, 1996).....	5
Figura 3.4- Representação da sucção osmótica e matricial por Hillel (1971).....	7
Figura 3.5- Curva de retenção da água no solo (RODRIGUES, 2007).....	8
Figura 3.6- Arranjo para a técnica de papel filtro.....	11
Figura 3.7- Esquema da placa de sucção (LIBARDI, 1995).....	12
Figura 3.8- Esquema do equipamento de câmara de pressão (LIBARDI, 2005).....	13
Figura 3.9 - Tensores formados pela combinação das variáveis independentes (FREDLUNG e MORGENTERN, 1977).....	14
Figura 3.10 - Envoltória de resistência para solos não saturados (FREDLUND et al. 1978).....	15
Figura 3.11 - Envoltórias de resistência para diferentes sucções (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).....	16
Figura 3.12- Câmara triaxial adaptada para o ensaio de compressão triaxial não saturado (FREDLUND E RAHARDJO, 1993).....	17
Figura 3.13- Câmara edométrica adaptada para a T.T.E (MACHADO, 1995).....	19
Figura 3.14- Edômetro osmótico. (SOTO, 2004).....	20
Figura 3.15- Câmara edométrica adaptada para a técnica de vapor d'água (OLDECOP e ALONSO, 2001).....	20
Figura 4.1- Localização do município de Bauru ( <a href="http://www.bauru.sp.gov.br/bauru.aspx?m=2">http://www.bauru.sp.gov.br/bauru.aspx?m=2</a> ).....	30
Figura 4.2 - Microbacias do Rio Bauru (Modificado de <a href="http://lua8design.blogspot.com/2011/02/bauru-rios-e-afluentes.html">http://lua8design.blogspot.com/2011/02/bauru-rios-e-afluentes.html</a> ).....	30
Figura 4.3 - Média mensal da precipitação em Bauru/Brasil, entre 2001 e 2016.....	31
Figura 4.4 - Distribuição das Formações Geológicas pertencentes ao Grupo Bauru no estado de São Paulo. (modificado de IPT, 1981.....	32
Figura 4.5 — Localização da microbacia Água Comprida no município de Bauru ( <a href="http://hotsite.bauru.sp.gov.br/planodiretor/mapa_setores.aspx?im=1">http://hotsite.bauru.sp.gov.br/planodiretor/mapa_setores.aspx?im=1</a> ).....	34

Figura 4.6 - Mapa de susceptibilidade à erosão no município de Bauru (IPT, 1994).....	35
Figura 4.7 - Evolução da voçoroca e obras paliativas emergenciais. (CORGHI, 2003 e 2004).....	36
Figura 4.8 - Obra de contenção de erosão por dissipadores de energia. (CORGHI, 2004).....	37
Figura 4.9 - Reparação corretiva do leito do córrego e instalação da rede de esgoto (CORGHI, 2005).....	37
Figura 4.10 - Obras de recuperação da rede de galerias na microbacia Água Comprida ( <a href="http://www.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=28914#">http://www.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=28914#</a> ).....	37
Figura 4.11 - Testes de absorção de água e perda de massa de imersão (IDE, 2009).....	38
Figura 4.12 - Erodibilidade no tempo para inclinação de 15° de rampa.....	39
Figura 4.13 - Erodibilidade no tempo para inclinação de 30° de rampa.....	39
Figura 4.14 - Erodibilidade no tempo para inclinação de 45° de rampa.....	39
Figura 4.15 - Perda de solo acumulada no tempo para inclinação de 15° de rampa.....	40
Figura 4.16 - Perda de solo acumulada no tempo para inclinação de 30° de rampa.....	40
Figura 4.17 - Perda de solo acumulada no tempo para inclinação de 45° de rampa.....	40
Figura 4.18 - Perfil representativo da área estudada (RIYIS, 2012).....	42
Figura 5.1 – Ponto de amostragem com o córrego em azul ( <a href="https://earth.google.com/web">https://earth.google.com/web</a> ).....	43
Figura 5.2 - Amostra deformada.....	44
Figura 5.3 - Cravação da caixa metálica.....	45
Figura 5.4 - Proteção da amostra com parafina.....	45
Figura 5.5 - Amostra indeformada.....	45
Figura 5.6 - Moldagem do corpo de prova para a curva de retenção.....	46
Figura 5.7 - Corpo de prova para os ensaios de curva de retenção moldado.....	46
Figura 5.8 - Umedecimento dos CPs por capilaridade.....	47
Figura 5.9 - CPs expostos ao ar para secagem.....	47
Figura 5.10 - Materiais utilizados no ensaio de papel filtro.....	48
Figura 5.11 - Corpos de provas embrulhados - Técnica papel filtro.....	49
Figura 5.12 - Painel disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos Não Saturados da UNESP/Bauru (FERNANDES, 2016).....	51
Figura 5.13 - Sistema de câmara de pressão disponível na UNESP/Bauru.....	53
Figura 5.14 - Saturação da placa porosa de alto valor de entrada de ar.....	53
Figura 5.15 - Moldagem do CP para o ensaio de compressibilidade.....	54

Figura 5.16 - Corpo de prova moldado para o ensaio de compressibilidade.....	54
Figura 5.17 - Procedimento de montagem, carregamento e medida da variação axial.....	55
Figura 5.18 - Sistema do ensaio edométrico com sucção controlada.....	57
Figura 5.19 - Equipamento triaxial disponível no Laboratório de Mecânica dos solos da UNESP/Bauru.....	58
Figura 5.20 - Talhagem, embrulho e identificação do CP para ensaio de compressão triaxial.....	59
Figura 5.21 - Materiais e montagem da câmara triaxial (FERNANDES, 2016).....	60
Figura 5.22 - Parâmetro de saturação do CP-1.....	60
Figura 5.23 - Posicionamento e gotejamento dos CPs na fase de pré-imposição de pressão.....	64
Figura 5.24 - Base da câmara triaxial adaptada com uma pedra porosa de alto valor de entrada de entrada de ar....	64
Figura 5.25 - Impermeabilização radial do CP com parafina.....	67
Figura 5.26 - Camada drenante.....	67
Figura 5.27 - Medição do volume percolado.....	67
Figura 6.1 - Ensaio de Granulometria do solo.....	68
Figura 6.2 - Pontos experimentais da curva de retenção pela trajetória de secagem.....	70
Figura 6.3 - Pontos experimentais da curva de retenção pela trajetória de umedecimento.....	70
Figura 6.4 - Ajuste da curva de retenção de água sobre trajetória de secagem.....	72
Figura 6.5 - Ajuste da curva de retenção de água sobre trajetória de umedecimento.....	72
Figura 6.6 - Sobreposição dos ajustes para curvas de retenção de secagem e umedecimento .....	73
Figura 6.7 - Variação volumétrica da fase de consolidação.....	75
Figura 6.8 - Curvas tensão-deformação e suas respectivas variações volumétricas.....	76
Figura 6.9 - Envoltória de resistência do solo submetido à sucção de 0 kPa (saturado).....	79
Figura 6.10 - Envoltória de resistência solo submetido à sucção de 50 kPa.....	79
Figura 6.11 - Envoltória de resistência solo submetido à sucção de 200 kPa.....	80
Figura 6.12 - Envoltória de resistência do solo submetido à sucção maior que 15 MPa (seco ao ar).....	80
Figura 6.13 - Plano formado entre a interpolação das envoltórias de resistência e a sucção (sem escala).....	82
Figura 6.14 - Previsão do intercepto de coesão pelo ajuste hiperbólico de Vilar (2007).....	83
Figura 6.15 - Curvas de compressão edométrica do solo por sucção imposta.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Ensaios triaxiais para solos não saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).....	17
Tabela 3.2 - Métodos para controle e imposição de sucção em câmaras edométricas e suas principais vantagens e desvantagens (SOTO, 2004).....	21
Tabela 3.3 - Agentes causadores de erosão (modificado de LAL, 1990).....	23
Tabela 4.1 - Parâmetros de resistência do solo estudado - Cisalhamento Direto (Campos, 2014).....	41
Tabela 5.1 - Características dos ensaios triaxiais realizados com amostras saturadas. ....	63
Tabela 5.2 - Características dos ensaios de compressão triaxial realizados com sucção controlada .....	65
Tabela 6.1 - Massa específica dos sólidos, Limites de consistência do solo e Índices físicos.....	68
Tabela 6.2 - Parâmetros de ajustes de Van Genuchten (1980).....	73
Tabela 6.3 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento para diferentes sucções.....	81
Tabela 6.4 - Ajustes e parâmetros do solo não saturado.....	83
Tabela 6.5 - Parâmetros de compressibilidade do solo.....	85

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1.	Objetivo Geral: .....	2
2.2.	Objetivos Específicos: .....	2
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	3
3.1.	Solos não saturados .....	3
3.1.1.	<i>Potenciais de Energia</i> .....	5
3.1.2.	<i>Sucção</i> .....	6
3.1.3.	<i>Curvas de retenção de água no solo (SWRC)</i> .....	8
3.1.4.	<i>Técnicas para medida e controle de sucção</i> .....	9
3.1.4.1.	<i>Técnica de translação de eixos (T.T.E.)</i> .....	9
3.1.4.2.	<i>Papel Filtro</i> .....	10
3.1.4.3.	<i>Funil de Placa de Porosa</i> .....	11
3.1.4.4.	<i>Câmara de Pressão de Richards</i> .....	12
3.2.	Parâmetros mecânicos do solo não saturado .....	13
3.2.1.	<i>Tensões efetivas e suas variáveis</i> .....	13
3.2.2.	<i>Resistência ao cisalhamento do solo não saturado</i> .....	15
3.2.3.	<i>Ensaio de compressão triaxial com sucção controlada</i> .....	16
3.2.4.	<i>Ensaio edométrico com sucção controlada</i> .....	18
3.3.	Erosão .....	22
3.3.1.	<i>Tipos de erosão</i> .....	22
3.3.1.1.	<i>Erosão laminar</i> .....	24
3.3.1.2.	<i>Erosão linear</i> .....	24
3.3.2.	<i>Fatores condicionantes</i> .....	25
3.3.2.1.	<i>Condicionantes naturais</i> .....	26
3.3.2.2.	<i>Condicionantes antrópicos</i> .....	29
4.	ÁREA DE ESTUDO .....	30
4.1.	Climatologia .....	31
4.2.	Geologia e Geomorfologia .....	31
4.3.	Processos erosivos em Bauru .....	33
4.4.	Histórico de informações disponíveis da microbacia Água Comprida .....	35

4.5.	Trabalhos de investigação geotécnica .....	38
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1.	Amostragem .....	43
5.1.1.	<i>Amostras deformadas</i> .....	43
5.1.2.	<i>Amostras indeformadas</i> .....	44
5.2.	Ensaio de caracterização .....	45
5.3.	Ensaio de curva de retenção de água (SWRC) .....	45
5.3.1.	<i>Moldagem dos Corpos de prova</i> .....	46
5.3.2.	<i>Técnica de Papel Filtro</i> .....	46
5.3.3.	<i>Funil de Placa de Porosa</i> .....	50
5.3.4.	<i>Câmara de Pressão</i> .....	51
5.4.	Ensaio de compressibilidade.....	53
5.4.1.	<i>Moldagem dos corpos de prova</i> .....	54
5.4.2.	<i>Ensaio edométrico convencional</i> .....	54
5.4.3.	<i>Ensaio edométrico com sucção controlada</i> .....	55
5.5.	Ensaio de resistência ao cisalhamento .....	57
5.5.1.	<i>Moldagem dos corpos de prova</i> .....	58
5.5.2.	<i>Ensaio de compressão triaxial convencional</i> .....	59
5.5.3.	<i>Ensaio de compressão triaxial com sucção controlada</i> .....	63
5.6.	Ensaio de permeabilidade.....	66
6.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	68
6.1.	Caracterização e classificação .....	68
6.2.	Propriedades hidráulicas.....	69
6.2.1.	<i>Curvas de retenção da água no Solo</i> .....	69
6.2.2.	<i>Condutividade Hidráulica</i> .....	74
6.3.	Propriedades mecânicas.....	74
6.3.1.	<i>Resistência ao cisalhamento</i> .....	74
6.3.2.	<i>Envoltórias de resistência</i> .....	78
6.3.3.	<i>Ensaio edométrico com sucção controlada</i> .....	84
6.4.	Avaliação do mecanismo da erodibilidade do solo a partir dos resultados experimentais e histórico de informações anteriores.....	85
7.	CONCLUSÕES .....	88
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

# 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a comunidade geotécnica tem grande interesse no estudo do comportamento de solos presentes em regiões áridas e semiáridas, onde vive cerca de 60% da população mundial (OLIVEIRA, 2004). Nessas regiões os solos normalmente apresentam baixa umidade nos seus horizontes superficiais e apresentam-se não saturados, às vezes até grandes profundidades (RODRIGUES, 2007).

O solo não saturado se comporta de uma maneira diferente daquela prevista na Mecânica dos Solos clássica. Sua constituição dá-se através de um sistema trifásico (ar-sólidos-água) responsável pelo aparecimento da sucção, que nada mais é do que a avidez que o solo tem por água.

Ainda nas regiões áridas e semiáridas é comum serem encontradas feições erosivas, tanto pela condição climática quanto pelas características e formação geológica que possuem. Coincidentemente, a maioria dessas regiões pertence aos países em desenvolvimento os quais não possuem um planejamento urbano e, pela falta de recursos financeiros, não investem em sistemas de prevenção contra fenômenos erosivos o que acaba ocasionando um maior número de erosões em seus municípios.

Os estudos a cerca dos solos erosivos, em sua grande maioria, fazem a análise da do mecanismo de erodibilidade a partir do conceito da mecânica dos solos tradicional. Mas, no caso de uma região árida ou semiárida com a ocorrência desse fenômeno, faz-se necessário um estudo específico que leve em consideração a condição não saturada do solo. O município Bauru é um exemplo de região que possui muitos casos de feições erosivas e, em virtude de ciclos sazonais de umedecimento e secagem e suas características e formação geológica, esse fenômeno ocorre em maciços de solo não saturado.

Esse trabalho tem como finalidade estudar, sobre uma perspectiva da Mecânica dos Solos Não Saturados, o comportamento de um solo arenoso proveniente de uma feição erosiva existente na cidade de Bauru-SP. Para isso são obtidos parâmetros hidromecânicos que possam auxiliar na análise quantitativa do mecanismo de erodibilidade e em futuras modelagens para prever e interpretar o comportamento desse solo ou de qualquer outro que tenha características de similares. Avalia-se ainda o mecanismo de erodibilidade com base nos ensaios de Inderbitzen obtidos por Campos (2014).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral:

- Caracterização hidromecânica de um material arenoso proveniente da formação do Grupo Bauru tendo em vista a determinação de parâmetros mecânicos e hidráulicos do solo para interpretação de processos erosivos correntes nesse tipo de material geológico.
- Avaliar o mecanismo de erodibilidade com base nos ensaios experimentais obtidos e no histórico de informações disponíveis da região.

### 2.2. Objetivos Específicos:

- Obter parâmetros hidráulicos por meio de ensaios de curva de retenção da água no solo e Permeabilidade.
- Obter parâmetros mecânicos de compressibilidade por meio de ensaios edométricos com sucção controlada e de resistência ao cisalhamento por meio de ensaios de compressão triaxial com sucção controlada.
- Realizar uma interpretação conjunta dos dados obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento com sucção controlada e nos ensaios de erodibilidade por Inderbitzen para avaliação do mecanismo de erodibilidade.



### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. Solos não saturados

Existem situações em que os solos se comportam de uma maneira diferente daquela prevista na mecânica do solo clássica, pois esta foi desenvolvida para os solos de países de clima frio e temperado. Entretanto, em regiões áridas e semiáridas, é comum acontecer maior evaporação do que precipitação, o que ocasiona a formação de solos com deficiência de umidade, chamados de solos não saturados.

No Brasil, em decorrência do clima tropical, é comum encontrarmos maciços de solos não saturados, frequentemente em profundidades consideráveis.

Um solo saturado constitui-se por um sistema bifásico de fases líquida e sólida, já um solo não saturado, como ilustra a Figura 3.1, é constituído por um sistema trifásico composto por fases líquida, sólida e gasosa.

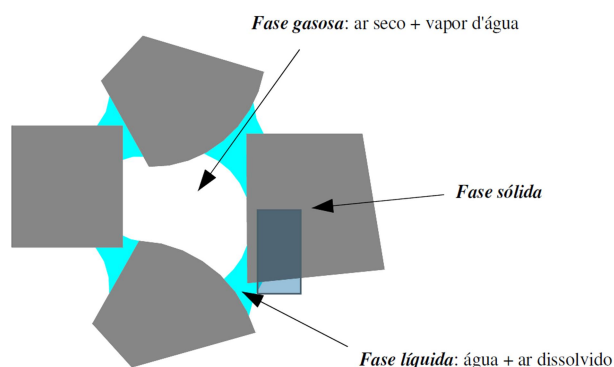


Figura 3.1 - Sistema trifásico de um solo não saturado (RODRIGUES, 2007).

A principal característica presente nos solos não saturados é a ocorrência da sucção em seus poros, que é uma pressão isotrópica na água intersticial, originada pela interação líquido-sólidos-gás, e depende basicamente da composição mineralogia, da massa específica, da distribuição dos poros e do conteúdo de água do solo. Destaca-se também a condutividade, que passa a depender do teor de umidade presente nos poros (POPI, 1982).

Ao comparar os solos saturados aos não saturados é possível observar diferenças, principalmente do ponto de vista de suas propriedades mecânicas, como: condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

Nos últimos anos, o estudo dos solos não saturados tem ganhado grande visibilidade na comunidade geotécnica, em decorrência das técnicas desenvolvidas recentemente que possibilitam a imposição da sucção.

Segundo Vieira e Marinho (2001) o clima afeta o balanço hídrico do solo e é o responsável pelo surgimento da sucção, devido aos ciclos alternados de umedecimento e secagem, que regulam a troca de água através da evaporação e precipitação.

Em regiões de clima tropical, que variam entre longos períodos de seca e chuvas intensas, é comum que os horizontes mais superficiais não estejam completamente saturados até a profundidade do lençol freático.

As camadas mais superficiais desse horizonte não saturado (zona ativa) interagem diretamente com a atmosfera, variando sua umidade conforme a condição hidrostática. Caso haja evaporação, a umidade do solo diminui e a pressão neutra terá comportamento ascendente. Já com a precipitação, a umidade do solo aumenta e a pressão neutra passa a ter um comportamento descendente.

Ainda no horizonte não saturado encontra-se a franja capilar, região imediatamente acima do nível d'água, que permanece saturada independente do comportamento da pressão neutra, pois tem a saturação promovida pela capilaridade dos poros do solo.

A Figura 3.2 ilustra a variação da pressão de água num perfil representativo.

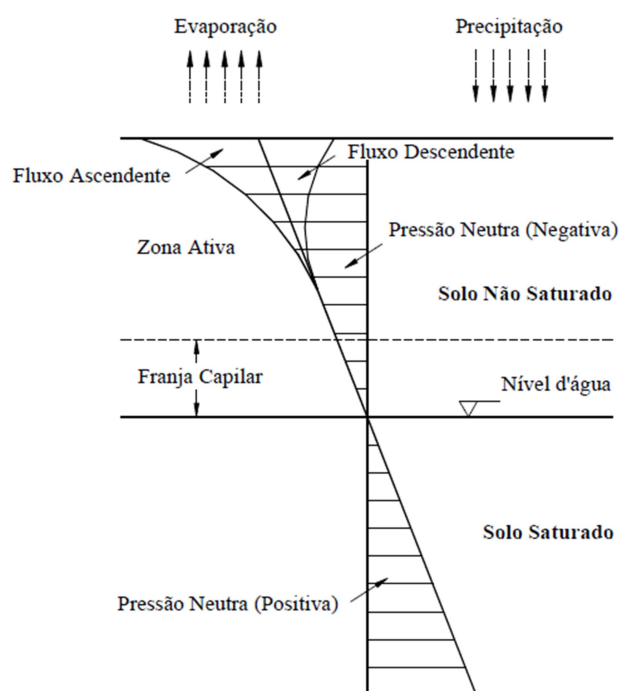


Figura 3.2 - Variação da pressão na água em um perfil de solo não saturado (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

### 3.1.1. Potenciais de Energia

Para entender o comportamento da água intersticial no solo, utilizar-se o conceito do estado energético presente na partícula d'água.

Sabe-se que a energia total é formada pela energia cinética mais a potencial. Devido à velocidade da água ser extremamente baixa no interior dos solos, considera-se nula a energia cinética, restando, assim, apenas a energia potencial para reger o estado energético da água no solo.

Entende-se o potencial de energia da água no solo ( $\psi$ ) como o trabalho necessário para transportar, reversível e isotermicamente, uma parcela infinitesimal de água de um reservatório A, sob pressão atmosférica, até uma cota de interesse no reservatório B, sujeito à pressão  $u_B$  (BAVER et al. 1972; HILLEL, 1971; MARSHALL et al. 1996).

A Figura 3.3 apresenta um esquema para elucidar o potencial de energia da água no solo.

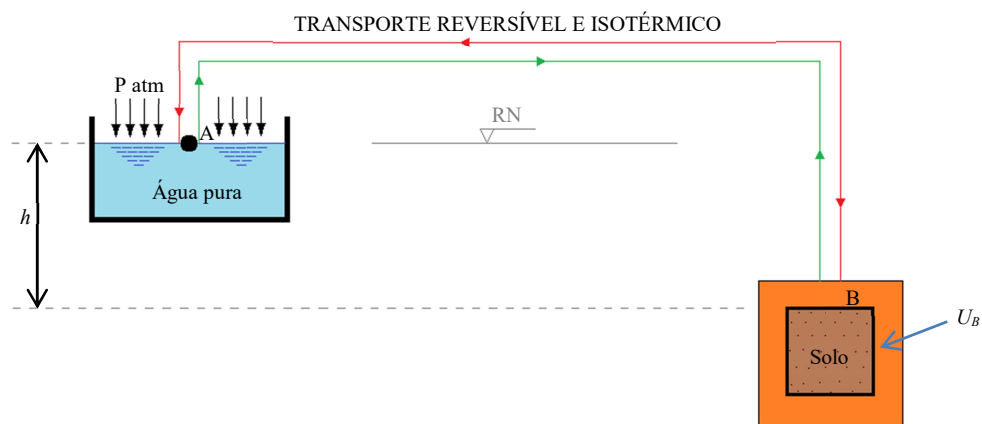


Figura 3.3 - Esquema para elucidar o potencial de energia da água no solo (VILAR, 1996).

O potencial de energia total ( $\psi$ ) deve levar em conta a posição da partícula d'água, o soluto, os capilares e adsorção do solo e a pressão exercida na água. Assim, o potencial total é composto pela soma dos potenciais gravitacional ( $\psi_g$ ), osmótico ( $\psi_{os}$ ) matricial ( $\psi_m$ ) e pneumático ( $\psi_{pn}$ ). (Eq. 3.1)

$$\psi = \psi_g + \psi_{os} + \psi_m + \psi_{pn} \quad (3.1)$$

### 3.1.2. Sucção

A sucção pode ser descrita como a avidéz por água que um meio poroso não saturado possui e depende basicamente da mineralogia, teor de umidade e porosidade do solo (RODRIGUES, 2007). Esta avidéz é retratada por Marinho (2005) como a energia que o poro tem de absorver água que é resultante da interação entre solo-ar-água.

Seu valor depende da soma das sucções osmótica ( $\psi_{os}$ ), originado pela presença de solutos na água, e matricial ( $\psi_m$ ), proveniente da capilaridade e adsorção do solo (3.2 e 3.3).

$$\psi = \psi_{os} + \psi_m \quad (3.2)$$

$$s = s_{os} + s_m \quad (3.3)$$

E pode ser representada também pela Lei Psicrométrica, dependendo da umidade relativa do ar (Eq. 3.4).

$$\psi = s = \frac{-R \cdot T}{V_w \cdot M_w} \ln \left( \frac{p_v}{p_{vs}} \right) \quad (3.4)$$

Em que:

$\psi$  e  $s$ : Sucção total;

$R$ : constante dos gases ideais;

$T$ : temperatura absoluta;

$V_w$ : volume específico da água;

$M_w$ : massa molecular da água;

$p_v$ : pressão parcial de vapor

$p_{vs}$ : Pressão de vapor de saturação.

Através da Figura 3.4, Hillel (1971) demonstra a sucção osmótica e matricial como parcelas da sucção total.

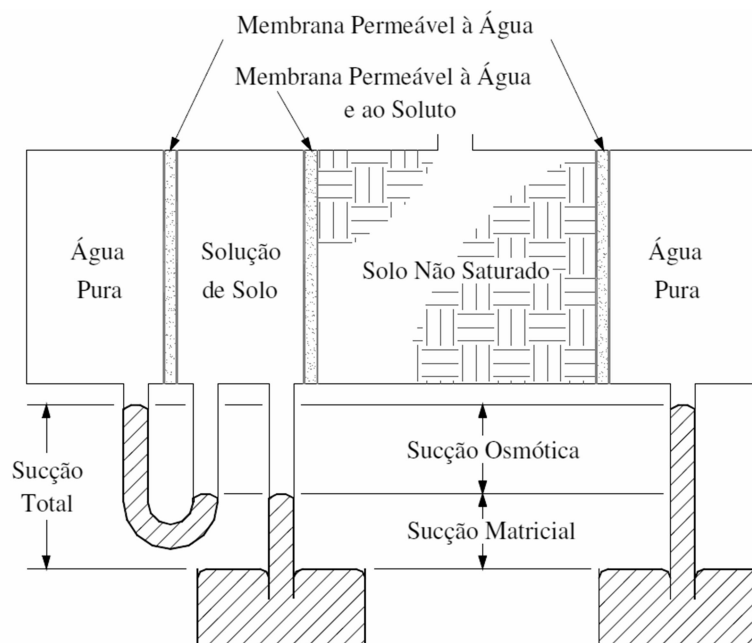


Figura 3.4 - Representação da sucção osmótica e matricial por Hillel (1971).

A sucção matricial é representada pela ascensão do nível de mercúrio entre os reservatórios de água pura e solução de solo, separados por uma membrana permeável à água e ao soluto. A sucção osmótica, por sua vez, é representada pela ascensão do nível de mercúrio entre os reservatórios de água pura, separados por uma membrana permeável à água.

Entretanto, ao considerar a água do solo sem força osmótica, isto é, quando não existe diferença de concentrações de solutos entre água externa e intersticial, é possível desprezar a parcela de sucção osmótica e considerar somente o efeito da sucção matricial. Assim, a sucção matricial tem sido adotada como a fonte mais significativa que interfere no comportamento dos solos não saturados. (ALONSO et al. 1987; FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A sucção matricial é calculada pela diferença entre a pressão de ar ( $u_a$ ) e a pressão de água ( $u_w$ ) (Eq. 3.5).

$$s = u_a - u_w \quad (3.5)$$

Seu valor depende da pressão negativa que a água intersticial possui em decorrência da capilaridade (tratando-se de poros relativamente grandes, como areia) ou adsorção (para solos com poros pequenos e alta capacidade catiônica, como as argilas).

### 3.1.3. Curvas de retenção de água no solo (SWRC)

A curva de retenção de água nos solos, também chamada de curva característica solo-água (SWRC), é fundamental para o estudo de solos não saturados, por se tratar da única forma de relacionar a sucção com o conteúdo de água dos solos através de índices físicos como: umidade gravimétrica ( $w$ ), umidade volumétrica ( $\theta$ ) ou grau de saturação ( $S_r$ ). Além disso, a curva tem se mostrado diretamente relacionada aos parâmetros de resistência e condutividade hidráulica do solo, como mostrados nos trabalhos de Van Genuchten (1980) e Fredlund (1996).

Geralmente sua representação dá-se em escala logarítmica para o eixo da sucção, que pode ser expressa tanto em total quanto em matricial, e linear para o eixo do conteúdo de água no solo. Seu traçado ocorre pela ligação de diversos pares ordenados de sucção e teor de umidade, através de modelos matemáticos empíricos.

Como na natureza o solo está exposto a períodos de seca e chuvas intensas, é possível que um único solo apresente duas curvas de retenção distintas devido ao fenômeno de histerese que ocorre entre as trajetórias de umedecimento e secagem (FREDLUND e XING, 1994). Estas trajetórias indicam condições limites de sucção que podem ocorrer em campo, ao longo das estações do ano.

A Figura 3.5 apresenta as curvas de retenção de água, para ciclos de umedecimento e secagem, de um solo argiloso e um arenoso. E um solo com distribuição de poros bimodal.

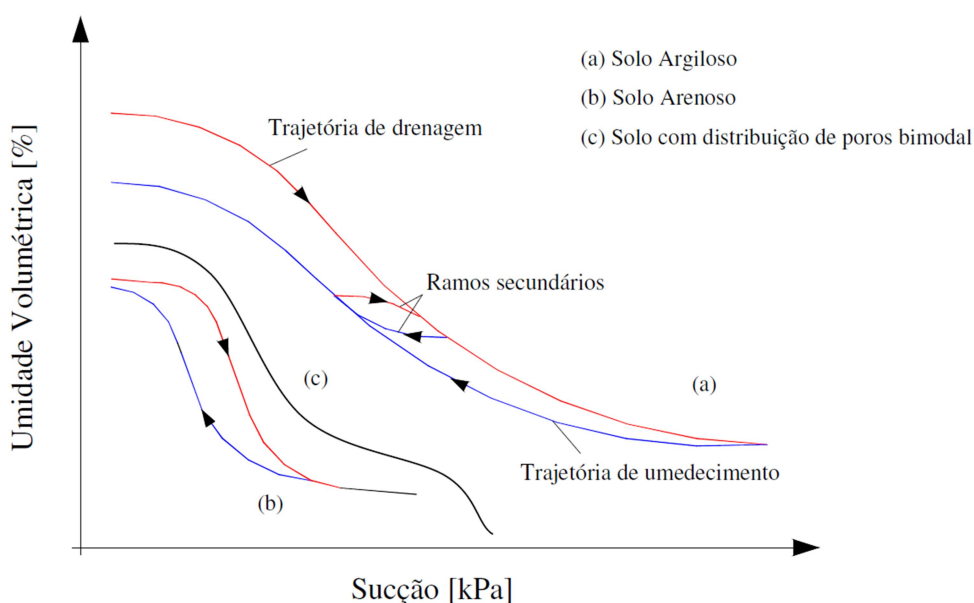


Figura 3.5 - Curva de retenção da água no solo (RODRIGUES, 2007).

O ramo secundário representa o caminho da sucção entre as trajetórias de umedecimento e drenagem. Vivian (2008) cita que as curvas podem apresentar diferentes formatos que dependem da matriz e do processo de formação do solo.

Diversos autores desenvolveram equações empíricas para a obtenção da curva de retenção baseadas em seu formato e tamanho dos poros. Algumas dessas equações estão presentes nos trabalhos de Gardner (1958), Brooks e Corey (1964) e Fredlund e Xing (1994). Entretanto, a equação mais difundida no Brasil é a proposta por Van Genuchten (1980) (Eq. 3.6).

$$w = w_r + (w_s - w_r) \cdot \left( \frac{1}{1 + ((\alpha \cdot s)^n)^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)}} \right) \quad (3.6)$$

Em que:

$w$ ,  $w_r$  e  $w_s$ : Teores de umidade total, residual saturado e gravimétrico;

$\alpha$  e  $n$ : Parâmetros de ajuste do solo;

$s$ : sucção do solo.

As curvas de retenção de água no solo podem ser obtidas através das trajetórias de secagem e umedecimento, mediante as técnicas de papel filtro, funil de placa porosa e câmara de pressão, descritas a seguir.

### **3.1.4. Técnicas para medida e controle de sucção**

#### **3.1.4.1. Técnica de translação de eixos (T.T.E.)**

Para fazer a medida e o controle da sucção imposta ao solo durante ensaios, faz-se útil a técnica de translação de eixos, que consiste em uma mudança do referencial de pressão por meio da aplicação de uma pressão de ar ( $u_a$ ) no interior da câmara e mantendo a pressão da água ( $u_w$ ) igual à pressão atmosférica. A placa porosa de alto valor de entrada de ar permite apenas o fluxo de água e não o de ar. Assim, o aumento da pressão no ar provoca um aumento equivalente na pressão da água, que corresponde à sucção matricial do solo.

Sabe-se também, que a sucção matricial é diferença entre a pressão no ar imposta e a pressão hidráulica medida (GOMES, 2007).

Dessa forma, chega-se a conclusão que a sucção matricial corresponde ao acréscimo de pressão de ar imposto na câmara.

$$\psi_m = u_a - u_w = (P_{atm} + \Delta P) - P_{atm} \quad (3.7)$$

$$\text{Portanto: } \psi_m = \Delta P$$

Em que:

$\psi_m$  : sucção matricial;

$u_a$ : pressão do ar nos poros do solo;

$u_w$ : pressão da água nos poros do solo;

$\Delta P$ : acréscimo de pressão de ar imposta no interior da câmara

#### 3.1.4.2. *Papel Filtro*

A técnica de papel filtro determina de maneira indireta a sucção, através de medidas do teor de umidade do papel e do solo, após o papel alcançar o equilíbrio de potencial entre a amostra do solo e o papel (DE CAMPOS et al. 1992). Sua regulamentação é feita pela ASTM D5298 (2010), a qual aconselha usar o esta técnica para valor de sucção entre 10 a 10<sup>5</sup> kPa.

Dentre os métodos conhecidos para se determinar a sucção, esta técnica é a única que pode medir a sucção total (sem contato direto entre o papel e o solo) e a sucção matricial (com contato direto entre o papel e o solo).

O método consiste em colocar amostras de solo, umedecidas através de umedecimento ou secagem, em contato com um papel de características de retenção conhecidas, em ambiente hermético. Para isso os papéis são posicionados no topo e base da amostra e selados com filme plástico e discos de PVC para aumentar o contato com o solo (Fig. 3.6).

Quando este solo entra em contato com o material poroso, que é capaz de reter umidade, a água é transferida do solo para o papel até que seja estabelecido o equilíbrio de potencial. O teor de umidade do papel filtro é posteriormente determinado e o potencial matricial na amostra é inferido a partir de uma curva de calibração do papel, a



qual relaciona o potencial e o teor de água no papel. Portanto, a sucção matricial é obtida através de uma curva de calibração do papel.

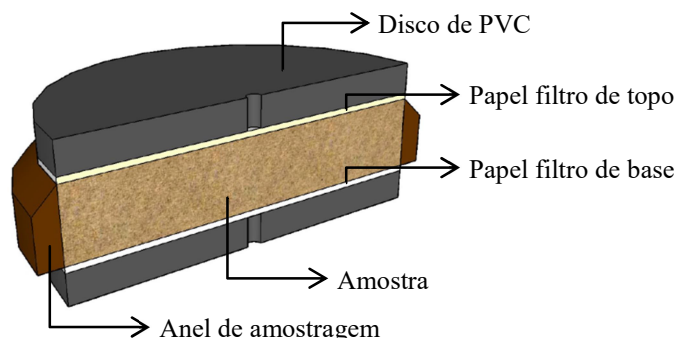


Figura 3.6 - Arranjo para a técnica de papel filtro.

Bicalho (2007) cita que o papel filtro mais comumente usado é o Whatman n° 42. Sua curva de calibração encontra-se no trabalho de Chandler et al. (1992) (Eq. 3.8 e 3.9).

$$s = 10^{605 - 2,48 \log(w_{papel})}; \text{ se } w_{papel} \geq 47\% \quad (3.8)$$

$$s = 10^{4,48 - 0,0622(w_{papel})}; \text{ se } w_{papel} < 47\% \quad (3.9)$$

Em que:

$s$ : Sucção (kPa);

$w_{papel}$ : Umidade do papel filtro Whatman n° 42 (%)

### 3.1.4.3. Funil de Placa de Porosa

O funil de placa porosa, ou placa de sucção, consiste num funil com uma placa porosa conectada a um tubo flexível que por sua vez é acoplado a um reservatório simples, cuja altura é regulável. Nessa técnica, é possível impor a sucção matricial através gradientes de altura elevando ou abaixando o nível d'água do reservatório.

A Figura 3.7 ilustra o esquema do funil de placa porosa.

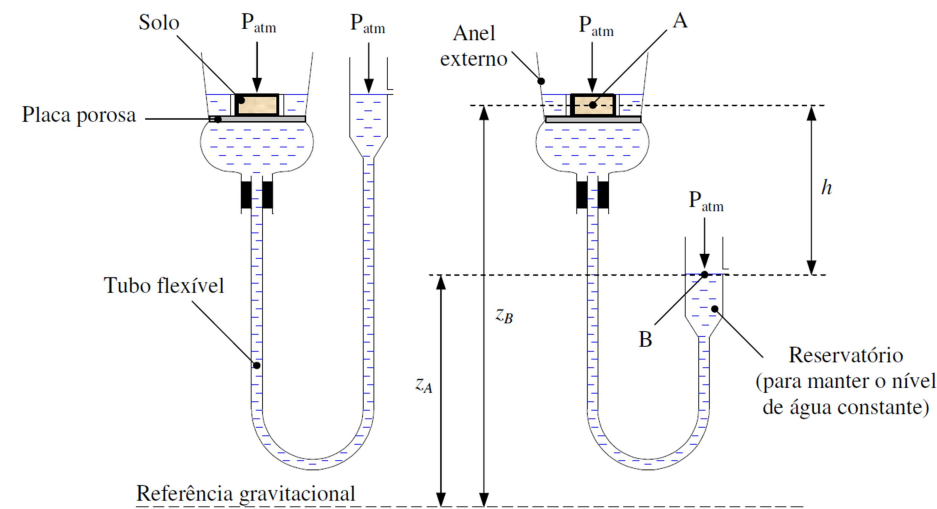


Figura 3.7- Esquema da placa de sucção (LIBARDI, 1995).

Por meio da Figura 3.7, é possível verificar que a sucção ( $s$ ) é determinada através do gradiente altimétrico que atua no solo e pode ser obtida através da Equação 3.10. Geralmente, a sucção imposta não ultrapassa o valor de 10 kPa.

$$s = g \cdot h \quad (3.10)$$

Em que:

$s$ : Sucção (kPa);

$g$ : Aceleração da gravidade;

$h$ : Distância entre o ponto A e B.

#### 3.1.4.4. Câmara de Pressão de Richards

A câmara de pressão se trata de uma câmara que opera hermeticamente, contendo em seu interior uma placa porosa de alto valor de entrada de ar, a qual é a peça chave para o funcionamento dessa técnica, pois a sua presença permite empregar a translação de eixos desenvolvida por Hilf (1956). Seu uso é recomendado para sucção entre os valores de 20 a 1500 kPa (LIBARDI, 2005).

Para o funcionamento da câmara de pressão um corpo de prova umedecido por umedecimento ou secagem (de acordo com a trajetória escolhida), é colocado sobre a pedra porosa de alto valor de entrada de ar previamente saturada. A câmara possui um sistema de ar pressurizado e um manômetro, por onde é possível impor a pressão de ar

desejada e medi-la. Dessa forma, ocorre o fluxo de água intersticial até alcançar o equilíbrio potencial.

A Figura 3.8 ilustra o esquema da câmara de pressão.

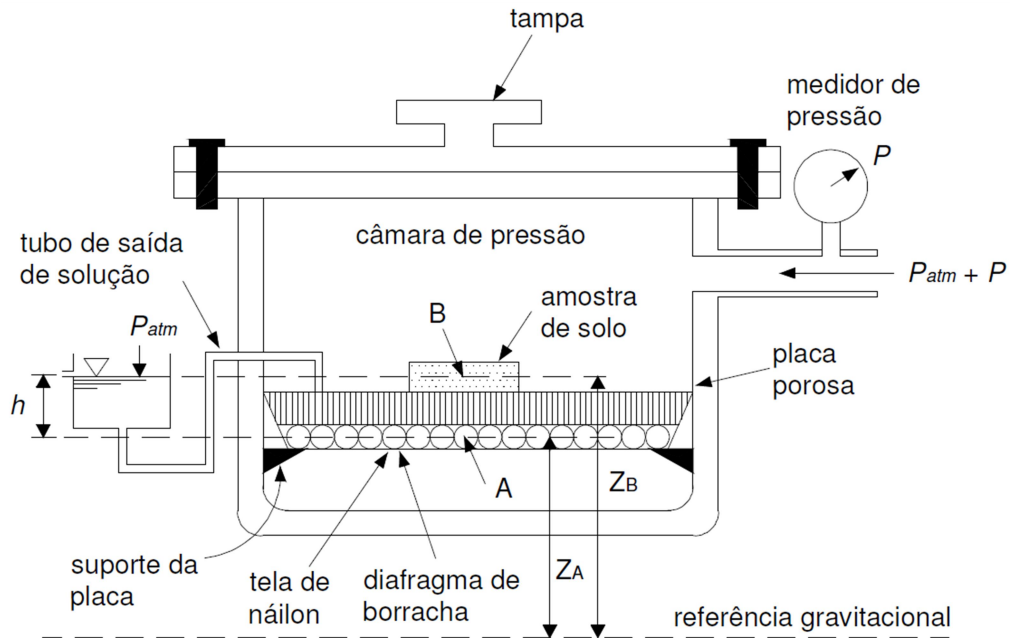


Figura 3.8 - Esquema do equipamento de câmara de pressão (LIBARDI, 2005).

## 3.2. Parâmetros mecânicos do solo não saturado

### 3.2.1. Tensões efetivas e suas variáveis

Por se tratar de um solo não saturado, onde os vazios do solo estão preenchidos não só de água (como considera o princípio de Terzaghi de 1936), mas também de ar, o cálculo das tensões efetivas deve levar em conta não só a tensão total, mas também a sucção que ocorre nesse solo. Pensando nisso, vários autores propuseram equações para quantificar essa tensão, muitas delas baseadas no princípio de Terzaghi, algumas delas podem ser encontradas nos trabalhos de Croney et al. (1958), Lambe (1960), Aitchison (1961), Jennings (1961), Richards (1966) e Aitchison (1973). Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a equação mais empregada é a proposta por Bishop (1959) (Eq. 3.11).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (3.11)$$

Em que:

$(\sigma - u_a)$  : Tensão normal líquida;

$(u_a - u_w)$ : Sucção matricial;

$\chi$ : Parâmetro dependente do grau de saturação do solo.

O parâmetro  $\chi$  pode ser encontrado nos trabalhos de Donald (1961), para siltes e Blight (1961) para solos compactados. Seus valores variam de zero (solo saturado) a um (seco) e dependem do grau de saturação, tipo de solo e ciclos de secagem e umedecimento do solo.

Fredlund (1979) considera a tensão normal líquida e a sucção matricial como variáveis independentes que geram o estado de tensão dos solos. Essas variáveis são úteis para a previsão do comportamento mecânico dos solos não saturados.

A preferência do uso das variáveis independentes na avaliação da tensão efetiva se dá por ser mais simples, pois cada uma pode ser avaliada separadamente. Além disso, a pressão de ar é usualmente igual à atmosférica, ou seja, considerada nula em termos de pressão relativa.

Na Figura 3.9 ilustra-se o estado de tensão em um elemento de solo tridimensional com tensões normais líquidas e tensões cisalhantes.

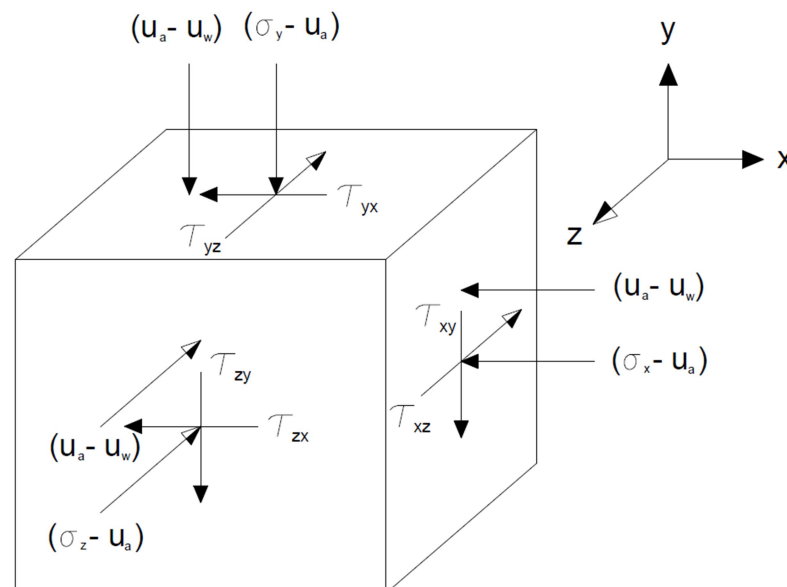


Figura 3.9 - Tensores formados pela combinação das variáveis independentes (FREDLUNG e MORGENSTERN, 1977).

### 3.2.2. Resistência ao cisalhamento do solo não saturado

A partir do critério de Mohr-Coulomb, Fredlund et al. (1978) propõe a Equação 3.12 para a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado.

$$\tau' = c' + (\sigma - u_a) \cdot \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b \quad (3.12)$$

Em que  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno correspondente às variações da tensão normal líquida e  $\phi^b$  é ângulo de atrito interno correspondente às variações da sucção matricial. A Figura 3.10 mostra a representação tridimensional da equação.

Em 1979, os mesmos autores analisaram, por meio de ensaios triaxiais com sucção controlada, que os ângulos  $\phi'$  e  $\phi^b$  apresentam um comportamento linear como incremento das variáveis de tensão.

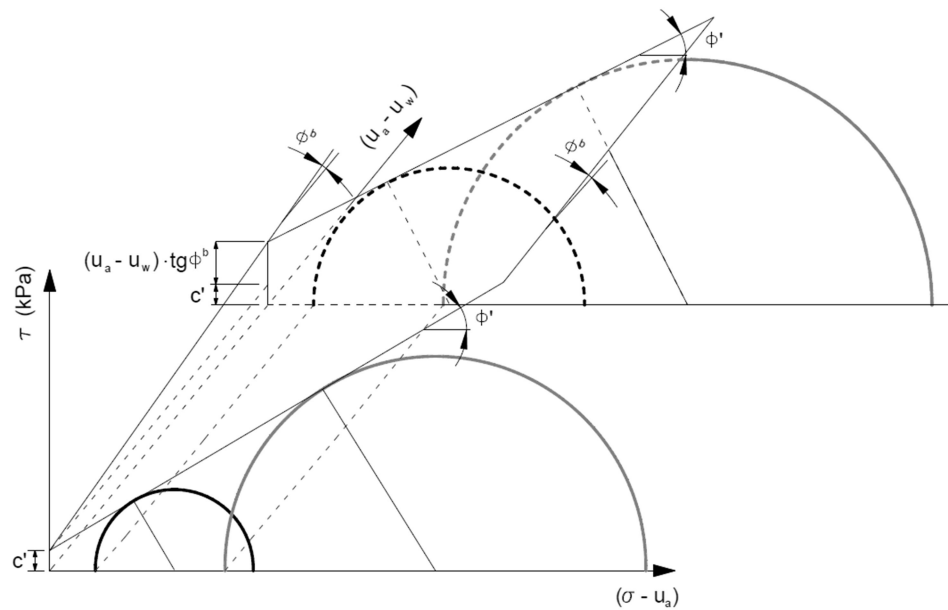


Figura 3.10 - Envoltória de resistência para solos não saturados (FREDLUND et al. 1978).

Ho e Fredlund (1982) sugerem que a parcela referente à sucção matricial  $[(u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b]$  seja parte contribuinte do intercepto de coesão do solo. Dessa forma, consideram que o intercepto de coesão total é composto pela soma do intercepto de efetivo mais a parcela da sucção matricial (Eq. 3.13).

$$c = c' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b \quad (3.13)$$

Assim, os autores chegaram à seguinte equação para a tensão cisalhante:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \cdot \text{tg} \phi' \quad (3.14)$$

A Figura 3.11 ilustra envoltórias de resistência para diferentes valores de sucção.

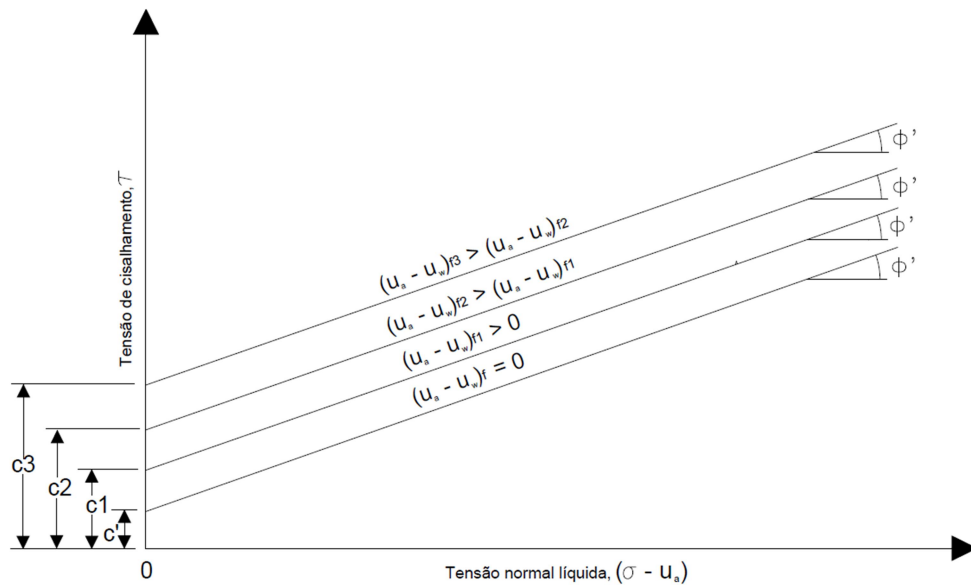


Figura 3.11 - Envoltórias de resistência para diferentes sucções (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

### 3.2.3. Ensaio de compressão triaxial com sucção controlada

Um dos ensaios mais utilizados para a determinação dos parâmetros de resistência do solo não saturado é o ensaio de compressão triaxial com controle de sucção. Para isso, é necessário utilizar técnicas que possibilitem controlar a pressão na água. Nesse sentido, faz-se necessário uma adaptação na câmara triaxial convencional, colocando uma pedra porosa com alto valor de entrada de ar em sua base. Através dessa pedra, é possível aplicar a técnica de translação de eixos exposta no item 3.1.4.1 e, assim, controlar a sucção no solo.

A Figura 3.12 ilustra o arranjo utilizado em ensaios de compressão triaxial para solos não saturados.

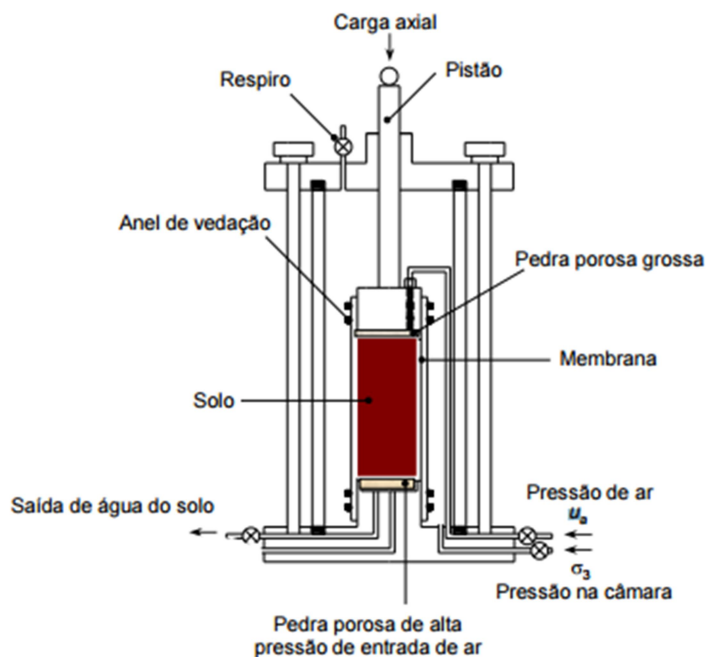


Figura 3.12 - Câmara triaxial adaptada para o ensaio de compressão triaxial não saturado (FREDLUND E RAHARDJO, 1993).

Fredlund e Rahardjo (1993) descrevem os diferentes tipos de ensaios triaxiais para solos não saturados da seguinte maneira:

Tabela 3.1 - Ensaios triaxiais para solos não saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Tipos de ensaios	Consolidação	Cisalhamento				
		Drenagem		C: Controlado/ M: Medido		
		$u_a$	$u_w$	$u_a$	$u_w$	$\Delta V$
Consolidado Drenado (CD)	Sim	Sim	Sim	C	C	M
Umidade Constante (CW)	Sim	Sim	Não	C	M	M
Consolidado Não Drenado (CU)	Sim	Não	Não	M	M	-
Não Consolidado Não Drenado (UU)	Não	Não	Não	-	-	-
Compressão Simples	Não	Não	Não	-	-	-

- Consolidado Drenado (CD):** A consolidação é realizada pela aplicação de uma tensão normal líquida ( $\sigma - u_a$ ) e sucção matricial ( $u_a - u_w$ ). Em seguida, o carregamento axial é aplicado mantendo-se as válvulas de ar e água abertas. Durante o cisalhamento, as pressões desses fluidos são mantidas constantes e mede-se a variação do volume da amostra. É importante frisar que a velocidade do carregamento axial deve ser baixa para possibilitar a dissipação do excesso de poropressão. No fim, é possível traçar a envoltória de resistência efetiva para sucção aplicada.

- **Umidade Constante (CW):** A consolidação é feita de maneira análoga ao ensaio CD. O carregamento axial é aplicado mantendo apenas a válvula de ar aberta. Durante o cisalhamento, a pressão do ar é controlada enquanto a pressão da água é medida. A variação do volume da amostra também é medida. A envoltória obtida por esse ensaio se dá a partir de tensão normal líquida ( $\sigma - u_a$ ) constante e diferentes valores de sucções.
- **Consolidado Não Drenado (CU):** A consolidação é feita de maneira análoga ao ensaio CD. O carregamento axial é aplicado mantendo-se as válvulas de ar e água fechadas. Durante o cisalhamento, as pressões desses fluidos sofrem alterações (devido à condição não drenada) e são medidas para que, no fim, seja traçada a envoltória de resistência pela sucção alcançada.
- **Não Consolidado Não Drenado (UU):** Neste tipo de ensaio a fase de consolidação não existe e o estado de tensão inicial é adquirido pela aplicação de  $\sigma$ ,  $u_a$  e  $u_w$ . Devido à condição não drenada e à aplicação da tensão confinante, as pressões de  $u_a$  e  $u_w$  sofrem acréscimos e pode ocorrer variação do volume da amostra de solo com consequente alteração do seu grau de saturação. Neste ensaio, não se costuma medir os valores de  $u_a$  e  $u_w$  e a envoltória é traçada em termos de tensões totais.
- **Compressão Simples:** Este tipo de ensaio é uma particularidade do ensaio não drenado o qual a tensão axial é aplicada rapidamente de modo a impossibilitar a drenagem e perda de umidade da amostra de solo. No início do ensaio a pressão da água é negativa e a do ar é nula (atmosférica).

#### 3.2.4. Ensaio edométrico com sucção controlada

Para obtenção dos parâmetros de compressibilidade dos solos não saturados são utilizados geralmente ensaios edométricos com controle de sucção. Técnicas como a de Translação de eixos, Osmótica e Vapor d'água podem ser utilizadas, dependendo do tipo de solo e da faixa de sucção analisada.

Escario e Saez (1986) elaboraram uma câmara edométrica adaptada com uma pedra porosa com alto valor de entrada de ar, a qual fosse possível aplicar a técnica de translação de eixos já exposta no item 3.1.4.1. A compressão da amostra não saturada é



realizada pela aplicação de cargas e a sucção é controlada pela pressão de ar  $u_a$  imposta no interior da câmara. Essa técnica possibilita a medição direta da sucção matricial, que é equivalente à pressão de ar imposta no interior da câmara.

A Figura 3.13 apresenta um modelo de edômetro preparado para a T.T.E.

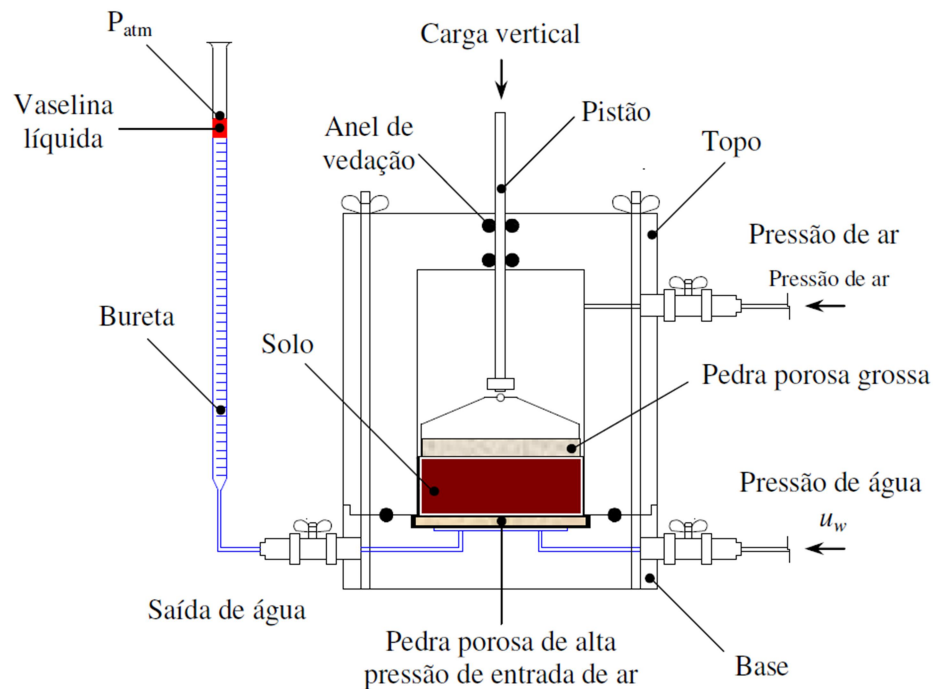


Figura 3.13 - Câmara edométrica adaptada para a T.T.E. (MACHADO, 1995).

Já a técnica Osmótica para imposição e controle da sucção se dá através do equilíbrio osmótico entre o solo e certa quantidade de solução de polietileno de glicol (PEG). A diferença entre os potenciais total gera uma movimentação de água entre e o maior para o menos potencial até que o equilíbrio seja alcançado. Soto (2004) cita que esta técnica tem a vantagem de ser possível realizar ensaios com sucção até 10000 kPa e não ocorrer a perturbação da amostra devido a influência da pressão de ar, que ocorre na T.T.E. A Figura 3.14 ilustra um esquema de uma edômetro osmótico.

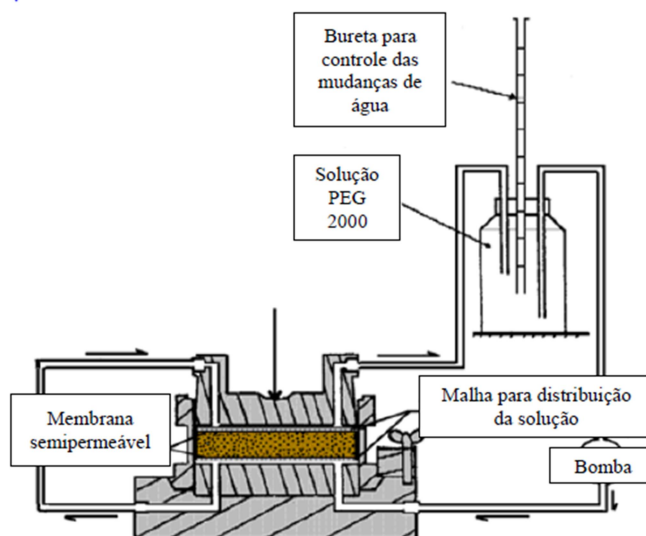


Figura 3.14 - Edômetro osmótico. (SOTO, 2004).

Por fim, a técnica de Vapor d'água permite a determinação indireta da sucção total através de relações termodinâmicas já descritas na Equação 3.4, onde existe a interação entre a energia livre da água intersticial e a pressão parcial do vapor d'água nos poros do solo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Essa técnica é, geralmente, realizada em amostras de argila expansivas com alto valor de retenção de água.

Oldecop e Alonso (2001) apresentam uma câmara edométrica adaptada para esse método (Fig. 3.15).

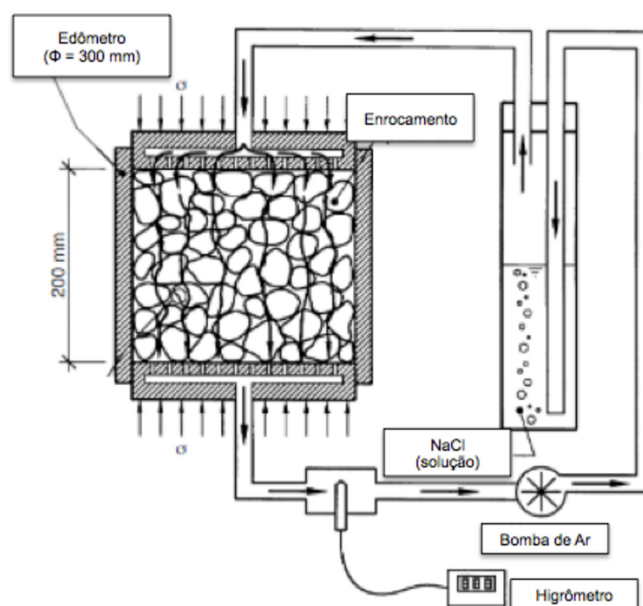


Figura 3.15 - Câmara edométrica adaptada para a técnica de vapor d'água (OLDECOP e ALONSO, 2001).

Soto (2004) apresenta as três técnicas para a imposição e controle da sucção e lista as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Métodos para controle e imposição de sucção em câmaras edométricas e suas principais vantagens e desvantagens (SOTO, 2004).

Técnica	Intervalo de Sucção Mensurável	Vantagens	Desvantagens
T.T.E.	0 – 1,5 MPa	Medição direta da sucção	Erro na medida de sucção caso tenha ar ocluído
		Possibilita medir sucções maiores que 100 kPa	Não recomendado para sucções menores que 10 kPa
		Disponível comercialmente	Não recomendado para solos com granulação fina
		Técnica simples e de fácil operação	Equipamento caro
Osmótica	0 – 10 MPa	Solo não perturbado pela pressão de ar como na T.T.E.	Membranas sensíveis a bactérias e microrganismos
		Permite sucções de até 10.000 kPa	Membranas devem ser adequadas ao PEG quanto ao peso molecular
		Medidas confiáveis mesmo que o solo apresente ar ocluído	Período de vida da membrana curto (30 dias)
		Técnica simples e de fácil operação	Necessita de um controle adequado da temperatura ( $20,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ )
Vapor d'água	0 – 70 MPa	Permite sucções bem mais elevadas que os outros métodos	Limitações para sucções menores que 10.000 kPa
		Solo não perturbado pela pressão de ar como na T.T.E.	Necessita de um controle adequado da temperatura ( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ )
		Mede a sucção total do solo	Tempo de equilíbrio alto (podendo chegar a 250 dias)

### **3.3. Erosão**

A erosão é um dos principais problemas ambientais que ocorrem no mundo (LOLLO e SENA, 2013). Esse fenômeno traz sérias consequências ao meio físico, como a redução de grandes áreas de terra, e preocupam a humanidade há muito tempo (HE et al. 2006).

Vilar (1987) cita que a erosão fundamenta-se nos vários processos aos quais os elementos do terreno se desagregam, dissolvem ou desgastam e sofrem deslocamento de um ponto inicial a outro pela ação de agentes erosivos.

Os principais fatores envolvidos nos processos erosivos são advindos das características naturais do solo e podem ser acelerados com a ação das atividades humanas (SILVEIRA e PEJON, 2007).

Ações de ocupação humana no território tais como desmatamento, cultivo de grandes áreas de plantação, implantação de loteamentos, pavimentação asfáltica, sobretudo quando executadas sem os devidos critérios técnicos, podem causar sérios problemas e acelerar o fenômeno erosivo. O processo de urbanização de forma acelerada e a expansão desordenada das cidades mudam a paisagem resultando em processos de degradação no meio físico, muitas vezes expressa por processos erosivos (GUPTA e AHMAD, 1996).

Lollo e Sena (2013) expõem a problemática para as regiões tropicais e subtropicais, onde a ação das chuvas pronuncia o fenômeno da erosão. A água não infiltrada da chuva escoar pelo solo carreando suas partículas para as partes mais baixas do terreno e ocasionando feições erosivas (BARRELLA, 2001).

Existe uma grande variedade de fatores que podem causar os fenômenos erosivos e associados com ações antrópicas esses processos de desagregação e transporte das partículas são acelerados e causando sérias consequências para a humanidade.

#### ***3.3.1. Tipos de erosão***

Os tipos de erosão são divididos por grande parte dos autores em três diferentes classificações quanto aos seus agentes: vento, fluidos e por ação da gravidade. Na Tabela 3.3, simplificada de Lal (1990), é possível observar que esses tipos de erosões se distinguem de acordo com o agente atuante no processo erosivo.

Tabela 3.3 - Agentes causadores de erosão (modificado de LAL, 1990).

TIPO DE AGENTE			TIPO DE EROSÃO	
VENTO			Erosão eólica	
FLUIDOS	ÁGUA	CHUVA		Erosão pluvial
		ÁGUA DE ESCOAMENTO	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	Erosão em sulcos
				Erosão em ravinas e voçorocas
			Erosão em canais fluviais	
		ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL	Erosão em condutos subterrâneos	
	OCEANO		Erosão costeira	
GELO		Erosão glacial		
GRAVIDADE	MOVIMENTOS DE MASSA		Avalanche	
			Escorregamento	
			Solifluxão	
			Rastejo	

Dentre as diversas formas de erosão, a mais comum no Brasil envolve os processos de erosão hídrica o qual é iniciado pela ação da chuva. Neste caso, tomando-se ainda a Tabela 3.3 para análise, o início se dá pela erosão pluvial onde a força de impacto das gotas de chuva (efeito *splash*) atinge a superfície do solo e causa sua desagregação, composta pela desintegração e transporte das partículas.

Rodrigues (1982) menciona que a água atua de forma conjunta no processo erosivo pela ação da gota da chuva, de escoamento em lençol subterrâneo e escoamento superficial. Para o mesmo, se observa que com o impacto das gotas de chuva o solo é desagregado e as suas partículas sofrem redução sendo, também, transportadas por saltitação.

A enxurrada é responsável por transportar as partículas desprendidas. Outras partículas em suspensão acabam se infiltrando no solo, ocasionando diminuição da permeabilidade e agravando o escoamento superficial (ALMEIDA FILHO, 2000).

O processo erosivo pode se evidenciar mais severo quando combinados os efeitos de escoamento superficial e da infiltração do lençol freático.

Segundo Ide (2009), o fenômeno de erosão retrogressiva também chamado de *piping*, é causado pela ação de águas subsuperficiais que alteram o gradiente hidráulico. Lima (1999) associa a ocorrência do *piping* a um regime de escoamento imposto pelo acúmulo de águas em bacias de dissipação ou à presença do lençol freático.

Já o escoamento superficial é o maior agente de transporte de partículas no solo. Infanti Junior e Fornasari Filho (1998) salientam que esse escoamento superficial pode ser classificado como laminar ou linear.

#### **3.3.1.1. Erosão laminar**

A erosão laminar ou em lençol ocorre pelo escoamento difuso das águas pluviais, com remoção contínua e uniforme das camadas do solo. Nesse tipo de erosão, com fluxo superficial, o processo ocorre de maneira lenta e, geralmente, em áreas com pouca ou desprovidas de cobertura vegetal (DAEE/IPT, 1990).

Ferreira (1981) aponta que esse desgaste pode passar anos sem ser notado, pois ocorre perdendo camadas paralelas à superfície do terreno de milímetros em milímetros, sendo considerada uma forma grave de erosão pela retirada da superfície do solo. Nesse desenvolvimento lento, durante um pico de evento chuvoso pode recobrir cerca de dois terços ou mais das encostas, em uma bacia de drenagem (HORTON, 1945).

O desenvolvimento da erosão laminar pode ou não levar à erosão linear, pois pode acontecer de maneira independente ou como fase do processo que desencadeia em uma erosão linear.

#### **3.3.1.2. Erosão linear**

A erosão linear ocorre pela concentração das linhas de fluxo do escoamento superficial, atuando no desprendimento e no deslocamento das partículas do solo, gerando incisões na superfície do terreno (DAEE/IPT, 1990). Para Pejon (1992) essa forma de atuação do fenômeno da erosão hídrica tem a característica de formar feições erosivas diversas no terreno.

A erosão linear é provocada pela concentração dos filetes de água que formam enxurradas e concentram-se sobre a superfície do solo formando sulcos, ravinas e canais mais profundos, as voçorocas (MORTARI, 1994).

- **Sulcos**

O sulco é um tipo de erosão linear, iniciando a formação de pequenos filetes rasos com o solo sendo arrastado pela água, com espessuras menores que 0,5 metro.

- ***Ravinas***

Erosão ocorrida pelo aprofundamento de sulcos, em geral adquirindo um perfil em forma de “V”, porém não atingem o lençol freático. As ravinas, ao longo do declive, possuem uma forma retilínea, alongada e estreita com profundidade maior que 0,5 metro.

- ***Voçorocas***

A ação dos escoamentos superficiais agrava o ravinamento, aumentando as dimensões das feições erosivas, podendo atingir o lençol freático apresentando perfil em forma de “U”.

Cerri et al. (1997) referem essas feições erosivas como formas mais complexas e destrutivas do processo evolutivo da erosão linear. Sua complexidade pode apresentar agravamento por outras ações no terreno, como solapamentos e escorregamentos dos taludes, e a ação de erosão interna (FIORI e SOARES, 1976).

A degradação do solo causada pelas voçorocas é mais evidente em regiões de clima tropical e subtropical, como o Brasil, se tornando uma questão ambiental para as localidades atingidas (ZUQUETTE et al. 2007).

### ***3.3.2. Fatores condicionantes***

No processo erosivo os principais fatores condicionantes observados são o clima, o relevo (forma e inclinação), o tipo de solo, a cobertura vegetal existente e a ação humana. Esses fatores contribuem para o desenvolvimento de sulcos para ravinas e, posteriormente para voçorocas.

Infanti Junior e Fornasari Filho (1998) diferenciam os tipos de erosão entre naturais (erosão natural) e antrópicos (erosão acelerada).

Para Campos (2014), a erosão de origem natural independe da atuação antrópica no meio. A intensidade do processo erosivo é determinada por parâmetros como ação da chuva, tipo de cobertura vegetal, relevo, tipo de solo e substrato rochoso.

Já a erosão de origem antrópica é o reflexo das atividades humanas e, por isso, é assunto de preocupação, pois o processo acelerado de desgaste do solo acarreta em enormes prejuízos de ordem física, financeira e social (AMORIM, 2010; OLIVEIRA, 2010).

As ações humanas, normalmente associadas à rapidez de desgaste do solo, estão ligadas a atividades de desmatamento, urbanização, originando impermeabilização do solo, retificação de leitos de cursos d'água, entre outros.

É importante ressaltar que grande parte das feições erosivas tem a associação entre fatores antrópicos e naturais.

### **3.3.2.1. Condicionantes naturais**

#### Ação da chuva

Bertoni e Lombardi Neto (1999) e Sena (2008), apontam a precipitação pluvial como condicionante de maior importância no processo erosivo dentre diferentes agentes climáticos como temperatura, ventos, balanço hídrico, umidade relativa e a própria precipitação. A chuva constitui-se em fonte de energia para todo o desenvolvimento do processo erosivo (PEREIRA, 1977).

A intensidade da chuva influencia na erosão do solo com base na energia cinética que provoca e induz na superfície do solo, essa característica é chamada de erosividade. Hudson (1961) menciona que a erosividade é determinada pela duração da chuva, entre outras características como quantidade, intensidade, frequência e dimensão das gotas. Quanto maior a intensidade e a duração da chuva, maior o volume e a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, maior a perda de solo.

Dias e Herrmann (2002), observaram que existe uma maior probabilidade de erosão quando ocorre chuva intensa precedida por dias consecutivos de chuvas amenas, que elevam o grau de saturação do solo.

#### Cobertura vegetal

A existência de uma cobertura vegetal serve como uma proteção física contra o impacto da gota da chuva, pois ela dispersa a energia da gota. (GALETI, 1984). A vegetação ajuda a reduzir a velocidade da gota da chuva e retirar parte da intensidade do efeito *splash*, que é o responsável por causar a ruptura dos agregados e sela a superfície do solo (GUERRA, 2012).

Além disso, essa vegetação proporciona uma maior porosidade do solo, e conseqüente aumento na infiltração, devido à presença de raízes e também um aumento na capacidade de retenção de água.



### Relevo

O relevo do terreno tem papel fundamental no entendimento do processo erosivo, pois tem influência na intensidade e, principalmente, na velocidade do escoamento superficial (BIAS, 2012).

A forma da encosta tem importância uma vez que influencia no fenômeno de erosão e seu conhecimento pode trazer implicações práticas em projetos de taludes e superfícies que sofram com a erosão hídrica.

Campos (2014) considera a topografia do terreno um fator que influi na intensidade e velocidade da erosão. A velocidade de escoamento da água e, também a quantidade de partículas carregadas estão diretamente ligadas às características de declive e comprimento da rampa. Portanto, a erosão é mais frequente em terrenos que são mais acidentados.

Sena (2008) cita que, não há um consenso entre os autores para definir os valores limites em que o comprimento de rampa é responsável na ativação da erosão. Porém, observa-se que o escoamento superficial em direção à base da encosta adquire maior aceleração em função de um comprimento de rampa maior.

Superfícies de taludes com forma convexo-côncava sofrem com a erosão. No trecho convexo ocorre o desprendimento das partículas, já os trechos de transição e côncavo sofrem com a deposição do material erodido o que ocasiona a redução de declividade do talude.

Perfis convexos e retilíneos têm a tendência de tornarem-se côncavos e de sofrer menos erosão no futuro, já num perfil côncavo a forma se mantém, porém, sua curvatura vai sofrendo algumas variações. Esta tendência de evolução para um perfil côncavo é observada por Vilar (1987) onde, ao longo do tempo, a carga de sedimento erodida sofre redução, levando a conclusão de que as encostas sujeitas à erosão pela chuva encontram um perfil de equilíbrio.

### Propriedades do solo

O solo deve ser considerado através de suas propriedades físicas, químicas, biológicas e mecânicas. As principais características que devem ser levadas em consideração no fenômeno de erosão são a granulometria, estrutura, condutividade hidráulica e teor de matéria orgânica.

As propriedades físicas estão relacionadas com a quantidade de solo erodido. Os solos com propriedades distintas podem apresentar diferentes níveis de susceptibilidade, mesmo que sejam impostas condições similares de topografia, vegetação e manejo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999).

A erodibilidade do solo é influenciada pelo tipo de solo. Os materiais finos geralmente são menos erosíveis que os grossos, pois as forças do intercepto de coesão dificultam a desagregação de suas partículas, ao contrário de solos com materiais grossos com baixo intercepto de coesão ou, em alguns casos, apenas aparente, não impedindo que as partículas se desagreguem (PEJON, 1992).

Morgan (1995) considera que para determinar a erodibilidade de um solo é necessário tomar como base suas informações de granulometria, estrutura, permeabilidade e teor de matéria orgânica. A caracterização física é realizada por meio de ensaios laboratoriais muito comuns no meio geotécnico: determinação de índices físicos, distribuição granulométrica, limites de consistência, índice de plasticidade, entre outros, os quais influenciam na resistência do solo à erosão. Dessa forma, a investigação geotécnica é de suma importância para o estudo da gênese e evolução das erosões, uma vez que o mecanismo de evolução do fenômeno erosivo está relacionado com as características geológico-geotécnicas e estruturais do solo.

### *Substrato rochoso*

A capacidade de resistência ao intemperismo das rochas e o grau do intercepto de coesão de seus componentes determinam a susceptibilidade aos processos erosivos.

“As características litológicas do substrato rochoso associadas à intensidade do intemperismo e à natureza da alteração e grau de fraturamento condicionam à suscetibilidade do material à erosão. As formações geológicas sedimentares, cujas coberturas pedológicas correspondem a materiais arenosos (solos podzólicos, latossolos ou depósitos alúvio-coluvionares), são as principais áreas de ocorrência de voçorocas no país” (INFANTI e FORNASARI, 1998).

### 3.3.2.2. *Condicionantes antrópicos*

O processo erosivo acelerado é desencadeado principalmente pela ação humana. O uso e ocupação indevidos do meio físico ocasionam desequilíbrios na natureza e conseqüente aceleração do processo erosivo. Quando o processo já é pré-existente, esse desequilíbrio é potencializador do dano. Stein (1995) expõe a atividade humana como o principal fator na deflagração dos processos erosivos, pois rompem o equilíbrio natural do meio físico, resultando na aceleração da erosão natural do local na busca de um novo equilíbrio.

Dentre os condicionantes antrópicos causadores desse desequilíbrio, pode-se citar o uso inapropriado das terras, com ocupações em áreas de risco e sistemas de cultivo inadequados ao solo. Em adição, os descartes irregulares de efluentes industriais e domésticos sem prévio tratamento e o desmatamento de áreas de proteção são grandes aceleradores do processo erosivo.

Galeti (1984) atribui a ocupação do meio como um fator decisivo para aceleração dos processos erosivos, pois se inicia com o desmatamento para o cultivo das terras, seguido pela implantação de estradas e expansão de vilas e cidades que, quando efetuadas de maneira inadequada, provocam a evolução do processo.

O desmatamento altera o balanço hídrico entre a vegetação e o solo, pois aumenta o escoamento superficial e a infiltração no solo uma vez que, sem proteção, a água atinge o solo diretamente (IDE, 2009).

IPT (1989) e Bitar (2001) salientam os traçados inadequados dos sistemas viários e falta de sistema de drenagem eficiente, tanto de água pluviais, quanto de servidas, como grandes precursores da evolução da erosão no meio urbano. Ainda, atribuem essa evolução à rápida e descontrolada expansão urbana devido às implantações de loteamentos, comodatos e conjuntos habitacionais sem levar em consideração as características geotécnicas da cidade.

## 4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se o município de Bauru, localizado na região centro oeste do estado de São Paulo (Figura 4.1). A localização permite que a cidade seja um importante entreposto comercial do estado, onde está localizado o maior terminal multimodal hidrorrodoferroviário da América latina.



Figura 4.1 - Localização do município de Bauru (<http://www.bauru.sp.gov.br/bauru.aspx?m=2>).

A cidade é dividida pelas bacias hidrográficas do rio Batalha e do Rio Bauru, sendo que o Rio Bauru é aquele que corta a maior parte da área urbana e tem grande parte de suas microbacias localizadas em áreas susceptíveis à erosão, que ocupam o leito do rio e soterram suas nascentes.

A Figura 4.2 mostra a distribuição das microbacias provenientes do Rio Bauru.

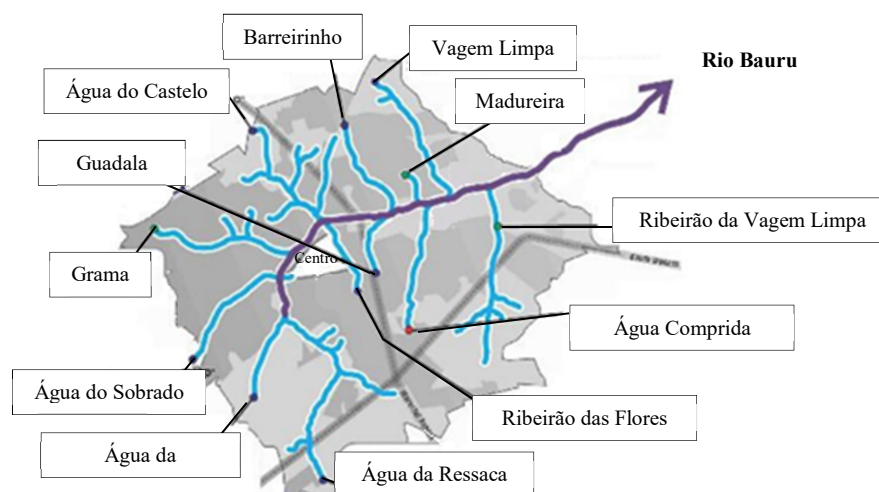


Figura 4.2 – Microbacias do Rio Bauru (Modificado de <http://lua8design.blogspot.com/2011/02/bauru-rios-e-afluentes.html>).

#### 4.1. Climatologia

De acordo com o IPMET (Instituto de Pesquisas Meteorológicas - Centro Meteorológico de Bauru), o clima de Bauru tem características tropicais, marcado por invernos secos e amenos e verões chuvosos com altas temperaturas. Os dados medidos pelo Instituto entre os anos de 2001 e 2016 mostram uma temperatura média anual de 22,8°C, com média mensal máxima de 30,6°C no mês de fevereiro e média mensal mínima de 7,8°C no mês de junho.

As chuvas são tipicamente tropicais e convectivas, caracterizadas por tempestades intensas de curta duração. O período de chuva se concentra entre os meses de novembro a março, com precipitação mensal média maior que 170 mm e o período de seca compreendem os meses de abril a outubro, com precipitação mensal média menor que 60 mm.

A Figura 4.3 apresenta a média mensal dos dados coletados pelo IPMET no período entre 2001 e 2016.

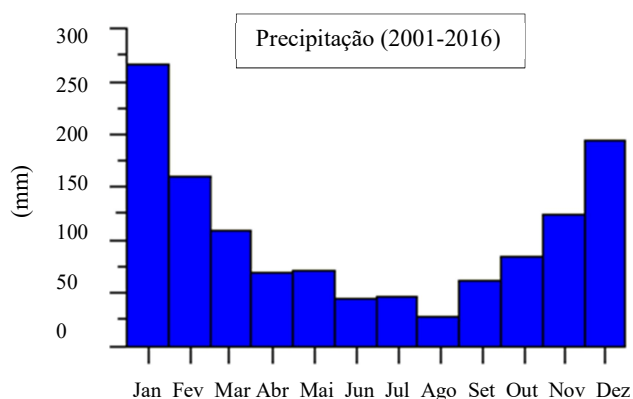


Figura 4.3 - Média mensal da precipitação em Bauru/Brasil, entre 2001 e 2016.

#### 4.2. Geologia e Geomorfologia

O solo do município de Bauru é originário de rochas sedimentares pertencentes ao Grupo Bauru e consiste principalmente por arenitos altamente suscetíveis a processos erosivos.

O Grupo Bauru ocupa uma área de cerca de 370.000 km<sup>2</sup>, distribuídos no triângulo mineiro, sudeste do Mato Grosso do Sul, noroeste do Paraná, sul de Goiás e, em sua maior parte, no planalto ocidental de São Paulo onde ocupa de aproximadamente 47% do território desse estado (117.000 km<sup>2</sup>). A sequência estratigráfica desde Grupo

no estado de São Paulo está subdividida em 5 Formações geológicas: Adamantina, Caiua, Itaqueri, Marília e Santo Anastácio (Fig. 4.4). No município de Bauru ocorre a presença das Formações Marília e Adamantina, onde se assentam sobre o substrato basáltico da Formação Serra Geral.

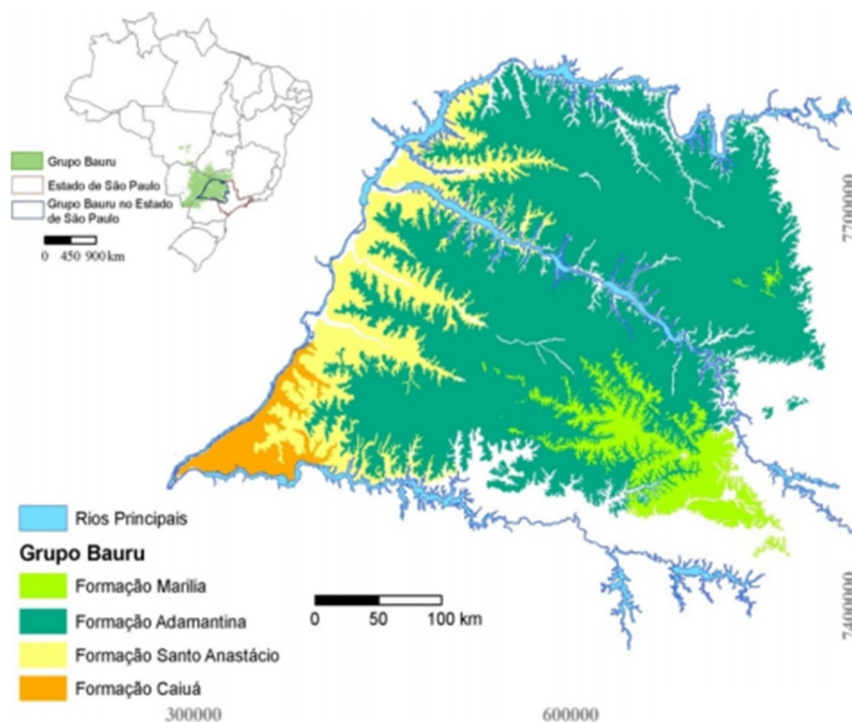


Figura 4.4 – Distribuição das Formações Geológicas pertencentes ao Grupo Bauru no estado de São Paulo. (modificado de IPT, 1981).

A Formação Adamantina ocorre numa grande extensão do estado de São Paulo, onde, de modo generalizado, ocupa praticamente toda a área do oeste do Grupo Bauru deixando de ocupar apenas as partes mais rebaixadas dos vales dos rios, onde foi removida pelos fenômenos erosivos (IPT, 1981). Sua constituição foi proposta por Soares et al. (1980) como um conjunto de fácies caracterizada por bancos de arenito com estratificação cruzada intercalando com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos.

Segundo Ide (2009) a Formação Marília ocorre exclusivamente sobre a superfície do Grupo Bauru, onde se transaciona superficialmente com a Formação Adamantina na região do município de Bauru. Seus sedimentos ocorrem no reverso da cuesta arenítico-basáltica, formando espigões na região entre os rios Tietê e Paranapanema e também em regiões específicas como a de Monte Alto, no nordeste do Estado. Sua composição possui a prevalência de depósitos arenosos grossos a

conglomeráticos constituídos pela presença abundante e heterogênea de cimento e nódulos carbonáticos. Ferreira et al. (1993) cita que os espigões sofrem com fenômenos erosivos em seus flancos que acabam formando uma cobertura arenosa fofa e de alta erodibilidade ao sopé das escarpas resultante nas voçorocas.

De acordo com a morfologia e as mudanças de inclinação do terreno da região, os solos têm características variáveis: no topo plano e alta vertente existem latossolos de textura média, que têm por característica a tendência a lixiviação em clima tropical; nas vertentes médias e baixas os solos são podzólicos de textura arenosa/média onde predominam os processos erosivos; no fundo de vale os solos são hidromórficos onde há inundações e emergência d'água (KERTZMAN e DINIZ, 1995).

Os processos erosivos regionais são intensificados pelas formas do relevo, que são formadas por longas rampas inclinadas que propiciam a concentração do fluxo de água em linhas de drenagens superficiais. Para Salomão (1994) a associação dessas formas de relevo com substratos de arenito leva a processos erosivos do tipo de reativação de drenagem natural.

#### **4.3. Processos erosivos em Bauru**

Corghi (2008) aponta que os processos erosivos ocorrem na cidade de Bauru desde o início de sua urbanização, tanto pelas características erodíveis do solo quanto pela associação com chuvas tropicais e ações antrópicas. A autora também justifica o aparecimento de erosões em loteamentos urbanos pela forma da expansão especulativa da cidade, devido aos vazios urbanos (que ficam reservadas a espera de valorização futuras) e ao parcelamento do terreno sem preocupações ambientais e de infraestrutura adequadas.

Alves (2001) cita que o poder público, geralmente submisso ao crescimento urbano especulativo, raramente estabelecem diretrizes urbanas eficazes. O autor estudou a erosão urbana causada pela expansão e planejamento do desenvolvimento imobiliário e destaca inter-relações entre a falta de planejamento urbano com ocorrências de erosão na cidade de Bauru. A legislação obsoleta geralmente permite que os empreendimentos imobiliários sejam autorizados mesmo sem controle de erosão. A cidade de Bauru sofre da falta de critérios técnicos com base nas características particulares da região e também com a falta de um serviço público que interaja e forneça diretrizes de planejamento.

Cavaguti (1995) também relaciona a ocorrência de processos erosivos na região com a ausência de estruturas de dissipação de energia nos pontos de descarga de água. Alves (2001) cita que a falta de estruturas de dissipação causa deslizamento de encostas, assoreamento e erosão em corpos de água. Além disso, as ocupações irregulares contribuíram para agravar os processos erosivos, que tendem a evoluir para a forma de ravinas e voçorocas decorrentes das alterações hidrológicas promovidas pelo desmatamento.

Atualmente, o solo da cidade é altamente degradado com muitos processos de erosão linear de médio à grande porte (ravinas e voçorocas). Estima-se que houve em torno de 3.000 erosões no estado de São Paulo em 2009, das quais cerca de 40 estão localizadas no município de Bauru (IDE, 2009). Dentre essas, destaca-se a feição erosiva existente na microbacia Água Comprida, que é uma grande produtora de sedimentos sofre com processos erosivos que vem acelerando ao longo dos anos em decorrência da construção de condomínios fechados ao redor de sua cabeceira. Essa microbacia encontra-se no setor 11 traçado no Plano Diretor Participativo de Bauru (Fig. 4.5)

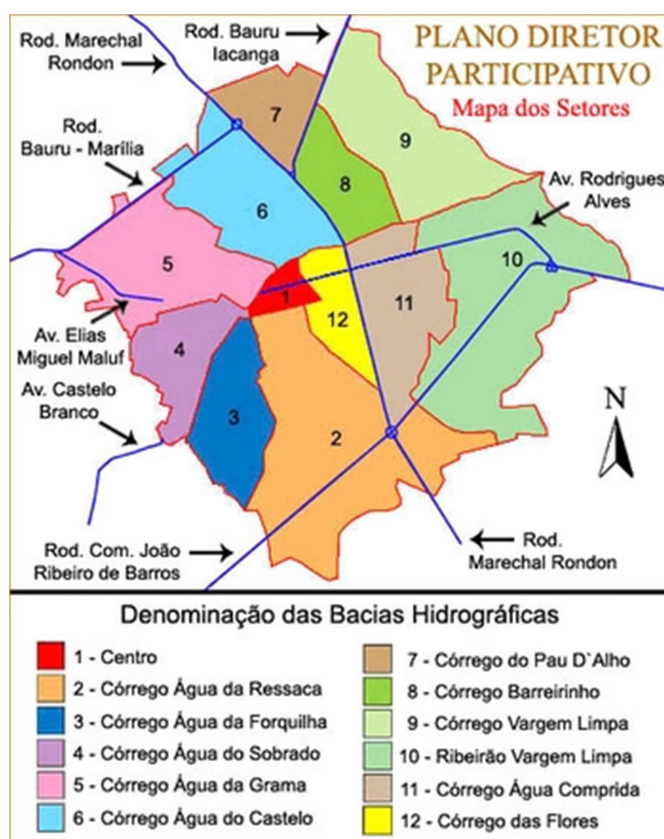


Figura 4.5 – Localização da microbacia Água Comprida no município de Bauru.

([http://hotsite.bauru.sp.gov.br/planodiretor/mapa\\_setores.aspx?im=1](http://hotsite.bauru.sp.gov.br/planodiretor/mapa_setores.aspx?im=1))



#### 4.4. Histórico de informações disponíveis da microbacia Água Comprida

Corghí (2008) estudou a ocupação ocorrida ao longo dos anos no Córrego Água Comprida e menciona que esta começou no final da década de 1940, com a implantação de loteamentos. Alguns vazios urbanos foram preservados para uma maior especulação a espera da implantação de infraestruturas e avenidas. O estabelecimento de moradias e a instalação de uma ocupação irregular na microbacia ocorreram em meados da década de 1960. Somente no final dos anos 80, os vazios urbanos foram valorizados e iniciaram o lançamento de edifícios e lotes privados, com o objetivo de obter uma grande utilização e altas taxas de ocupação da terra.

Em 1994, o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) elaborou uma Carta Geotécnica com as classes de susceptibilidade à erosão (Fig. 4.6). Toda a extensão da cidade foi classificada como alta e muito alta susceptibilidade à erosão.

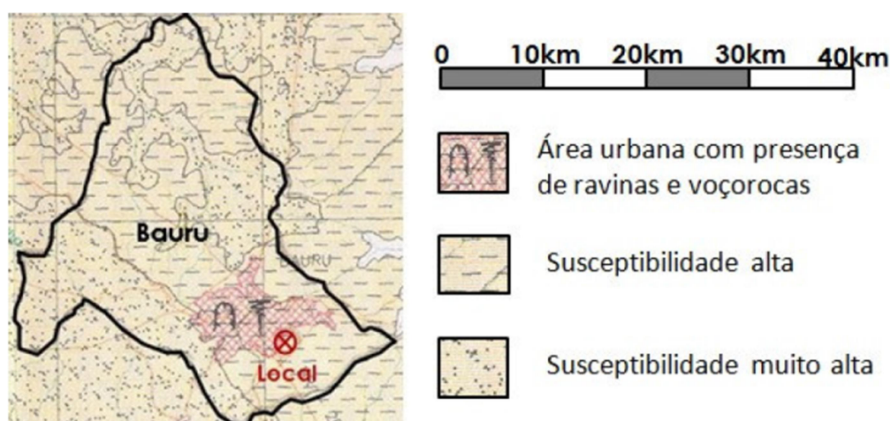


Figura 4.6 - Mapa de susceptibilidade à erosão no município de Bauru (IPT, 1994).

Este mapa poderia orientar o planejamento e implantação de obras públicas e privadas, para indicar medidas preventivas para evitar ou, pelo menos, reduzir o surgimento de novos processos erosivos na cidade. No entanto, embora tenha sido classificada como uma área urbana com presença de ravinas e voçorocas, a região onde se encontra a microbacia Água Comprida se tornou um setor de atração de capital com incentivo à implantação de empreendimentos imobiliários.

Em adição a susceptibilidade erosiva da região, os processos de ocupação na cabeceira da microbacia (com a instalação de prédios residenciais de alto padrão sem implantação de infraestrutura e medidas de controle de erosão) a área foi rapidamente degradada e erodida. No ano de 2002 já havia um pequeno processo de erosão no local.

Mesmo com discussões intensas no CONDEMA (Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente) para estabelecer uma ocupação moderada e prazos rígidos para reflorestamento e conformidade com a construção de galerias de águas pluviais e dissipadores de energia, o problema não foi resolvido na área.

Ao longo dos anos, alguns procedimentos paliativos foram realizados para conter o processo erosivo. Em 2003 a área foi licenciada para servir de bolsão de entulho, porém o material não era depositado e compactado devidamente (IDE, 2009). Em julho de 2004, iniciaram-se trabalhos de contenção de erosão mais consistentes, como a instalação de dissipadores de energia, a retificação do leito do córrego, a canalização do esgoto e a instalação da rede de drenagem (CORGHI, 2008). Mas, no final do trabalho em 2008, a autora relata já ser possível notar o início de uma nova e pequena incisão ao redor do local.

Em 2014, devido à falta de manutenção e inclinação do terreno, que favoreceram a formação de canais de fluxo de águas pluviais, a área encontrava-se novamente suscetível à erosão. A microbacia sofreu, mais uma vez, com quedas de taludes e com o reaparecimento de sulcos que denunciaram a reativação de um processo erosivo. Desde então, a micro bacia Água Comprida não foi contemplada por procedimentos paliativos.

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram alguns trabalhos paliativos nos anos de 2003, 2004 e 2005.



Figura 4.7 - Evolução da voçoroca e obras paliativas emergenciais. (CORGHI, 2008)



Figura 4.8 - Obra de contenção de erosão por dissipadores de energia. (CORGHI, 2008)



Figura 4.9 - Reparação do leito do córrego e instalação da rede de esgoto (CORGHI, 2008).

Atualmente a microbacia ainda encontra-se com reativação do processo erosivo. A última obra realizada na área foi em 2017, para recuperação da rede de galeria que, segundo a prefeitura de Bauru, rompeu devido às chuvas intensas que causaram feições erosivas que afetaram a rede de galerias e de esgoto.

A Figura 4.10 mostra a situação da área e o início das obras para recuperação da rede de galeria.



Figura 4.10 – Obras de recuperação da rede de galerias na microbacia Água Comprida (<http://www.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=28914#>).

#### 4.5. Trabalhos de investigação geotécnica

Ide (2009) fez uma pesquisa relacionada à investigação geotécnica no local. Seu trabalho apresenta a caracterização do solo, parâmetros mecânicos, erodibilidade e ensaios de campo. Dentre os ensaios da pesquisa, a autora menciona que aquele que apresentou maior representatividade foi o de erodibilidade através da metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979). As amostras do solo foram coletadas de três diferentes pontos representando o tipo de estágio da erosão linear: voçoroca, ravina e sulco, esses locais foram escolhidos devido à reativação do processo erosivo mesmo com todas as medidas paliativas aplicadas no local. A autora concluiu que o solo é classificado como material altamente erodível em todos os pontos de amostragem e é representativo do comportamento observado em campo. Seus resultados estão expostos na Figura 4.11.

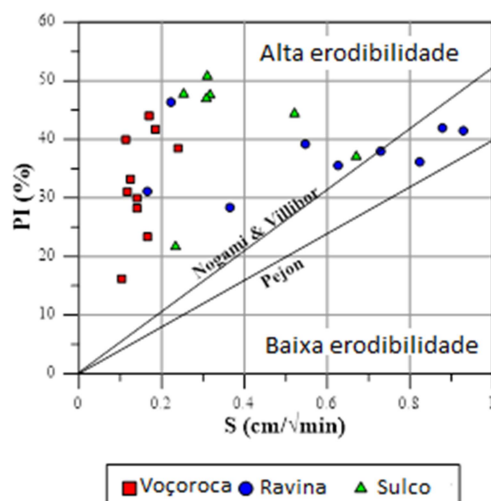


Figura 4.11 - Testes de absorção de água e perda de massa de imersão (IDE, 2009).

Campos (2014) fez uma avaliação da erodibilidade da área através de ensaios de Inderbitzen, para amostras de solos não saturadas submetidas a um valor representativo das chuvas de alta intensidade de Bauru de fluxo de 50 ml/s. A autora retrata os resultados desses ensaios em gráficos que representam a erodibilidade do solo (Figuras 4.12, 4.13 e 4.14) a perda acumulada de solo (Figuras 4.15, 4.16 e 4.17), ambas ao longo do tempo e em diferentes valores de inclinações de rampa (15° 30° e 45°).

Os resultados mais relevantes para o presente trabalho são apresentados nas sucções de 0 e 200 kPa e maiores que 15 MPa. As sucções de 50 kPa foram descartadas por não apresentarem valores expressivos.

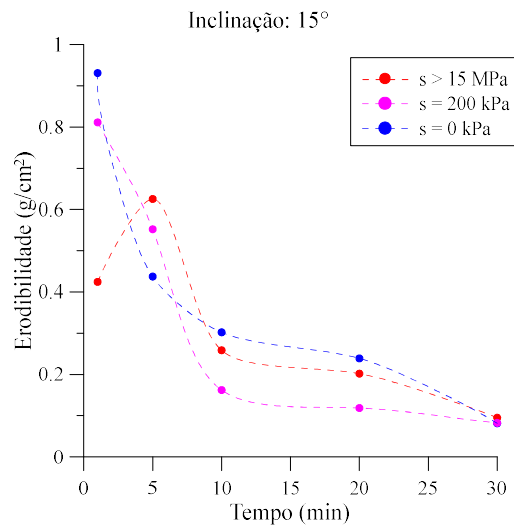


Figura 4.12 - Erodibilidade no tempo para inclinação de 15° de rampa.

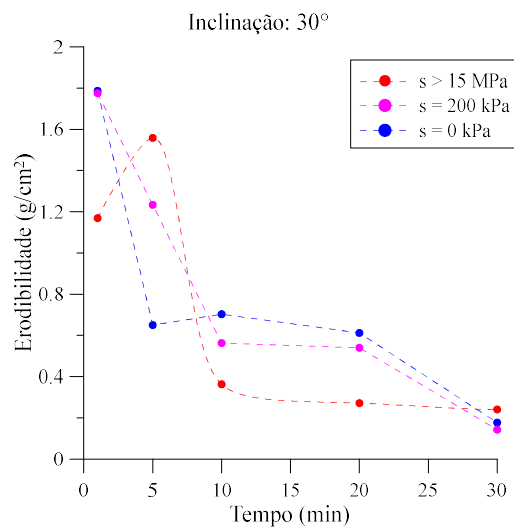


Figura 4.13 - Erodibilidade no tempo para inclinação de 30° de rampa.

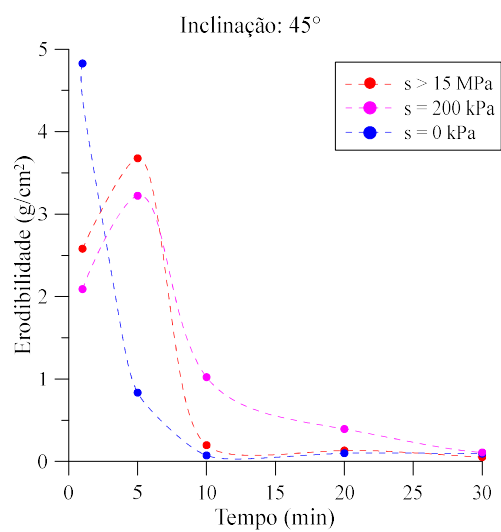


Figura 4.14 - Erodibilidade no tempo para inclinação de 45° de rampa.

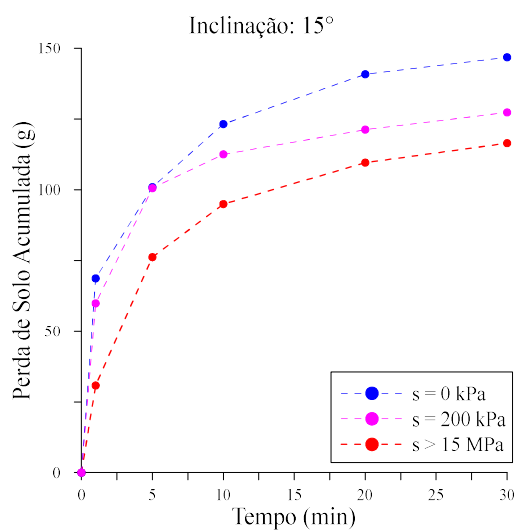


Figura 4.15 - Perda de solo acumulada no tempo para inclinação de 15° de rampa.

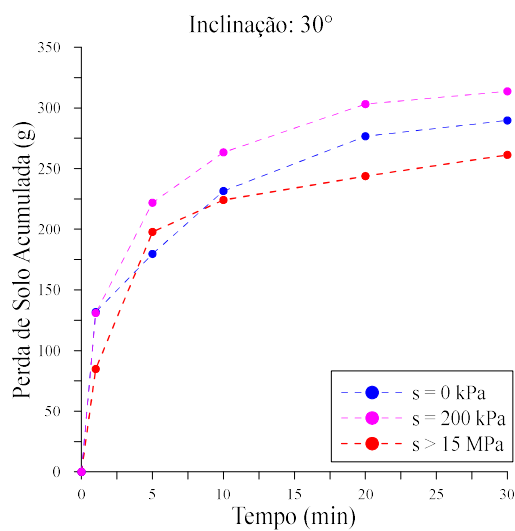


Figura 4.16 - Perda de solo acumulada no tempo para inclinação de 30° de rampa.

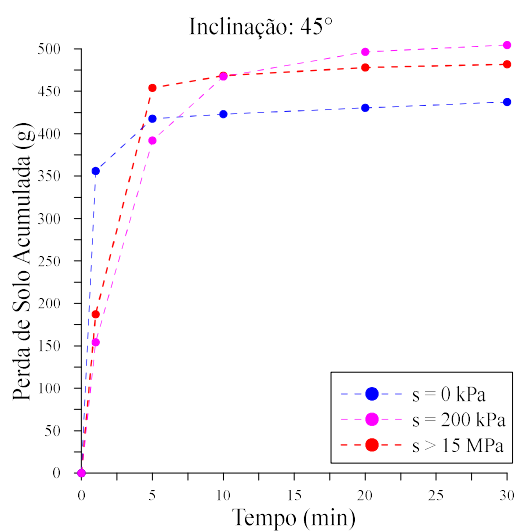


Figura 4.17 - Perda de solo acumulada no tempo para inclinação de 45° de rampa.

Pela a análise conjunta dos gráficos, Campos (2014) notou a influência da inclinação da rampa na quantidade de solo carregado, quanto maior a inclinação da rampa, maior é sua perda de solo, indicando dessa maneira que o solo arenoso está mais vulnerável à erosão quando em locais com o relevo acentuado.

Ao analisar a influência da sucção, a autora verificou que todos os gráficos tenderam a ficar com valores erodibilidade e perda de solo acumulada muito parecidos no fim dos ensaios para os diferentes valores de sucção. E, a partir da análise dos gráficos de erodibilidade, notou que as maiores taxas ocorrem ou no primeiro ou em 5 minutos minuto de ensaio e tendem à estabilização depois do pico.

Campos (2014) também apresenta em seu trabalho resultados de ensaios de cisalhamento direto para amostras não saturadas com sucção de 0, 50 e 200 kPa e maiores que 15 MPa (Tabela 4.1).

A autora relaciona a alta suscetibilidade à erosão do local estudado com o valor do intercepto de coesão do solo, que tem um valor nulo na condição saturada para os ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 4.1 - Parâmetros de resistência do solo estudado - Cisalhamento Direto (CAMPOS, 2014).

$s$ (kPa)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
0	0	27,5
50	14,2	33,9
200	32,2	30,7
>15MPa	73,8	37,8

Com uma abordagem geoambiental, Riyis (2012) realizou ensaios de campo na região de estudo com o uso de piezocone de resistividade (RCPTu) para um maior nível de detalhamento hidrogeológico do perfil do solo. O perfil representativo do solo está ilustrado na Figura 4.18.

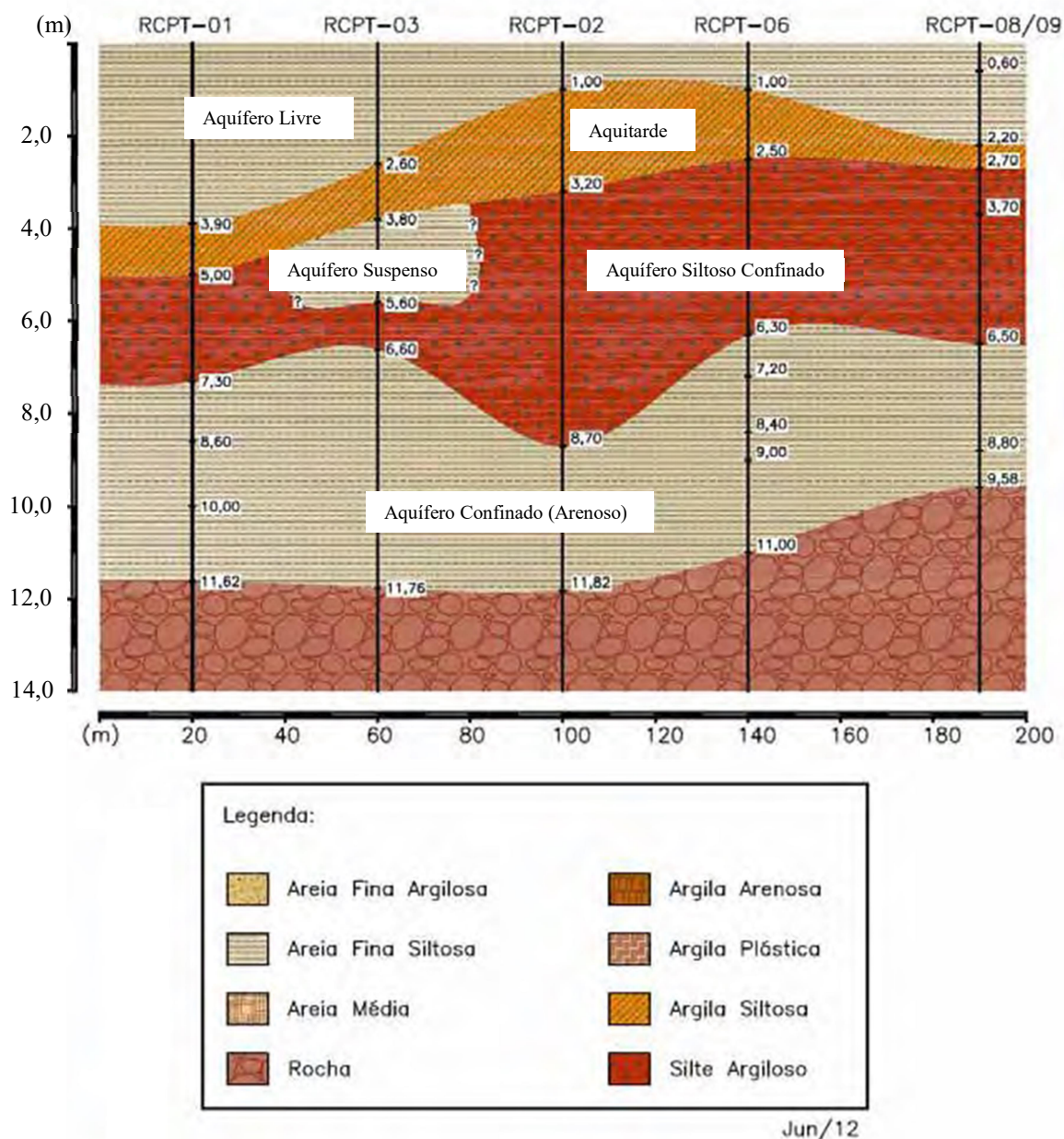


Figura 4.18 - Perfil representativo do local estudado (RIYIS, 2012).

Riyis (2012) classificou o perfil típico do solo como predominantemente arenoso, com camada superior composta de areia fina siltosa de baixa resistência e alta permeabilidade, e destaca a heterogeneidade das camadas que apresentam diferentes condutividades hidráulicas.

O perfil apresenta uma profundidade entre 1,0 a 4,0 metros para o nível do aquífero livre e entre 9,0 a 12,0 metros para o aquífero profundo, confinado solo argiloso. O topo rochoso tem profundidade entre 10,0 a 12,0 m.



## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. Amostragem

O ponto de amostragem foi baseado no trabalho de Ide (2009). As amostras foram representativas de locais com parâmetros hidráulicos e mecânicos já existentes e com a alta susceptibilidade aos fenômenos erosivos.

Como o estudo trata de um solo afetado por um processo erosivo hídrico, o material o coletado foi aquele que se encontra na camada mais superficial do solo, isso porque esse material é aquele que está exposto na atmosfera e acaba sofrendo com o fenômeno erosivo em questão. Assim sendo, amostras foram coletadas sobre a superfície de um talude (ponto “A” da Figura 5.1) nas coordenadas: 22° 20’44”S; 49° 02’24”W, na forma deformada, para realização de ensaios de caracterização física do solo, e indeformada, para obtenção de parâmetros hidráulicos e mecânicos.



Figura 5.1 – Ponto de amostragem com o córrego em azul (<https://earth.google.com/web>).

#### 5.1.1. Amostras deformadas

As amostras foram retiradas com auxílio de cavadeira e pá e foram estocadas em sacos plásticos, que foram selados de forma que mantivessem as características de

origem do solo. As amostras deformadas foram etiquetadas e armazenadas no depósito do Laboratório de Mecânica dos solos da UNESP/Bauru (Fig. 5.2).



Figura 5.2 - Amostra deformada.

### **5.1.2. Amostras indeformadas**

Para a coleta das amostras indeformadas utilizou-se uma caixa metálica cúbica (25x25x25cm) de faces removíveis e ferramentas apropriadas para o manejo do solo, como enxada, pá, cavadeira, faca, espátula, entre outras.

Para o processo de amostragem, a camada mais superficial do solo foi retirada juntamente a vegetação presente e, em seguida, a caixa metálica foi cravada verticalmente, retirando os excessos das bordas de modo a não gerar perturbações na amostra e mantê-la com suas características naturais (Fig. 5.3). Após a moldagem do bloco, retiraram-se as faces metálicas e a amostra foi imediatamente impermeabilizada, em todas suas faces, com uso de parafina (Fig 5.4). Camadas alternadas de tecido e parafina foram feitas para a proteção e transporte das amostras.

Para o devido transporte sem perturbação, as amostras foram acomodadas sobre uma caixa de papelão preenchida com serragem (Fig. 5.5).

Todas as amostras foram etiquetadas com informações pertinentes ao solo e, por fim, acondicionadas na câmara climatizada presente no Laboratório de Mecânicas dos Solos da UNESP/Bauru para preservar a umidade natural de campo.



Figura 5.3 - Cravação da caixa metálica.

Figura 5.4 – Proteção da amostra com parafina.

Figura 5.5 - Amostra indeformada.

## 5.2. Ensaio de caracterização

Os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Mecânicas dos Solos da UNESP/Bauru utilizando-se as amostras deformadas. Para este fim, executaram-se ensaios de análise granulométrica (NBR 7181/1984), massa específica dos sólidos (NBR 6508/1984), limites de liquidez (NBR 6459/1984) e de plasticidade (NBR 7180/1988).

## 5.3. Ensaio de curva de retenção de água (SWRC)

Por se tratar do estudo de um material superficial, que interage diretamente com a atmosfera e acaba sofrendo influências das variações climáticas da região, as curvas de retenção de água foram obtidas através das trajetórias de secagem e umedecimento para caracterizar a existência de histerese.

Apesar de o solo apresentar uma faixa de sucção em campo que varia entre 10 a 20 kPa, o solo superficial apresenta um comportamento distinto, apresentando uma ampla faixa de sucção devido as variações climáticas. Dessa maneira, as sucções das curvas de retenção foram estudadas nos seus valores extremos, que variam entre 0 kPa (condição saturada) e 15 MPa (condição seca ao ar).

As curvas foram obtidas mediante as técnicas de papel filtro, funil de placa porosa e câmara de pressão. Desse modo, foi possível abranger toda a curva, pois um método cobre as limitações do outro.

### 5.3.1. *Moldagem dos Corpos de prova*

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em uma amostra indeformada do solo, através da cravação de um anel de PVC (Fig. 5.6) e, finalizada (Fig. 5.7), a massa do anel mais solo foi determinada com auxílio de uma balança digital com precisão de 0,0001g. Em posse das dimensões dos anéis e da umidade natural do solo, foi possível calcular os índices físicos do solo nas condições naturais de campo.



Figura 5.6 - Moldagem do corpo de prova para a curva de retenção.



Figura 5.7 - Corpo de prova para os ensaios de curva de retenção moldado.

### 5.3.2. *Técnica de Papel Filtro*

Para a curva de secagem, todos os corpos de prova foram saturados por capilaridade por um período de 24 horas sobre uma placa porosa coberta por uma lâmina de papel filtro dentro de uma bandeja com água destilada e deaerada, com lâmina d'água até a metade da altura do corpo de prova. Após esse período, um corpo de prova foi utilizado para o cálculo da umidade saturada e, com esse valor, foi possível estabelecer valores de umidade alvo. Por fim, os demais corpos de prova foram expostos ao ar para secar até atingir o valor de massa desejado, correspondente à umidade previamente estabelecida.

Já para a curva de umedecimento, os corpos de prova foram primeiramente secos ao ar. Após a secagem, a umidade saturada foi calculada através de correlações entre índices físicos e, assim como na curva de secagem, a posse deste valor possibilitou estabelecer os valores de umidades alvo. Por fim, os corpos de prova foram umedecidos

com água destilada e deaerada, por gotejamento até atingir o valor de umidade pré-calculado.

As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram os corpos de prova (CPs) sendo umedecidos por capilaridade e secando ao ar.



Figura 5.8 - Umedecimento dos CPs por capilaridade



Figura 5.9 - CPs expostos ao ar para secagem.

Para que a curva ficasse distribuída uniformemente ao longo do eixo da sucção, foram calculados seus valores correspondentes de umidade, apresentadas aqui como umidades alvo.

Seus valores foram calculados através a umidade saturada menos  $n$  vezes umidade saturada dividida pelo número de copos de prova moldados para cada método (Equação 5.1).

$$w_{alvo} = w_{sat} - \left[ n * \left( \frac{w_{sat}}{n^{\circ} CPs} \right) \right] \quad (5.1)$$

Então, como primeiro corpo de prova teve umidade meta o valor saturado (sucção matricial nula), o segundo teve:

$$w_{alvoCP2} = w_{sat} - \left[ 1 * \left( \frac{w_{sat}}{n^{\circ} CPs} \right) \right] \quad (5.2)$$

E o terceiro:

$$w_{meta CP3} = w_{sat} - \left[ 2 * \left( \frac{w_{sat}}{n^{\circ} CPs} \right) \right] \quad (5.3)$$

E, desse modo, prosseguiram os cálculos até o último corpo de prova moldado para o método.

Para facilitar as verificações das umidades alvo e dar prosseguimento ao ensaio, as massas correspondentes às estas umidades também foram calculadas. Assim, as verificações puderam ser realizadas com a ajuda de uma balança com precisão de 0,0001g. Quando atingida a massa correspondente à umidade alvo, sendo pelo método de secagem ou umedecimento, o ensaio prosseguia para a etapa de embrulho do corpo de prova.

A Figura 5.10 ilustra os materiais utilizados na etapa citada. São eles: (1) recipiente plástico com tampa; (2) fita adesiva; (3) papel filtro Whatman nº 42; (4) caneta; (5) tesoura (6) estilete; (7) discos de PVC; (8) pinça metálica; (9) pincel; (10) etiqueta; (11) pano; (12) filme de PVC; (13) balança eletrônica com precisão de 0,0001g



Figura 5.10 - Materiais utilizados no ensaio de papel filtro.

Para o embrulho, os corpos de prova foram colocados em contato com o papel filtro Whatman nº 42 pelo topo e pela base do mesmo. Estes papéis foram previamente cortados em forma circular, de diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro do corpo de prova. Em seguida os CPs foram embrulhados com algumas camadas de filme de PVC, juntamente com discos de PVC, para melhorar o contato entre o papel e o CP.

No fim, os embrulhos foram vedados com fita adesiva, etiquetados e armazenados em uma caixa de isopor até que o equilíbrio fosse alcançado (Fig. 5.11).



Figura 5.11 - Corpos de provas embrulhados - Técnica papel filtro.

O tempo de equilíbrio depende da umidade alvo a qual a amostra foi embrulhada. Para amostras com umidade a cima de 5%, o tempo de equilíbrio foi de 7 dias, já para amostras embrulhadas com umidades alvo menores que 5% esse tempo foi de 15 dias.

Após o tempo de equilíbrio alcançado, as amostras foram desembrulhadas e, com agilidade, os papéis de topo e base foram pesados. Em seguida os papéis foram secos na estufa a 104°C por um período de 24 horas para que, no fim, suas massas secas fossem medidas e o valor da umidade média entre o topo e a base do papel ( $w_{\text{papel}}$ ) fosse calculado. Juntamente com esse procedimento, os CPs foram divididos em três partes para que a o teor de umidade do solo fosse determinado a partir de sua massa úmida e seca, com auxílio de cápsulas metálicas e a estufa, também num período de 24 horas.

Em posse das umidades do papel ( $w_{\text{papel}}$ ), foi possível calcular as sucções das amostras por meio das relações de Chandler et al. (1992) apresentada nas Equações 3.8 e 3.9.

Dessa maneira, os pares ordenados de umidade do solo e sucção foram obtidos e puderam compor parte da curva de retenção.

É importante salientar que os valores obtidos para umidades muito altas não são confiáveis, pois tendem a sujar o papel filtro e interferir nos valores de massa do

mesmo, alterando assim no cálculo correto da umidade do papel, para esse caso, lança-se mão da técnica de funil de placa porosa.

### **5.3.3. Funil de Placa de Porosa**

Devido à incerteza sobre os pares ordenados obtidos pelo método anterior para altas umidades e baixas sucções, lançou-se mão do ensaio de funil de placa porosa para obter resultados mais precisos. Assim, alguns pontos dessa parte da curva foram escolhidos para passar por este método e complementar a curva de retenção já obtida.

Para a realização deste ensaio, todo o sistema e a placa porosa foram saturados previamente.

Para a curva de secagem, as amostras moldadas foram saturadas de maneira análoga à técnica do papel filtro descrita no item 5.4.2. e, então, uma por vez foi posicionada sobre a superfície da placa porosa, mantendo-se o gradiente hidráulico nulo. Em seguida um registro de saída de água foi aberto na altura correspondente à sucção de interesse, permitindo assim um fluxo de água do solo para o registro, até que o equilíbrio fosse atingido. Após esse tempo, o teor de umidade da amostra ensaiada foi aferido e, em posse dos pares ordenados de sucção e teor de umidade, foi possível complementar a curva de retenção de secagem.

Já para a curva de umedecimento, as amostras moldadas foram secas ao ar, de maneira análoga à técnica descrita no item 5.4.2. e então uma por vez foi posicionada sobre a placa porosa saturada. Como o solo está seco e tem alta avidéz por água, uma bureta foi instalada em um registro de saída de água, mantendo-se, de início, o gradiente hidráulico nulo e depois disponibilizando uma coluna de água na bureta para que houvesse fluxo de água para o solo e, assim, o tempo de equilíbrio fosse alcançado. Após esse tempo, mediu-se a distância entre o ponto médio da amostra e a coluna de água da bureta, o que correspondeu à sucção em que a amostra encontrava-se. Ao fim, o teor de umidade da amostra ensaiada foi aferido e, em posse dos pares ordenados de sucção e teor de umidade, foi possível complementar a curva de retenção de umedecimento.

O painel disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos Não Saturados da UNESP/Bauru possui dois funis dispostos lado a lado e que podem ser usado concomitantemente. O painel possui registros a cada 10 cm a partir do nível da



amostra. O que possibilita a obtenção das sucções entre 1 a 15 kPa, conforme ilustra a Figura 5.12.



Figura 5.12 - Painel disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos Não Saturados da UNESP/Bauru.

#### 5.3.4. Câmara de Pressão

Alguns pontos da curva de retenção também foram obtidos a partir do ensaio de Câmara de Pressão, de modo a cobrir as limitações dos outros ensaios. Para isso, 6 corpos de prova foram moldados, 3 para compor a curva de secagem e 3 para a curva de umedecimento. O ensaio foi conduzido com imposições sucessivas de pressão de ar, de 50, 100 e 200 kPa, compatível com as sucções desejadas.

Para a curva de secagem, as amostras moldadas foram saturadas (de maneira análoga à técnica do papel filtro descrita no item 5.2.2), em seguida foram posicionadas

sobre a superfície da placa porosa de alto valor de entrada de ar de 5 bar e, então, a câmara foi lacrada. É importante frisar que esta placa foi saturada previamente, por submersão em água destilada e deaerada por um período de 48 horas. Durante esse tempo, foram aplicadas injeções dessa água pelo orifício de saída da placa.

Após lacrar a câmara de pressão, impôs-se a pressão de ar de interesse na parte interna da câmara, para assim começar o fluxo de saída de água da amostra, o qual foi monitorado diariamente por meio de uma bureta conectada à base da câmara. Após a amostra alcançar o equilíbrio e o corpo de prova parar de drenar água para a bureta, seu teor de umidade foi determinado e assim, em posse dos pares ordenados de sucção e teor de umidade, foi possível complementar a curva de retenção de secagem.

Já para a curva de umedecimento, as amostras moldadas foram secas ao ar (de maneira análoga à técnica descrita no item 5.2.2) e, então, foram posicionados sobre a superfície da placa porosa de alta entrada de ar, também saturada por submersão e injeções de água destilada e deaerada.

Assim como discutido no item 5.4.3, como o solo seco tem alta avidéz por água, uma bureta foi conectada na parte externa da câmara, disponibilizando certa coluna d'água para que houvesse fluxo de água para o solo.

Feito isso, lacrou-se a câmara e impôs-se uma pressão de ar na parte interna da câmara. A coluna de água disponível na bureta foi sendo drenada para o solo. Assim, após alcançar o equilíbrio e a coluna d'água estabilizar na bureta, a amostra foi retirada da câmara e seu teor de umidade foi determinado. Em posse dos pares ordenados de sucção e teor de umidade, foi possível complementar a curva de retenção de umedecimento.

A Figura 5.13 mostra o sistema de câmaras de pressão disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos Não Saturados da UNESP/Bauru e a Figura 5.14 mostra a saturação da placa porosa de alto valor de entrada de ar, por injeção de água.



Figura 5.13 - Sistema de câmara de pressão disponível na UNESP/Bauru.



Figura 5.14 - Saturação da placa porosa de alto valor de entrada de ar.

Como mostra a Figura 5.13, os incrementos de pressão são controlados através dos reguladores de pressão dispostos um painel de pressão e as câmaras recebem essa pressão por ar comprimido através de mangueiras conectadas na câmara.

#### **5.4. Ensaios de compressibilidade**

Os ensaios de compressibilidade foram realizados na forma convencional e com sucção controlada, para que a influência da sucção sobre os parâmetros de compressibilidade do solo fosse avaliada.

#### **5.4.1. Moldagem dos corpos de prova**

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em uma amostra indeformada do solo, através da cravação de um anel metálico com de cerca de 70 mm de diâmetro e 25 mm de altura. Para facilitar a cravação e não perturbar a amostra, o anel tinha sua parte inferior biselada.

As aferições das medidas e da massa do anel foram previamente obtidas com auxílio de um paquímetro e de uma balança com precisão de 0,01g, respectivamente. Em posse do teor de umidade natural do solo, medido com auxílio de cápsulas metálicas e estufa a 104°C, e a massa final do conjunto anel mais solo, foi possível calcular os índices físicos do solo nas condições naturais de campo.

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram a moldagem de uma amostra para o ensaio de compressibilidade e o CP já moldado, respectivamente.



Figura 5.15 - Moldagem do CP para o ensaio de compressibilidade.



Figura 5.16 - Corpo de prova moldado para o ensaio de compressibilidade.

#### **5.4.2. Ensaio edométrico convencional**

Após a moldagem do CP, a amostra foi devidamente posicionada na câmara convencional para que os carregamentos fossem, então, aplicados. As medidas dos deslocamentos axiais foram feitas por meio de um extensômetro digital.

Utilizaram-se as câmaras edométricas convencionais para a realização de ensaios com amostras saturadas e secas ao ar. A amostra saturada foi umedecida na própria

câmara edométrica, com auxílio de uma pisseta composta por água destilada e deaerada. Já a amostra seca foi exposta ao ar fora da câmara, por um período de 10 dias.

A Figura 5.17 mostra o procedimento para montagem da câmara edométrica convencional, posicionamento na prensa para carregamento e medida da variação axial pelo extensômetro digital.



Figura 5.17 - Procedimento de montagem, carregamento e medida da variação axial.

#### **5.4.3. Ensaios edométricos com sucção controlada**

Os ensaios Edométricos com sucção controlada foram realizados baseados na técnica de translação de eixos desenvolvida por Hilf (1956). Para isso, duas câmaras edométricas foram utilizadas no programa experimental, providas com pedra porosas de

alto valor de entrada de ar de 5 bar. Os ensaios foram realizados com a imposição de sucção de 50 e 200 kPa, controlados por um manômetro eletrônico.

Após a moldagem, os corpos de prova foram saturados por capilaridade por um período de 24 horas sobre uma placa porosa coberta por uma lâmina de papel filtro dentro de uma bandeja com água destilada e deaerada, com lâmina d'água até a metade da altura do corpo de prova.

Em seguida a câmara foi montada na seguinte disposição:

- i) Amostra saturada sobre a pedra porosa de alta entrada de ar previamente saturada;
- ii) Pedra porosa comum sobre a amostra saturada;
- iii) Cabeçote metálico sobre a pedra porosa comum, para a devida transferência de carga axial à amostra;
- iv) Parte superior da câmara.

Assim que montada, a câmara foi fechada, levada à prensa e conectada ao sistema de ar comprimido. A sucção foi imposta por meio de um sistema de ar comprimido, no interior da câmara, com valor de pressão equivalente ao valor da sucção desejada. Porém, antes da imposição de pressão de ar, foi necessário aplicar certa carga ao sistema, necessária para combater o empuxo que seria gerado pela sucção imposta.

Com a imposição da sucção, parte água presente na amostra saturada foi expulsa até atingir o equilíbrio de umidade e sucção do solo, a qual foi monitorada, com auxílio de uma bureta conectada à base da câmara e um cronometro, através da vazão de saída de água. Quando a vazão estabilizava-se, a imposição da sucção estava alcançada e, a partir desse ponto, as cargas podiam ser aplicadas ao sistema.

As aplicações das cargas foram realizadas para a obtenção dos deslocamentos axiais das amostras, através do carregamento de anilhas de ferro (de massas conhecidas) na alavanca do sistema, medidos por um extensômetro digital.

Cada estágio de carregamento correspondia ao dobro do anterior e resultaram em tensões verticais líquidas ( $\sigma - u_a$ ) medidas no tempo de 0, 1, 2:15, 4, 9, 12:15, 16, 25, 36, 49, 64 minutos e depois de 24 horas. Ao término do carregamento, procedeu-se o estágio de descarregamento. Todos os estágios respeitaram o período de 24 horas, para que a estabilização da deformação ocorresse devidamente.

A Figura 5.18 mostra o sistema do ensaio edométrico com sucção controlada, conectado ao painel que disponibiliza a pressão de ar necessária para o ensaio.

Ao término do carregamento, procedeu-se o estágio de descarregamento.



Figura 5.18 - Sistema do ensaio edométrico com sucção controlada.

### 5.5. Ensaio de resistência ao cisalhamento

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos por meio de ensaios triaxiais do tipo CD (consolidado drenado), para amostras saturadas e não saturadas. Para isso, utilizou-se o equipamento triaxial existente no Laboratório de Mecânica dos solos da UNESP/Bauru (Fig. 5.19). O equipamento tem comandos manuais e possui dispositivos capazes de medir a pressão aplicada e a variação volumétrica que ocorre na câmara, assim como o deslocamento e a força axial da amostra, além de um software de aquisição de dados.



Figura 5.19 - Equipamento triaxial disponível no Laboratório de Mecânica dos solos da UNESP/Bauru.

#### ***5.5.1. Moldagem dos corpos de prova***

A moldagem dos corpos de prova foi realizada a partir da amostra indeformada do solo, com cerca de 50 mm de diâmetro ( $\varnothing$ ) e altura (h) variando entre  $2\varnothing \leq h \leq 2,5\varnothing$ .

Para chegar a este formato, a amostra indeformada foi dividida em pequenos retângulos, com medidas levemente maiores que a desejada para o CP. Cada retângulo, então, foi nivelado em sua base e topo com auxílio de um berço metálico. Por fim, os CPs foram talhados em torno de moldagem para dispor da forma cilíndrica. Durante a talhagem, as aparas foram coletadas para determinação do teor de umidade do solo com auxílio de cápsulas metálicas e estufa a 104° C.

Em seguida, a massa do CP foi determinada com auxílio de uma balança digital com precisão de 0,01g e suas dimensões aferidas com paquímetro digital. Em posse da umidade natural do solo, foi possível calcular os índices físicos do solo nas condições naturais de campo.

Por fim, todos os CPs moldados foram embalados com filme plástico, identificados e acondicionados na câmara climatizada presente no Laboratório de Mecânicas dos Solos da UNESP/Bauru para preservar a umidade natural do solo.



A Figura 5.20 mostra a talhagem do corpo de prova para o ensaio de compressão triaxial assim como o embrulho do CP e sua identificação.



Figura 5.20 - Talhagem, embrulho e identificação do CP para ensaio triaxial.

### 5.5.2. *Ensaio de compressão triaxial convencional*

O ensaio de compressão triaxial convencional foi utilizado para definir os parâmetros de resistência do solo saturado, os seja, com sucção nula. O ensaio foi conduzido nas seguintes etapas: Montagem da câmara triaxial; Saturação; Consolidação e Cisalhamento do corpo de prova.

A montagem da câmara triaxial foi realizada posicionando o corpo de prova, já moldado, sobre a base da câmara com pedras porosas em seu topo e base, e o envolvendo com uma membrana impermeável de látex. A cima da pedra porosa de topo sobrepôs-se o cabeçote da câmara e, por fim, o 'rings foram dispostos no topo e na base da amostra para veda-la. Após a montagem, a câmara foi lacrada, levada à prensa e preenchida com água destilada e deaerada.

A Figura 5.21 apresenta os materiais necessários e o procedimento de montagem da montagem da câmara triaxial.



Figura 5.21 - Materiais e montagem da câmara triaxial.

A saturação foi realizada por meio da imposição de contrapressão. Para isso, incrementos de 25 kPa de contrapressão de base e confinante foram impostos, mantendo-se uma tensão efetiva a cerca de 10 kPa.

Utilizou-se o parâmetro de Skempton (B) para avaliar a saturação da amostra. A cada incremento, seu valor foi calculado e admitiu-se saturado quando maior que 0,95.

A Figura 5.22 ilustra graficamente os incrementos de pressão seus respectivos valores de B.

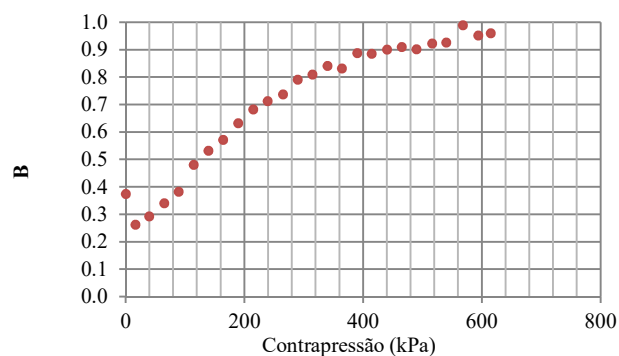


Figura 5.22 - Parâmetro de saturação do CP-1.

Com a amostra saturada, iniciou-se a fase de consolidação da amostra. Com esse propósito, uma tensão de confinamento efetiva foi imposta ao CP. Neste momento, manteve-se a válvula de contrapressão de base aberta para garantir o ensaio Drenado e a medição da variação de volumétrica ocorrida na câmara. Considerou-se a amostra consolidada quando o valor da variação volumétrica manteve-se constante.

Finalizada a fase de consolidação, o valor do volume final do CP e sua respectiva área foram calculados a partir dos valores coletados de variação volumétrica da câmara (Equação 5.4 e 5.5).

$$V_f = V_i \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{100}\right) \quad (5.4)$$

$$A = \frac{V_f}{h_{CP}} \quad (5.5)$$

Em que:

$V_f$ : Volume final do CP;

$V_i$ : Volume inicial do CP;

$\varepsilon_v$ : Deformação volumétrica medida no final da fase de consolidação;

$A$ : Área final do CP após a fase de consolidação;

$h_{CP}$ : Altura do CP.

Após a fase de consolidação, deu-se início a etapa de cisalhamento levando o corpo de prova à ruptura com velocidade de 0,10 mm/min. Depois do rompimento do CP, foi possível traçar, através dos dados coletados de carga, variação volumétrica e deformação axial, os gráficos de tensão e deformação volumétrica por deformação axial, para posterior cálculo de parâmetros de resistência do solo ( $c$  e  $\phi$ ).

A Equação 5.6 mostra o cálculo da tensão desvio ocorrida durante o cisalhamento por meio da área final do CP nessa etapa (5.7).

$$A_{cis} = A \frac{\left(1 - \frac{\varepsilon_{vcis}}{100}\right)}{\left(1 - \frac{\varepsilon_a}{100}\right)} \quad (5.6)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{C_{aplicada}}{A_{cis}} \quad (5.7)$$

Em que:

$A_{cis}$ : Área final do CP na etapa de cisalhamento;

$A$ : Área final do CP na fase de consolidação;

$\varepsilon_{vcis}$ : Deformação volumétrica medida no final do cisalhamento;

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ : Tensão desvio ocorrida durante o cisalhamento;

$C_{aplicada}$ : Carga aplicada no CP.

Dessa maneira, foi possível obter a envoltória de resistência no plano  $s \times t$  pelas equações 5.8 e 5.9:

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (5.8)$$

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (5.9)$$

Finalmente, os parâmetros de resistência da amostra ensaiada puderam ser calculados pela fórmula de ajuste a curva  $s \times t$  e as seguintes correlações:

$$t = a + s * tg(\alpha) \quad (5.10)$$

$$sen(\phi) = tg(\alpha) \quad (5.11)$$

$$c = a/cos(\phi) \quad (5.12)$$

Em que:

$a$  e  $\alpha$ : coeficientes de ajuste da curva  $s \times t$ ;

$c$  e  $\phi$ : intercepto de coesão e ângulo de atrito interno.

Para obtenção da envoltória de resistência saturado, foi necessário realizar o ensaio de compressão triaxial em 3 corpos de prova com diferentes valores de pressão

confinante ( $\sigma_3$ ). A Tabela 5.1 apresenta os valores de sucção que os corpos de provas foram submetidos juntamente com o valor confinamento ( $\sigma_3 - u_a$ ) de cada ensaio.

Pela inexperiência no manuseio do sistema manual de compressores de ar, tendo em vista que o ensaio saturado foi um dos primeiros ensaios de compressão triaxial a serem realizados, o CP-1 foi submetido a 75 kPa de confinamento, quando o comum na literatura é de 50 kPa. Entretanto, esse confinamento não influencia no resultado final da envoltória de resistência esperada para o solo saturado.

Tabela 5.1 - Características dos ensaios triaxiais realizados com amostras saturadas.

Tipo	Sucção (kPa)	CP	$\sigma_3$ (kPa)
CD	0	1	75
		2	100
		3	200

### 5.5.3. Ensaio de compressão triaxial com sucção controlada

O ensaio de compressão triaxial com sucção controlada foi utilizado para definir os parâmetros de resistência de amostras não saturadas, baseado na técnica de translação de eixos descrita no item 3.1.4.1.

O ensaio foi conduzido nas seguintes etapas: Pré-imposição da sucção; Montagem da câmara triaxial; Reestabelecimento da sucção; Consolidação e Cisalhamento.

Devido à facilidade de execução e a possibilidade de impor a sucção em vários corpos de prova ao mesmo tempo, utilizou-se a câmara de pressão de Richards, já mencionada no item 3.2.4.4, para a pré-imposição de sucção e, conseqüentemente, reduzir o tempo de ensaio. Para isso, os corpos de prova moldados foram posicionados sobre a superfície da placa porosa de alto valor de entrada de ar de 5 bar, previamente saturada. Em seguida, os corpos de prova foram umedecidos, com água destilada e deaerada, por gotejamento até atingir um grau de saturação de aproximadamente 70%, pré-calculado na fase de moldagem, através dos índices físicos de cada CP. Feito isso, a câmara foi lacrada e impôs-se uma pressão de ar na parte interna da câmara, para assim começar a drenagem dos CPs, a qual foi monitorada diariamente por meio de uma bureta conectada à base da câmara. Considerou-se o equilíbrio da sucção o cessar do fluxo de água na bureta. Finalizada essa etapa, um CP por vez foi rapidamente conduzido para a montagem da câmara triaxial.

A Figura 5.23 mostra o posicionamento dos CPs nas câmaras de pressão e seu umedecimento por gotejamento.



Figura 5.23 - Posicionamento e gotejamento dos CPs na fase de pré-imposição de pressão.

A montagem da câmara triaxial foi realizada de modo análogo à montagem do ensaio convencional. Diferenciando-se, apenas, na base da câmara, à qual foi adaptada uma pedra porosa de 5 bar de entrada de entrada de ar conectada à uma bureta com coluna d'água no nível da placa. O corpo de prova é, então, posicionado sobre essa placa, sem a necessidade de colocar a pedra porosa convencional na base do CP.

A Figura 5.24 exhibe a base da câmara triaxial adaptada para o ensaio de sucção controlada.

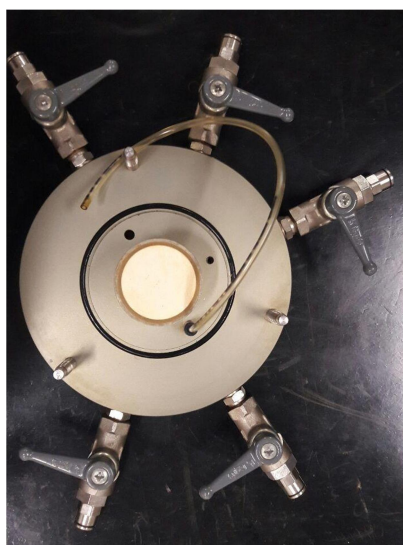


Figura 5.24 - Base da câmara triaxial adaptada com uma pedra porosa de alto valor de entrada de ar.

Após a montagem, inicia-se o reestabelecimento da sucção na câmara triaxial aplicando-se uma pressão de ar no topo da amostra, compatível com a sucção de interesse. O nível de água na bureta foi monitorado por um período de 24 horas.

Alcançado o equilíbrio da sucção, iniciou-se a fase de consolidação da amostra aplicando-se a tensão de confinamento líquida de interesse. Neste momento, manteve-se as válvulas de pressão de ar e bureta abertas. Considerou-se a amostra consolidada quando o valor da variação volumétrica manteve-se constante. O valor do volume final do CP e sua respectiva área foram calculados pelas equações 5.4 e 5.5.

Na etapa de cisalhamento, o solo foi levado à ruptura com velocidade de 0,05 mm/min e após o rompimento de 3 corpos de prova, a envoltória de resistência para a sucção imposta foi traçada e os parâmetros de resistência do solo ( $c$  e  $\phi$ ) foram obtidos.

Foram realizados 6 ensaios triaxiais com sucção controlada, sendo 3 com a imposição de sucção de 50 kPa e 3 com 200 kPa. Em adição, 3 ensaios foram realizados sem as etapas de imposição de sucção, para amostras não saturadas secas ao ar ( $s > 15$  MPa).

A Tabela 5.2 mostra as características dos ensaios triaxiais realizados com amostras não saturadas em diferentes valores de confinamento e sucção.

Pelo mesmo motivo exposto no item 5.5.2, o CP-11 foi submetido a 150 kPa de confinamento, quando o comum na literatura é de 100 kPa. Entretanto, esse confinamento não influencia no resultado final da envoltória de resistência esperada para o solo seco ao ar.

Tabela 5.2 - Características dos ensaios de compressão triaxial com sucção controlada.

Tipo	Sucção (kPa)	CP	$\sigma_3$ (kPa)
CD	50	4	50
		5	100
		6	200
CD	200	7	50
		8	100
		9	200
CD	>15000	10	50
		11	150
		12	200

## 5.6. Ensaio de permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo se deu através do método de carga constante.

A Moldagem do Corpo de prova de maneira análoga ao exposto no item 5.6.1 e para evitar a percolação de água radialmente, o CP foi parafinado em sua lateral (Figura 5.25).

A montagem do permeâmetro deu-se nos seguintes passos:

- a) Uma camada drenante de areia grossa foi colocada na base do permeâmetro, com espessura 3 cm (Figura 5.26).
- b) Apoiou-se o CP sobre a camada drenante;
- c) Colocou-se parafina líquida na lateral do CP, com espessura de 1/3 da altura do mesmo;
- d) Uma pasta de betonita foi colocada sobre a parafina, até 2/3 da altura do CP;
- e) Sobre a camada de betonita, preencheu-se novamente de parafina líquida, até completar a altura do CP;
- f) Completou a altura restante do permeâmetro com uma camada drenante de areia grossa;
- g) Por fim, o permeâmetro é lacrado e saturado através de circulação de água.

Feito a montagem do permeâmetro e a saturação do corpo de prova, deu-se início ao ensaio. Primeiramente, determinou-se o valor da altura de carga, que equivale à distância entre os níveis de jusante e montante. Então, permitiu-se a percolação água pelo CP, por certo tempo. Com auxílio de um béquer e um cronômetro, mediu-se certo volume de água que percolou através do corpo de prova ao longo do tempo (Figura 5.27). Em adição, mediu-se a temperatura da água usada no ensaio.

Essas medições foram repetidas 10 vezes esperando um intervalo de, no mínimo, 30 min. Em posse desses dados, foi possível calcular o coeficiente de permeabilidade da amostra, com base na Equação 5.13. Após o ensaio, desmontou-se o permeâmetro e mediu-se o teor de umidade da amostra.

$$k = \frac{V.H}{A.L.t} \quad (5.13)$$



Em que:

$k$  = Coeficiente de permeabilidade;

$V$  = Volume de água percolado no tempo;

$H$  = Altura do corpo de prova;

$A$  = Área do corpo de prova;

$L$  = Altura de carga, constante durante o ensaio;

$t$  = Tempo correspondente ao volume medido.



Figura 5.25 - Impermeabilização radial do CP com parafina.



Figura 5.26 - Camada drenante.



Figura 5.27 - Medição do volume percolado.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

### 6.1. Caracterização e classificação

A Figura 6.1 mostra a curva granulométrica obtida do solo e a Tabela 6.1 apresenta os valores da massa específica dos sólidos e os limites de consistência juntamente com seus índices físicos.

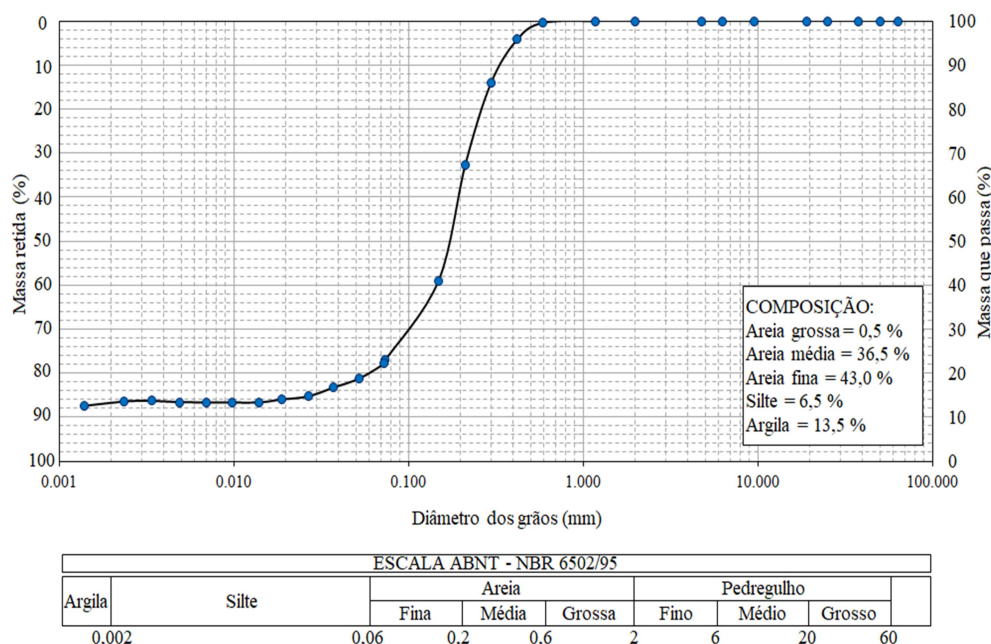


Figura 6.1 - Ensaios de granulometria do solo.

Tabela 6.1 - Massa específica dos sólidos, limite de Atterberg e Índices físicos médios.

Massa específica dos sólidos		
$\rho_s$	(g/cm <sup>3</sup> )	2,618
Limete de Atterberg		
LL	(%)	17,5
LP	(%)	-
IP	(%)	-
Índices físicos		
$w^*$	(%)	11,8
$\rho$	(g/cm <sup>3</sup> )	1,85
$\rho_d$	(g/cm <sup>3</sup> )	1,65
$e$	-	0,58
$n$	(%)	36,7
$S_r^*$	(%)	52,9

\* valores referentes à data de coleta

Os dados foram obtidos através da moldagem de 12 corpos de prova preparados para a realização dos ensaios de compressão triaxial.

Como mostra a Figura 6.1, o solo estudado trata-se de uma areia fina a média pouco argilosa cinza e vermelha, composta por 80,0% de areia, 13,5% de argila e 6,5% de silte. Devido à pequena fração de finos na composição, os ensaios para determinação dos limites de consistência forneceram somente o limite de liquidez da amostra do solo, sendo então considerado um solo não plástico.

## **6.2. Propriedades hidráulicas**

Para obter as propriedades hidráulicas do solo e compreender a influência da sucção em seu comportamento, foram realizados ensaios de curva de retenção de água no solo e ensaio de condutividade hidráulica saturada em laboratório.

### ***6.2.1. Curvas de retenção da água no Solo***

As curvas de retenção de água no solo foram determinadas seguindo as trajetórias de secagem e umedecimento para amostras indeformadas e são compostas por pontos experimentais obtidos pelas técnicas de funil de placa porosa, papel filtro e câmara de pressão de Richards. O uso das diferentes técnicas permite a obtenção de uma curva de retenção de água representativa, com uma ampla faixa de sucção.

Os pontos experimentais obtidos pelos diferentes ensaios estão representados em termos dos pares ordenados de umidade gravimétrica ( $w$ ) e sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) nas Figuras 6.2 e 6.3 para as curvas de secagem e umedecimento.

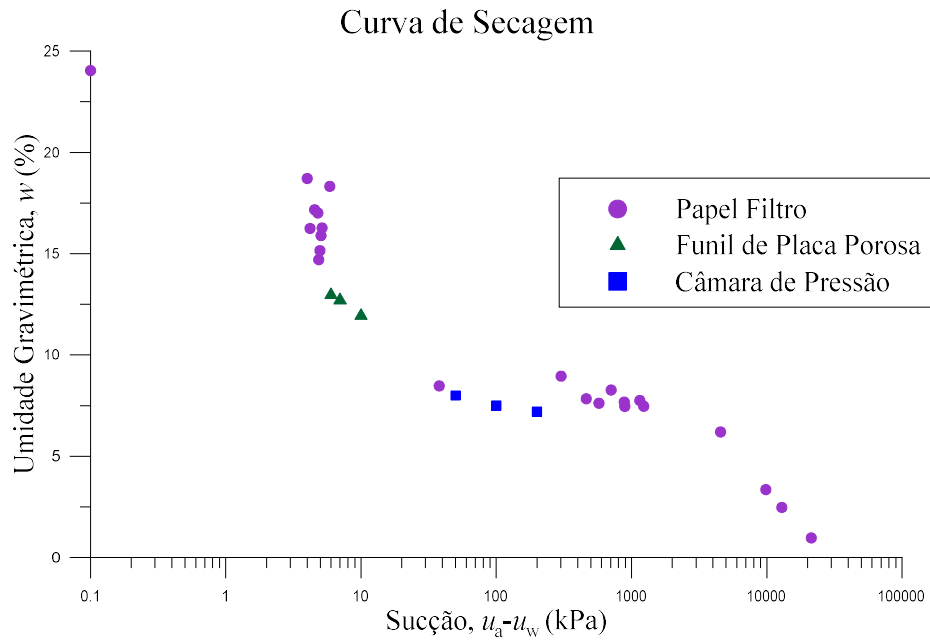


Figura 6.2 - Pontos experimentais da curva de retenção pela trajetória de secagem.

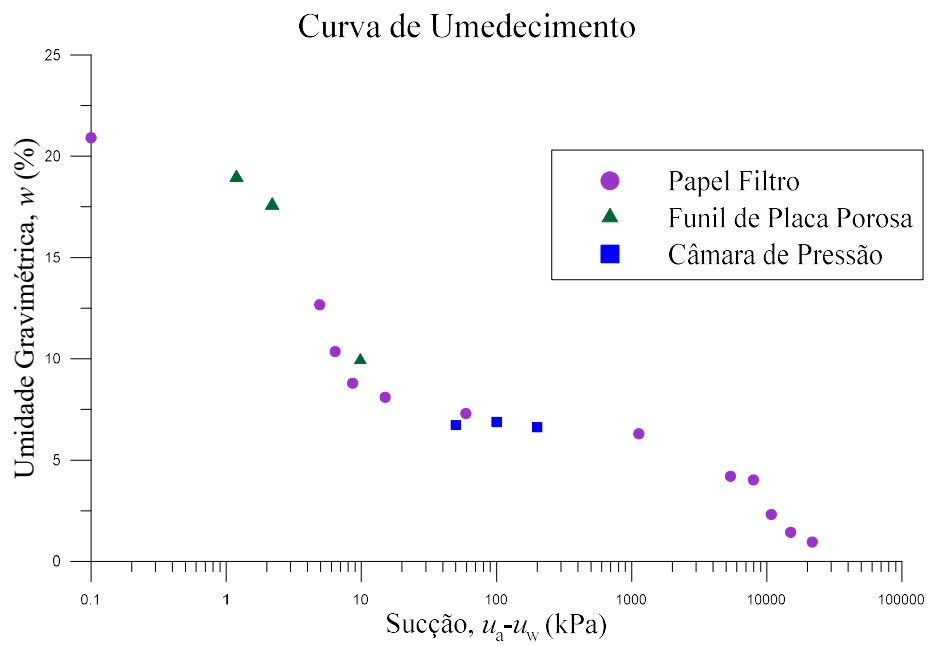


Figura 6.3 - Pontos experimentais da curva de retenção pela trajetória de umedecimento.

Nota-se pelas Figuras 6.1 e 6.2 um comportamento bimodal atribuído pela presença de duas pressões de entrada de ar, uma relacionada aos macroporos e outra aos microporos. Os macroporos são os poros formados pela estrutura granular do solo e algumas vezes são visíveis a olho nu, enquanto os microporos são poros existentes no interior dos agregados compostos pela fração fina do solo.

Para ambas as trajetórias, ajustaram-se curvas aos dados experimentais segundo a equação de Van Genuchten (1980) indicada na Equação 6.1.

$$w = w_r + (w_{sat} - w_r) \cdot \frac{1}{[1 + (\alpha * s)^n]^m} \quad (6.1)$$

Em que:

$w_r$  = Umidade residual;

$w_{sat}$  = Umidade de saturação;

$\alpha, n, m$  = Parâmetros de forma da curva de retenção;

$s$  = Sucção.

Devido ao formato bimodal, os ajustes foram realizados em dois trechos para cada trajetória (Trecho 1 e 2) considerando um ponto experimental como umidade residual do Trecho 1 e umidade de saturação do Trecho 2.

Nas Figuras 6.4 e 6.5 são apresentados ajustes de Van Genuchten (1980) juntamente com os pontos experimentais para as trajetórias de secagem e umedecimento, respectivamente. Na Figura 6.6 estão apresentadas as sobreposições dos ajustes.

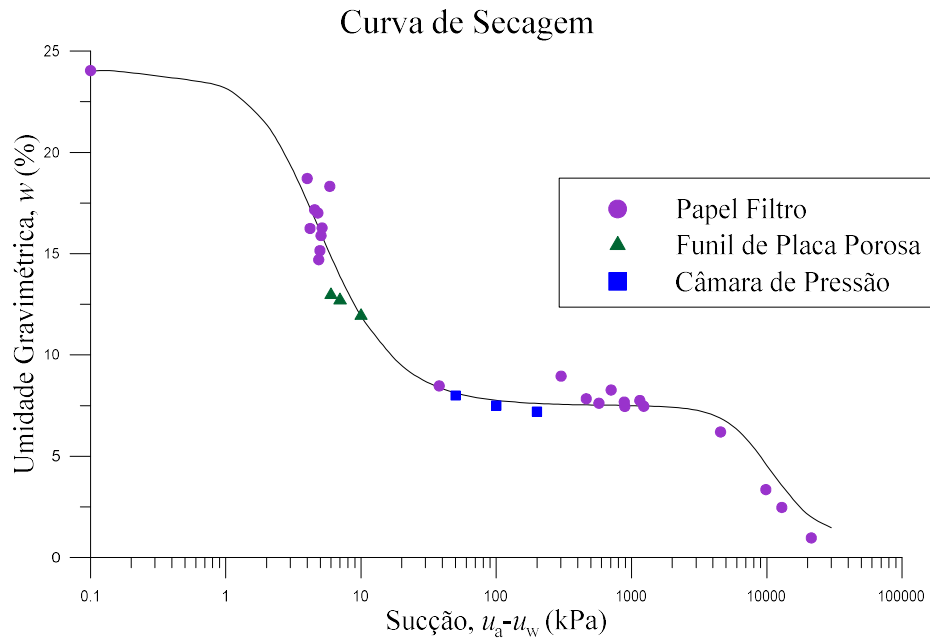


Figura 6.4 - Ajuste da curva de retenção de água sobre trajetória de secagem.

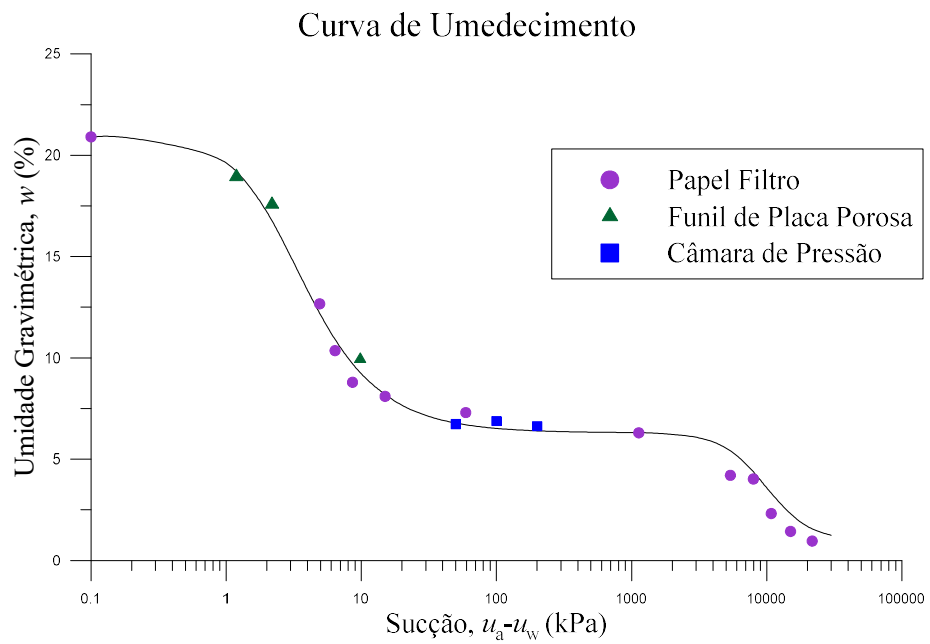


Figura 6.5 - Ajuste da curva de retenção de água sobre trajetória de umedecimento.

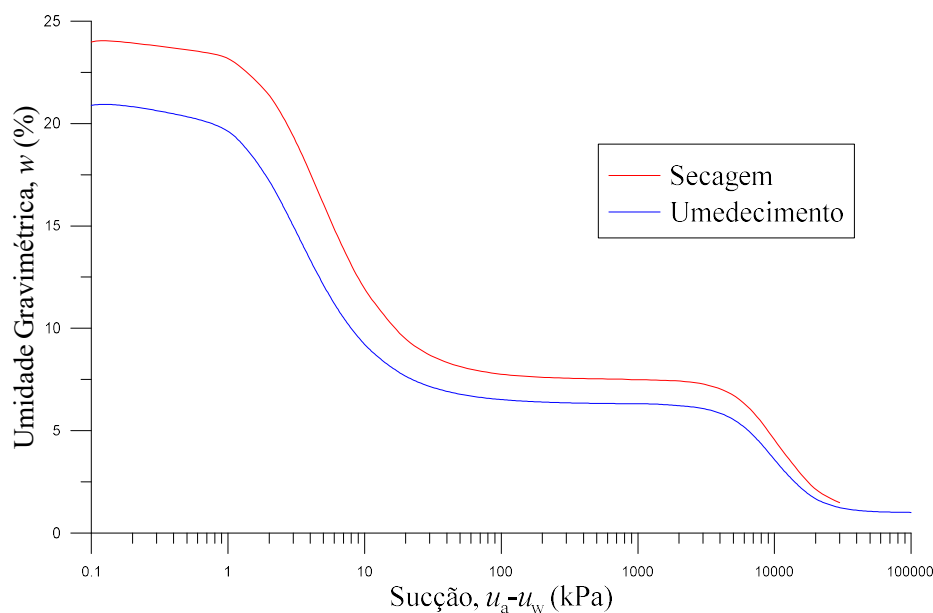


Figura 6.6 - Sobreposição dos ajustes para curvas de retenção de secagem e umedecimento.

A Tabela 6.3 apresenta os parâmetros de ajuste para as curvas sobre trajetória de secagem e umedecimento, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), que indicam a qualidade dos ajustes obtidos.

Tabela 6.2 - Parâmetros de ajustes de Van Genuchten (1980).

Curva	Trecho	$w_{sat}$ (%)	$w_r$ (%)	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$m$	$n$	$R^2$
<i>Umedecimento</i>	1	20,9	6,3	0,3960	0,3917	1,9291	0,990
	2	6,3	1,0	0,0001	1,0366	2,6469	0,987
<i>Secagem</i>	1	24,0	7,5	0,2589	0,6778	1,8798	0,950
	2	7,5	1,0	0,0001	0,8723	2,6676	0,995

As curvas obtidas para ambas as trajetórias se ajustam adequadamente aos pontos experimentais, com valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) satisfatórios, alcançando no mínimo 0,95. Assim é possível afirmar que o modelo de ajuste proposto por van Genuchten é representativo para esse solo quanto à retenção de água, o que possibilita uma boa estimativa da sucção a partir de uma umidade gravimétrica.

As curvas em formato bimodal tipicamente apresentam uma zona de dessaturação dos macroporos, que ocorre num breve intervalo de sucção, e uma zona residual sensível a qualquer mudança de umidade gerando grandes mudanças de sucção.

O início da dessaturação dos macroporos do solo é marcado pela entrada de ar, que tem, para ambas as trajetórias, valores de aproximadamente 1 kPa de sucção.

Quanto a dessaturação dos microporos, ambas as trajetórias possuem valores de aproximadamente 4000 kPa de sucção.

Observa-se pela Figura 6.6 a ocorrência de histerese (diferença entre as curvas de umedecimento e secagem) que estende até altos valores de sucções. Hillel (1980) a atribuí a não uniformidade dos poros, ângulo de contato solo-água, bolhas de ar oclusas e variações de volume causadas pelos ciclos de umedecimento e secagem do solo.

Ressalta-se a importância da determinação curva de retenção para uma ampla faixa de sucção uma vez que o processo erosivo estudado envolve solo superficial cuja sucção pode variar significativamente devido à interação do solo com a atmosfera.

### **6.2.2. Condutividade Hidráulica**

A condutividade hidráulica foi determinada em laboratório por meio do ensaio de permeabilidade à carga constante descrito no item 5.7. Um corpo de prova saturado foi submetido a um fluxo de água equivalente a altura de carga determinada. O volume de água percolado foi medido ao longo do tempo e a condutividade hidráulica foi obtida com base na Lei de Darcy (Eq. 5.13). O resultado obtido para coeficiente de permeabilidade foi de  $3,7 \cdot 10^{-6}$  m/s, sendo uma alta permeabilidade e condizendo com aquela esperada por Riyis no item 4.5.

## **6.3. Propriedades mecânicas**

Para obter as propriedades mecânicas do solo e compreender a influência em seu comportamento, foram realizados de compressão triaxial e ensaios edométricos, ambos com e sem controle de sucção.

### **6.3.1. Resistência ao cisalhamento**

Para o estudo da resistência ao cisalhamento e análise da influência da sucção sobre seus parâmetros, foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo CD (consolidado drenado), com e sem controle de sucção.

Os resultados obtidos pelos ensaios foram plotados em termos de variação volumétrica *versus* raiz do tempo para a fase de consolidação e tensão *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial para a etapa de cisalhamento.



Da fase de consolidação, a Figura 6.7 apresenta as curvas de variação volumétrica no tempo para amostras impostas às sucções de 0 (saturadas), 50, 200 kPa e maior que 15 MPa (secas ao ar).

A sucção das amostras secas ao ar foi aferida no final do ensaio de compressão triaxial pela técnica do papel filtro.

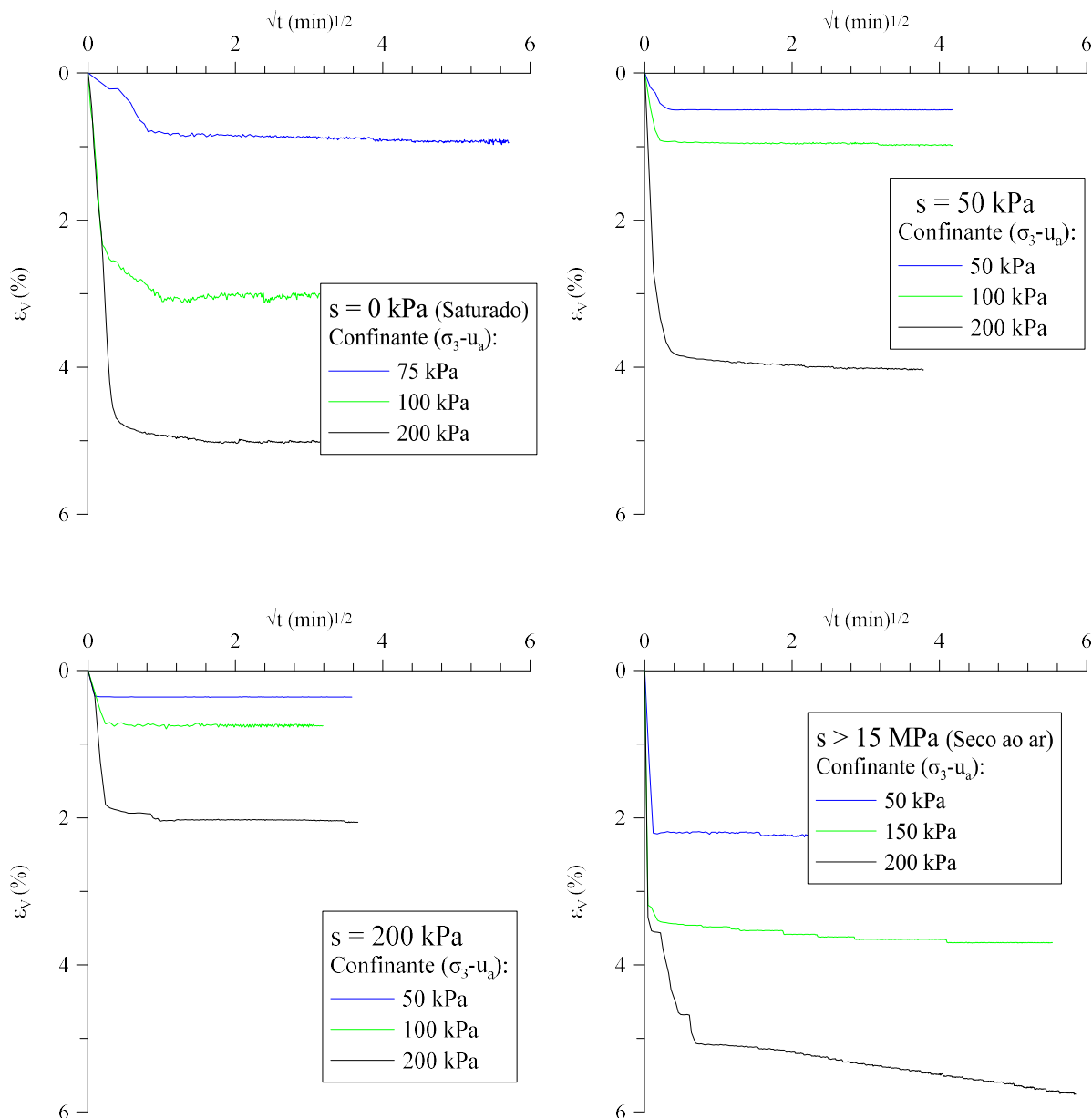


Figura 6.7 - Variação volumétrica da fase de consolidação.

A tendência geral que pode ser notada nas curvas expostas na Figura 6.1 é que a variação volumétrica ocorre bruscamente por volta do primeiro minuto da consolidação e tende a estabilizar-se rapidamente após esse período.

Ao analisar as curvas pelo confinamento ( $\sigma_3 - u_a$ ), nota-se seu efeito sobre a variação volumétrica ( $\varepsilon_v$ ), uma vez que o aumento da tensão confinante elevou a variação de volume em todas as curvas. Quando analisadas pelo efeito da sucção, observa-se que quanto maior a sucção imposta menor é a variação de volumétrica ocorrida, com exceção das amostras secas ao ar que se apresentam mais deformáveis com o aumento da sucção aplicada.

Da etapa de cisalhamento, os resultados obtidos são apresentados nas curvas tensão-deformação plotadas na Figura 6.8.

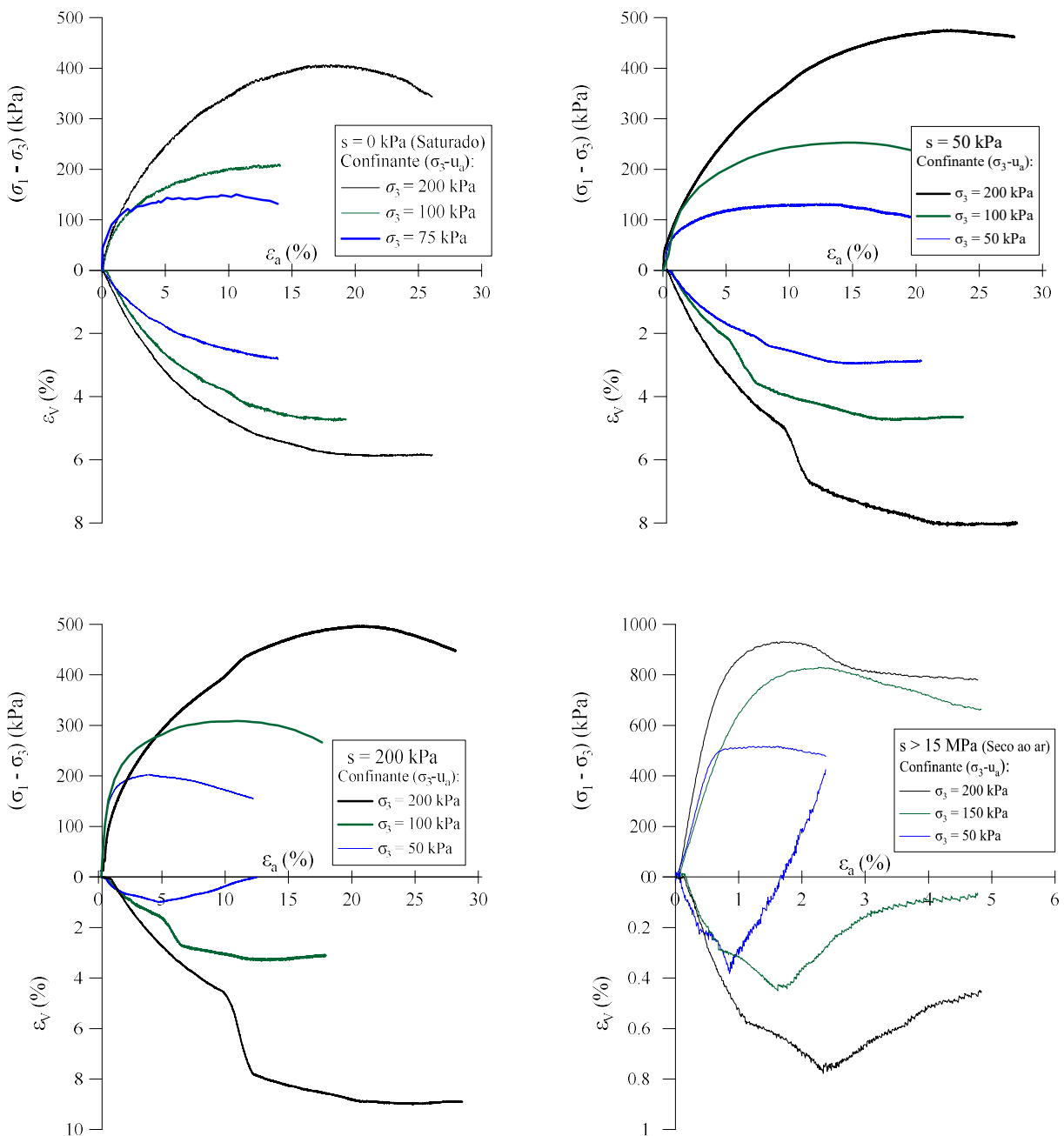


Figura 6.8 - Curvas tensão-deformação e suas respectivas variações volumétricas.

Pelas curvas apresentadas na Figura 6.8 é possível perceber a influência que a tensão confinante possui sobre a resistência ao cisalhamento do solo. Essa influência pode ser observada ao se comparar curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon_a$  de amostras submetidas à mesma sucção e diferentes confinamentos  $(\sigma_3 - u_a)$ . Com essa finalidade pode-se comparar, por exemplo, os ensaios com sucção de 0 kPa (saturado). Nestes ensaios nota-se que a resistência ao cisalhamento das amostras aumenta com a tensão confinante aplicada. E, como pode ser observado nas demais curvas apresentadas, esse é um comportamento geral de todos os ensaios. Considerando a influência da tensão confinante sobre a deformação volumétrica, observa-se que em todas as curvas ocorre um aumento de  $\varepsilon_v$  com o confinamento.

Ao observar o formato das curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon_a$ , nota-se um comportamento diferente para os ensaios de solo seco ao ar ( $s > 15$  MPa) e submetidos a altos confinamentos. Estes apresentam picos de resistência em baixas deformações axiais e, após atingir o valor máximo, a tensão  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  sofre um decréscimo brusco. As demais curvas, no entanto, apresentam formatos semelhantes ao de um material plástico. Ao analisar as curvas com 200 kPa de tensão de confinamento, aquelas submetidas às sucções de 0, 50 e 200 kPa alcançaram baixos valores de máximas tensões  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  e deformações axiais ( $\varepsilon_a$ ) altas. Já a curva seca ao ar obteve valores de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  altos e  $\varepsilon_a$  baixos.

Ainda analisando ensaios submetidos a um mesmo confinamento, é possível notar que em todos os ensaios há a influência da sucção, tanto na resistência do solo quanto na deformação volumétrica ocorridas nos corpos de prova. Nos ensaios, ocorre um aumento da resistência com a sucção imposta. As curvas com 200 kPa de confinamento, por exemplo, apresentam os valores máximos de tensão  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  de 407, 475, 497 e 931 kPa para as sucções de 0, 50, 200 e 1500 kPa, respectivamente. No entanto, as deformações volumétricas não possuem um comportamento padrão e apresentam-se disformes com a imposição da sucção, ora elevando-se, ora reduzindo-se. Apesar disso, é possível observar que as deformações volumétricas máximas ocorrem aproximadamente no mesmo valor de variação axial onde a curva  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon_a$  atinge seu máximo valor de tensão e, após a ruptura, tendem a estabilizar-se apresentando dessa maneira um comportamento de amolecimento, com ruptura do tipo plástica. Esse comportamento só não é notado nas amostras submetidas às altas sucções, já que os valores de  $\varepsilon_v$  apresentam uma queda brusca após a ruptura, indicando dessa maneira um comportamento dilatante da amostra, com ruptura frágil e refletindo na formação de um

plano de ruptura bem definido no corpo de prova ocorrido devido à alta rigidez do solo. Nota-se ainda que o aumento do confinamento tende a reduzir o potencial dilatante do solo.

### ***6.3.2. Envoltórias de resistência***

A partir dos pontos de máxima tensão das curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon_a$  apresentados na Figura 6.8 foram definidas as envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo pelo modelo de Mohr-Coulomb.

As envoltórias estão apresentadas separadamente para cada sucção imposta através das nas Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12. A Tabela 6.4 reúne as tensões principais e máximas e os parâmetros de resistência de intercepto de coesão e ângulo de atrito interno ( $c$  e  $\phi$ ) obtidos para o solo.

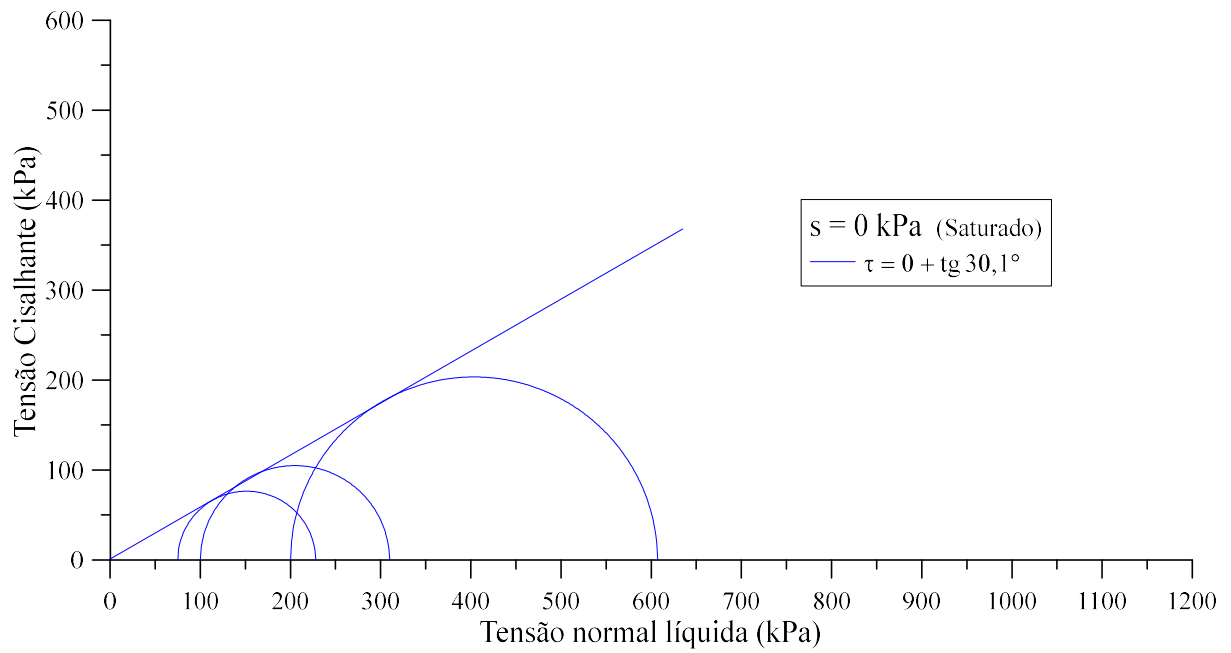


Figura 6.9 - Envoltória de resistência do solo submetido à sucção de 0 kPa (saturado).

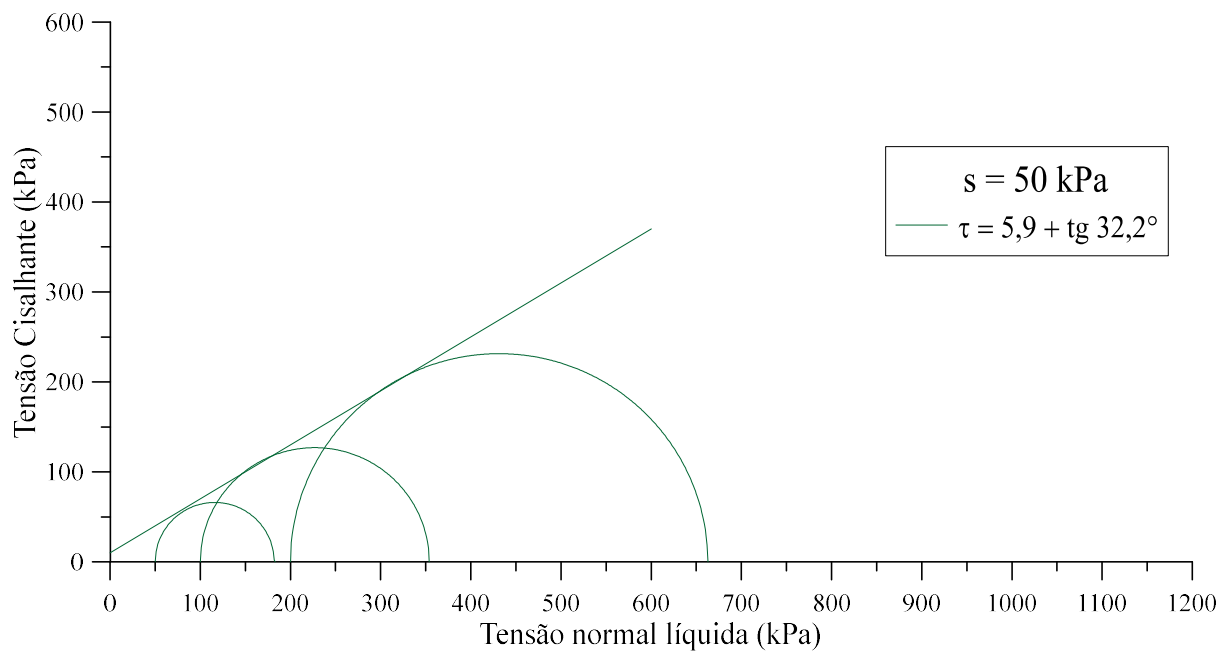


Figura 6.10 - Envoltória de resistência solo submetido à sucção de 50 kPa.

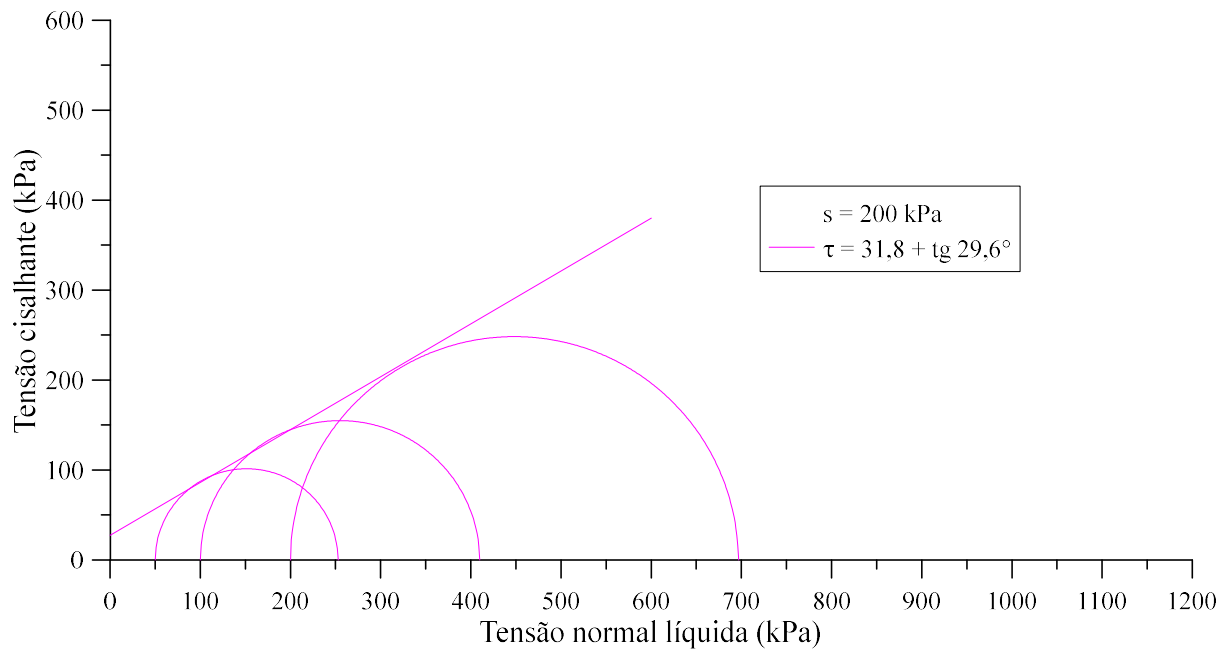


Figura 6.11 - Envoltória de resistência solo submetido à sucção de 200 kPa.

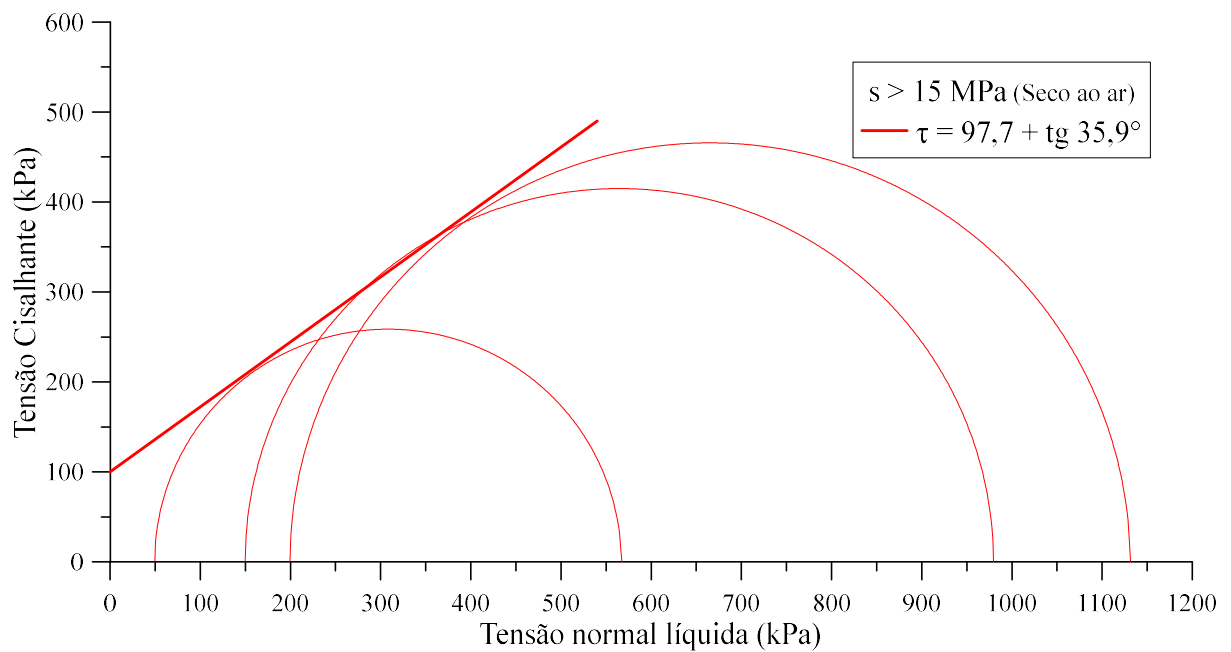


Figura 6.12 - Envoltória de resistência do solo submetido à sucção maior que 15 MPa (seco ao ar).

Tabela 6.3 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento para diferentes sucções.

$s$ (kPa)	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3 \text{ máx}$ (kPa)	$\sigma_1 - u_a$ (kPa)	$R^2$	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
0	75	153	228	0,9998	0	30,1
	100	210	310			
	200	407	607			
50	50	132	182	0,9999	5,9	32,2
	100	254	354			
	200	475	675			
200	50	203	253	0,9997	31,8	29,6
	100	310	410			
	200	497	697			
>15MPa	50	517	567	0,9984	97,7	35,9
	150	830	980			
	200	931	1131			

Pela análise das Figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13, fica evidente a influência da sucção sobre a resistência ao cisalhamento do solo, pois o aumento da sucção provoca uma elevação do valor do intercepto de coesão. No entanto, os dados de ângulo de atrito interno mostram que a sucção tem pouca influência sobre seus valores até a sucção de 200 kPa, onde a variação deste parâmetro não é tão significativa..

Analisando os dados apresentados na Tabela 6.4, é possível observar que o solo saturado ( $s = 0$  kPa) possui um valor de intercepto de coesão muito baixo em relação ao solo seco ao ar ( $s > 15$  MPa), isto é, 0 e 97,7 kPa, respectivamente. Isso indica que, sobre a condição não saturada, as altas sucções podem garantir maior resistência ao solo. Por outro lado, quando saturado apresenta menor resistência visto que possui praticamente o coeficiente de atrito como parâmetro contribuinte na parcela de resistência, já que o intercepto de coesão é nulo. Os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentados indicam uma boa qualidade dos ajustes obtidos.

Por se tratar de um ensaio onde as condições de carregamento e de drenagem são controladas, os parâmetros de resistência obtidos pelo ensaio de compressão triaxial não são idênticos àqueles obtidos por Campos (2014) pelo ensaio de cisalhamento direto apresentado na tabela 4.1.

A Figura 6.14 ilustra as envoltórias de resistência de todos os ensaios e o plano formado entre suas interpolações no espaço ( $\sigma - u_a$ ),  $\tau$ ,  $s$ .

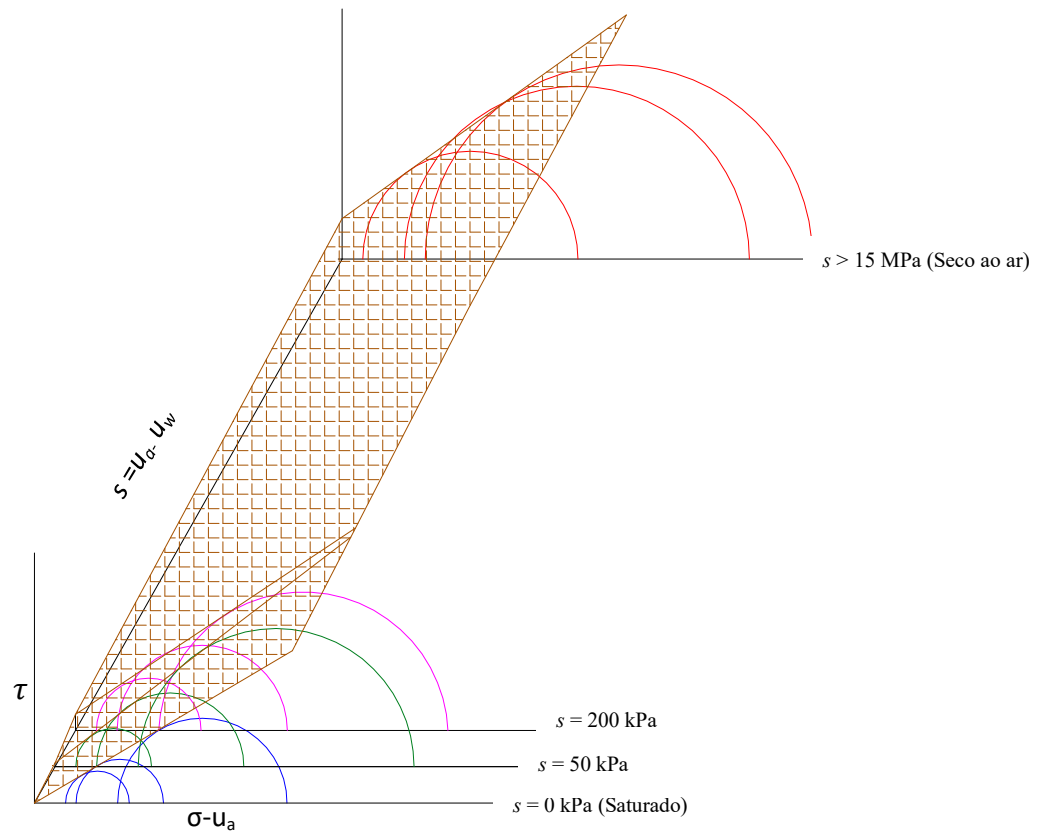


Figura 6.13 - Plano formado entre a interpolação das envoltórias de resistência e a sucção (sem escala).

Para representar o aumento da resistência do solo com a sucção, utilizou-se a metodologia de Vilar (2007) pela aplicação do modelo hiperbólico apresentado na Equação 6.2.

$$c = c' + \frac{s}{a + b \cdot s} \quad (6.2)$$

Em que:

$a$  e  $b$  = Parâmetros de ajuste

$s$  = Sucção

Os parâmetros de ajuste  $a$  e  $b$  são obtidos através das Equações 6.3 e 6.4, em que  $a$  corresponde à derivada da Equação 6.2 com sucção tendendo a zero e  $b$  corresponde ao limite da mesma equação com sucção tendendo ao infinito.



$$\frac{1}{a} = \tan \phi' \quad (6.3)$$

$$b = \frac{1}{c_{ult} + c'} \quad (6.4)$$

Em que  $\phi'$  e  $c'$  são parâmetros efetivos obtidos a partir de ensaios de amostras saturadas e  $c_{ult}$  corresponde ao intercepto de coesão máxima obtido em ensaios de amostras secas ao ar.

A Tabela 6.5 apresenta os ajustes encontrados com base na Equação 6.2, as coesões última e efetiva e ângulo de atrito interno efetivo.

Tabela 6.4 - Ajustes e parâmetros do solo não saturado.

$a$	$b$	$c_{ult}$	$c'$	$\phi' (^{\circ})$
8,804	0,0098	97,7	0	30,1

A Figura 6.15 apresenta o intercepto de coesão em função da sucção, com dados experimentais e o ajuste da curva pelo modelo hiperbólico.

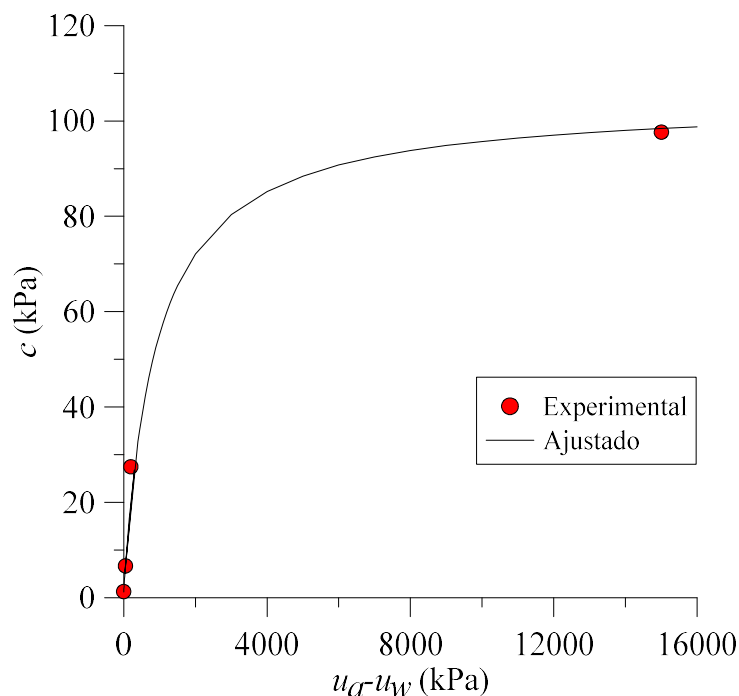


Figura 6.14 - Previsão do intercepto de coesão pelo ajuste hiperbólico de Vilar (2007).

Como visto, o intercepto de coesão apresenta um comportamento hiperbólico com a sucção. Esse comportamento está de acordo com os resultados apresentados na

Tabela 6.2, onde os dados experimentais que indicam a ocorrência de elevação do intercepto de coesão com a sucção imposta e um valor quase constante de ângulo de atrito interno. Assim, o modelo hiperbólico de Vilar (2007) possui um ajuste satisfatório para a representação da resistência com a sucção do solo estudado.

### 6.3.3. Ensaios edométricos com sucção controlada

Para o estudo da influência da sucção sobre a compressibilidade do solo, foram realizados 4 ensaios edométricos aplicando-se trajetórias de carregamento–descarregamento a sucções constantes de 0, 50, 200 kPa e maior que 15 MPa (esta aferida no final do ensaio edométrico pela técnica do papel filtro).

Os resultados obtidos pelos ensaios são apresentados na Figura 6.16 em termos do logaritmo da tensão vertical líquida ( $\sigma-u_a$ ) versus índice de vazios normalizados ( $e/e_0$ ). Esses resultados poderão servir como base de dados para pesquisas futuras visando a modelagem do solo.

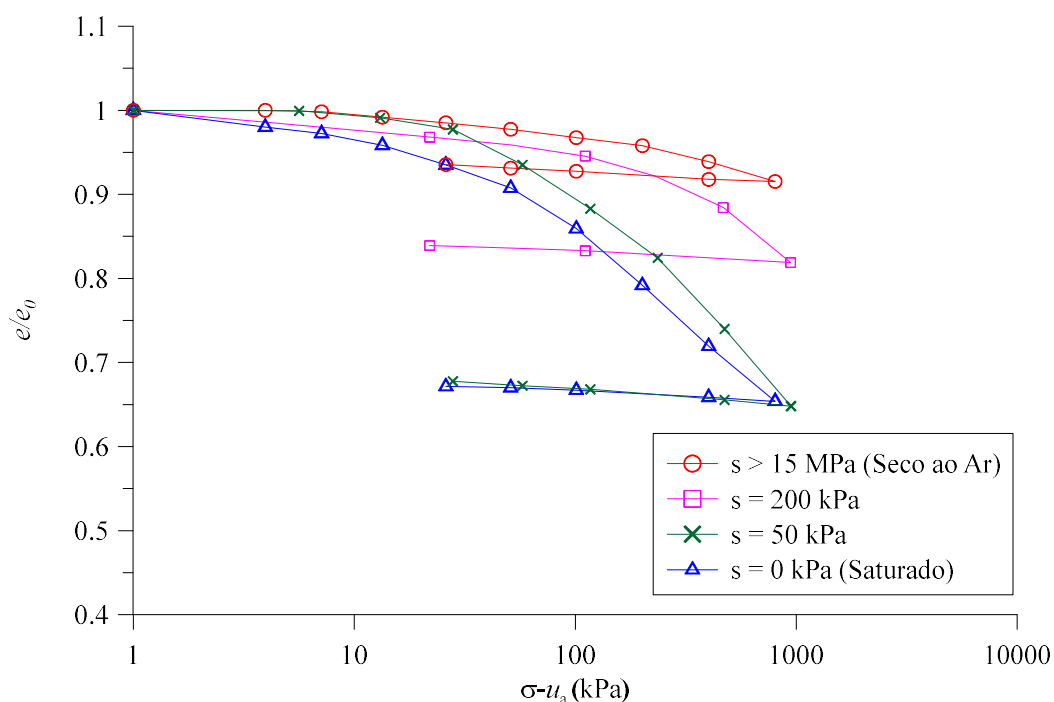


Figura 6.15 - Curvas de compressão edométrica do solo por sucção imposta.

Analisando a Figura 6.16 é possível notar que o solo apresenta-se colapsível por volta de 100 kPa de confinamento. Como o material estudado é correspondente à camada superficial do solo, o nível de confinamento em campo é muito baixo (menor

que 10 kPa) e essa camada não sofre colapso. Mas, mesmo apresentando grandes variação somente para níveis de confinamento muito elevados, o material sofre influência da sucção.

Na Tabela 6.6 são apresentados os valores dos parâmetros de compressibilidade considerando a tensão de pré-adensamento ( $\sigma-u_a$ ) e índice de compressão do solo ( $c_c$ ).

Tabela 6.5 – Parâmetros de compressibilidade do solo.

$s$ (kPa)	$\sigma_{ad}-u_a$ (kPa)	$c_c$
0	50	0,24
50	55	0,21
200	76	0,20
15000	112	0,03

Pela análise da Tabela 6.5 é possível notar a influência da sucção sobre os parâmetros de compressibilidade do solo. Considerando a tensão de pré-adensamento ( $\sigma-u_a$ ) observa-se que ocorre um aumento em seu valor com a sucção imposta. Já levando em consideração o índice de compressão do solo ( $c_c$ ), percebe-se que ocorre uma diminuição em seu valor a cada sucção imposta.

#### **6.4. Avaliação do mecanismo da erodibilidade do solo a partir dos resultados experimentais e histórico de informações anteriores.**

O solo, composto predominantemente areia (80%), por si só já poderia justificar a ocorrência do mecanismo de erodibilidade. Entretanto, esse material está exposto às variações climáticas que se alternam entre períodos de chuva intensa, que saturam a camada superficial do solo, e períodos de estiagem, que levam o solo à condição não saturada.

A camada superficial do solo interage diretamente com a atmosfera, que varia de umidade e altera o balanço hídrico do solo. No período de estiagem, o solo apresenta alta avidéz por água e pode atingir sucções extremas nos seus primeiros centímetros. Essa camada de solo superficial é a mais afetada pelo processo erosivo hídrico, pois sofre com impacto da chuva e com as variações de resistência e sucção decorrentes do contato com a água da chuva.

A sucção da camada superficial está diretamente relacionada à vulnerabilidade aos fenômenos erosivos por relacionar-se ao aparecimento do intercepto de coesão,

grande responsável pela interação entre os grãos e consequente capacidade de resistência do solo.

Para avaliar o mecanismo de erodibilidade da camada superficial junto à variação de sucção faz-se necessário associar ensaios de resistência ao cisalhamento com sucção controlada apresentados no item 6.3.1 aos ensaios de erodibilidade obtidos por Campos (2014) através do ensaio de Inderbitzen apresentados no item 4.5. Essa interpretação dos ensaios de forma associada permite avaliar o mecanismo de erodibilidade sobre uma perspectiva da Mecânica dos Solos Não Saturados.

Os dados analisados do ensaio de Inderbitzen foram das amostras submetidas à inclinação de 30° de rampa, por se tratar de uma angulação representativa da área.

Ao analisar a Figura 4.9, é possível notar que a maior taxa de perda de solo (erodibilidade) ocorreu para a amostra sobre condição saturada ( $s = 0$  kPa), enquanto que a amostra seca ao ar ( $s > 15$  MPa) apresenta seu maior valor somente aos 5 minutos de ensaio, tempo necessário para que a amostra seja completamente inundada e alcance da saturação. Isso indica alta vulnerabilidade a fenômenos erosivos quando em condição saturada, a qual pode estar relacionada ao valor de intercepto de coesão nulo. Em contrapartida, quando em condição não saturada o solo se mostra menos vulnerável no desprendimento inicial das partículas devido à contribuição do alto valor de intercepto de coesão, de 97,7 kPa, que, embora seja temporária, garante certa integridade ao solo antes de sua completa inundação.

Em termos práticos, os resultados mostram que o solo pode estar sobre a influência de muita sucção, e consequentemente com alta resistência, mas, ao entrar em contato com água, sua resistência cai drasticamente em poucos minutos em decorrência da perda do intercepto de coesão. Isso evidencia que o comportamento erosivo desse solo é grave e ocorre rapidamente.

Analisando a perda de solo acumulada (Fig. 4.12), a condição inicial do solo pouco contribuiu em relação à saturada. Percebe-se que, no final do ensaio, os valores acumulados são praticamente iguais para todas as sucções impostas e independem do intercepto de coesão inicial que o solo possui. Isso significa que se ocorrer uma chuva abundante no local, o valor final da perda acumulada será praticamente o mesmo para qualquer condição a que o solo estivesse exposto antes da ocorrência chuva. A sucção só consegue contribuir na resistência do solo se este for capaz de manter-se numa condição não saturada por mais tempo e garantir um alto valor do intercepto de coesão.

Para isso, um sistema de drenagem eficiente se mostra importante, pois poderia drenar a água com rapidez e não permitiria a saturação do solo.

A microbacia Água Comprida possui horizontes superficiais com comportamento altamente erosivo, não só pela resistência e sucção variáveis, mas também pelas características do material frente sua formação geológica e variações sazonais de umedecimento e secagem frequentes na região de Bauru.

A forma do terreno atenua o processo erosivo. Ainda, somam-se a esse processo as intervenções antrópicas, pela construção de loteamentos residenciais sem as devidas preocupações ambientais, que acabaram causando a aceleração do mecanismo de erodibilidade na microbacia.

## 7. CONCLUSÕES

Nesta dissertação estudou-se o comportamento de um solo arenoso não saturado localizado em uma região afetada por um processo erosivo hídrico. Para isso, a pesquisa foi baseada em conceitos da Mecânica dos Solos não saturados. Com base nas informações obtidas, as seguintes conclusões são delineadas:

- Os ensaios experimentais de curva e retenção de água no solo, permeabilidade, edométricos com sucção controlada e compressão triaxial com sucção controlada possibilitaram fazer a caracterização hidromecânica do material arenoso proveniente do Grupo Bauru sobre a vista da Mecânica dos Solos Não Saturados. Isso possibilita um avanço nas pesquisas que vem sendo feitas na microbacia Água Comprida.
- Os resultados obtidos poderão servir como base de dados para pesquisas futuras com vista à realização de modelagens para prever e interpretar os processos erosivos da microbacia Água Comprida ou, até mesmo, de materiais com as mesmas características geológicas.
- Como o município de Bauru está inserido numa região de clima tropical, a camada superficial do solo é a que mais sofre com processos erosivos hídricos por estar diretamente exposta a atmosfera. Conforme a variação climática ocorrida, essa camada pode alcançar condições extremas, sendo elas a saturação ou de secagem ao ar.
- As curvas de retenção obtidas apresentaram a ocorrência de histerese devido aos ciclos sazonais de umedecimento e secagem. Ambas as curvas apresentaram um formato bimodal pela presença de macro e micro poros e, por se tratar do estudo de uma camada superficial, possuem uma ampla faixa de sucção, que vai da condição saturada (sucção igual a 0 kPa) à condição seca ao ar (sucção maior que 15 MPa).
- O coeficiente de permeabilidade obtido no ensaio evidenciou a alta permeabilidade do material estudado, que resultou no valor de  $3,7 \cdot 10^{-6}$  m/s.
- Os ensaios edométricos mostraram que o material possui um comportamento colapsível quando submetido a altos confinamentos (cerca de 100 kPa). Apesar da camada superficial não possuir um nível de confinamento em campo que seja relevante quanto ao colapso, o material sofre com a influência da sucção. Os

resultados obtidos mostram que o aumento da sucção promoveu uma elevação nas tensões de pré-adensamento e uma redução nos índices de compressão do solo. Além disso, quanto maior a sucção imposta, menos compressível o solo se apresentou.

- Os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão triaxial com sucção controlada mostraram, em geral, que a resistência do solo aumenta conforme a elevação da sucção devido à contribuição do intercepto de coesão. Sendo assim, a condição climática que o solo está exposto mostrou-se influente sobre seu comportamento, podendo alterar sua resistência deixando-o numa situação de maior ou menor vulnerabilidade aos fenômenos erosivos dependendo da sucção alcançada. Nas condições extremas umedecimento e secagem, a camada estudada apresenta diferenças expressivas quanto ao intercepto de coesão, que vai de 97,7 kPa para condição seca ao ar ( $s > 15\text{MPa}$ ) à 0 kPa para a condição saturada ( $s = 0\text{ kPa}$ ). Isso explica a alta vulnerabilidade aos fenômenos erosivos que a camada possui quando em situação saturada, pois apresenta apenas o ângulo de atrito interno como parâmetro que contribui na parcela de resistência ao cisalhamento do solo.
- A análise conjunta dos resultados obtidos nos ensaios Inderbitzen realizados por Campos (2014) e dos resultados dos ensaios de compressão triaxial adquiridos nesse trabalho possibilitou avaliar o mecanismo de erodibilidade ocorrido na microbacia sobre o ponto de vista da Mecânica dos Solos Não Saturados. Essa análise comprovou que em caso de uma chuva abundante o solo perde muita resistência em questão de minutos devido à perda de intercepto de coesão.
- Os gráficos de Inderbitzen apontaram que a amostra em condição saturada alcançou seu maior valor de erodibilidade já no primeiro minuto de ensaio enquanto a seca ao ar alcançou seu maior valor somente aos 5 min. Isso indica que a sucção pode influenciar no desprendimento inicial das partículas devido à contribuição do intercepto de coesão na resistência do solo, entretanto essa contribuição ocorreu somente nos primeiros minutos da chuva.
- A ocorrência de uma chuva abundante ocasionará a perda do intercepto de coesão pela saturação, e, assim, a sucção inicial que o solo se encontrava antes da chuva não influenciará nos valores de perda de solo acumulada, que é praticamente a mesma para qualquer que seja a condição inicial do solo. Nesse

caso, evidencia-se a importância de um sistema de drenagem eficiente que faça a drenagem da água antes que haja a saturação do solo.

- O trabalho mostra que o mecanismo da erodibilidade ocorreu pela combinação de diversos fatores. Dentre eles: a características do material frente sua formação geológica e variações climáticas, que alteram a sucção da camada superficial e o intercepto de coesão disponível para contribuir na resistência do solo; a forma do terreno em rampa que atenuou o processo erosivo, favorecendo concentração do fluxo de água em linhas de drenagens superficiais; as ações antrópicas que aceleraram o mecanismo em consequência do uso e ocupação indevidos do meio físico; a falta de sistemas de drenagem eficientes para proteger o solo contra a ação das chuvas e mantê-los por mais tempo numa condição não saturada.
- Essa análise possibilitou evidenciar que o comportamento erosivo presente na microbacia é grave e confirma a hipótese de que os municípios que possuam um solo com as mesmas características e formação geológica da microbacia Água Comprida precisam traçar um planejamento urbano eficaz. Caso isso não seja feito, os casos feições erosivas aumentaram efetivamente com o tempo.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M.; PINTO, C. S. Resistência ao cisalhamento de solo coluvionar não saturado das encostas da Serra do Mar. **Solos e rochas**, v.16, n.3, p.145-158, 1993.
- AITCHISON, G. D. **Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils**. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, 1960, London. Proceedings...London: Butterworths, p.47 – 52, 1961.
- AITCHISON, G. D. **The quantitative description of the stress-deformation behavior of expansive soils – Preface to set of papers**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF EXPANSIVE SOILS, 3., 1973, Haifa. Proceedings... Jerusalem: Academic Press, v.2, p.79-82, 1973.
- ALVES, J. X. de S. **Ocorrência de voçorocas e erosões urbanas. 2001. In: Voçorocas do poder público: na lei, forma e gestão urbana da cidade sem limites**. Tese apresentada para obtenção do título de doutorado. São Paulo: FAU/USP, 2001.
- ALMEIDA FILHO, G. S. **Diagnóstico de Processos Erosivos Lineares Associados a Eventos Pluviosos no Município de Bauru, SP**. 221p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil. Unicamp, Campinas, 2000.
- ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. **Special problem soils. General report**. Proceedings of the 9th European conference on soil mechanics and foundation engineering. **Anais...**Dublin: 1987.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298**: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. ASTM International, 2010.
- AMORIM, R. S. S. **Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, p. 1046-1049, nov/dez 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

- BARRELLA, W. et al. **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes.** In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação.** 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soils Physics.** 4th. ed. Wiley, 1972.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Erosão.** In: BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** 4ª. ed. São Paulo: Ícone. Cap. 7, p. 68-93, 1999.
- BIAS, Edilson de Souza et al. Análise da eficiência da vegetação no controle do escoamento superficial: Uma aplicação na Bacia Hidrográfica do rio São Bartolomeu, DF. **Geociências: UNESP, São Paulo,** v. 31, n. 3, p.411-429, jan. 2012.
- BICALHO, K. V.; FERREIRA, S.; CORREIA, A. G.; FLEUREAU, J.-M.; MARINHO F.A.M. **Filter Paper Method of Soil Suction Measurement.** In: 13º PANAMERICAN, 2007.
- BISHOP, A.W. **The Principle of Effective Stress.** *Tecnisk Ukeblad,* v.106, n.39, p. 859 – 863, 1959.
- BITAR, O.Y. **Instrumentos de Gestão Ambiental aplicáveis ao planejamento, instalação, operação e desativação de empreendimentos.** In: SIMPÓSIO SOBRE GESTÃO AMBIENTAL, 1, São Paulo. SimGEA 2001. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e ambiental, CD Rom, 2001.
- BLIGHT, E. **Strength and Consolidation Characteristics of Compacted Soils.** Ph.D. dissertation, Univ. of London, London, England, 217 p. 1961.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers, Colorado State University,** v. 3, n. March, p. 37 p., 1964.
- CAMPOS, C. J. M. **Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em Solo Não Saturado da região de Bauru-sp.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2014.
- CAVAGUTI, N. **Uso do Lixo no Controle da erosão.** In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Bauru. **Anais...** Bauru: ABGE, v.5, p.97-10, 1995.
- CERRI, L. E. S.; SILVA, J. A. F.; SANTOS, P. H. P. Erosão do solo: aspectos conceituais. **Revista Brasileira em Geociências,** v.2, n.6, 1997.
- CHANDLER, R. J.; HARWOOD, A. H.; SKINNER, P. J. Sample disturbance in London Clay. **Géotechnique,** v.42, n.4. p. 577 - 585. 1992.
- CRONEY, D.; COLEMAN, J. D.; BLACK, W. P. M. **Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance.** In: Water and its conduction in soils. Highway Research Board Special Report, Washington, DC, n.40, p.266-252, 1958.

- CORGHI, F. N. **Urbanização e segregação sócio-espacial em Bauru (SP): Um estudo de caso sobre a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Comprida.** Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências/UNICAMP. Campinas, 2008.
- DIAS F. D.; HERRMANN. M. L. P., Análise da Susceptibilidade a Deslizamentos no Bairro Saco Grande, Florianópolis - SC, In: **Revista Universidade Rural**, Série Ciências Exatas e da Terra, Rio de Janeiro, Brasil, vol. 21 (1), p: 91-104, 2002.
- De CAMPOS, T. M. P.; DELGADO, C. C.; TIBANA, S.; AGUILAR, S. A. S.; **Controle de erosão.** Secretaria de Energia e Saneamento – Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, 92p, 1990.
- ESCARIO, V. SAEZ, J. The Shear Strength of Partly Saturated Soils. **Géotechnique**, v.36, n.3, p. 453 - 456. 1986.
- FERREIRA, A. A.; NEGRO JUNIOR, A.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. A. **Solos do Interior de São Paulo.** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Paulo, 339p, 1993.
- FERREIRA, P. H. de M. **Princípios de manejo e conservação do solo.** 2. ed. São Paulo: Nobel, 1981.
- FIORI, O. C., SOARES, P. C. Aspectos evolutivos das voçorocas. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 32, p. 114-24, 1976.
- FONSECA, E. C. Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório. In: 1º Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, p. 385 – 851, 1992.
- FREDLUND, D. G. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, n. 1, p. 121–139, 1979.
- FREDLUND, D. G. **The scope of unsaturated soil mechanics: An overview.** International Conference on Unsaturated Soils, 1, UNSAT'95. **Anais...**Paris: 1996.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1994.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics For Unsaturated Soils.** John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, GTS, v.103, p.447-466, 1977.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The Shear Strength of Unsaturated Soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v.15, n.3, p.313-321, 1978.

- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The Shear Strength for Unsaturated Soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v.16, n.1, p. 121-139, 1979.
- GALETI, P. A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 278p., 1984.
- GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. Cap. 1. p. 17-50, 2012.
- GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v. 85, n. 4, p. 228– 232, 1958.
- GOMES, J. E. DA S. **Estudo Sobre Fatores Que Influenciam a Acurácia Do Método Do Papel-Filtro**. 95p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- GOOGLE. **Google Earth**. Disponível em: <<https://www.earth.google.com/web>> Acesso em: janeiro de 2018.
- GUPTA A.; AHMAD R., Urban steeplands in tropics: an environment of accelerated erosion. **GeoJournal**, v.49:143–150, 1996.
- HILLEL, D. **Soil Water - Physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press. 413p, 1980.
- HILF, J. W. **An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils**. 654p. Ph.D. Dissertation, Tech. Memo. U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, 1956.
- He X, Zhou J, Zhang X, Tang K., Soil erosion response to climatic change and human activity during the quaternary of the Loess Plateau, China. **Reg Environ Chang** v.6:62–70, 2006.
- HO, D. Y. F.; FREDLUND, D. G. A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soils. **Geotechnique Testing Journal**, ASTM, Philadelphia. v.5, p.18 – 25, 1982.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Colorado, v. 56, 1945.
- HUDSON, N. W. An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall. Proceedings and Transactions - **Rhodesia Scientific Association**, v. 49, p. 15-25, 1961.
- IDE, D. M. **Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana**. Dissertação (Mestrado), EESC/USP, São Carlos/SP, 2009.

- INFANTI J. N., FORNASARI F., N. **Processos de dinâmica superficial. Geologia de Engenharia**, A.M.S. Oliveira & S.N.A. Brito (eds), ABGE, São Paulo, SP, pp. 243-269, 1998.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPTIDMGA, v.1.126p. (IPT, Monografia 6), 1981a.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Consolidação do projeto orientação para o controle à erosão no Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1989.
- JENNINGS, J. E. B. **A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils**. In: Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, 1960, London. Proceedings... London: Butterworths, p. 26 -30, 1961.
- KERTZMAN, F. F., DINIZ, N. C.. **As Abordagens de Solos utilizadas na Geologia aplicada ao Meio Ambiente**. In: BITAR, O. Y. (Coord.). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente - processos do meio físico modificados por obras de engenharia e pelo uso do solo**. São Paulo: ALBGE/IPT, cap. 3, p. 19-30 (Série Meio Ambiente), 1995.
- LAL, R. **Soil Erosion en the Tropics: Principles and Management**. New York: McGraw Hill, 1990.
- LAMBE, T. W. **A mechanistic picture of shear strength in clay**. In: Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960, Boulder. Proceedings... New York: American Society of Civil Engineers, 555-580, 1960.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP). 344p, 2005.
- LIMA, M. C. **Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus**. Dissertação (Mestrado). Publicação G.DM – 057A/99, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.,1999.
- LOLLO, J. A.; SENA, J. N. Establishing erosion susceptibility: Analytical hierarchical process and traditional approaches. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v.72:589–600, 2013.
- LUA8DISGN. **Bauru rios e afluentes**. Disponível em: <<http://lua8design.blogspot.com/2011/02/bauru-rios-e-afluentes.html>> Acesso em: novembro 2018.
- MACHADO, S. L. **Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenoso compactado em edômetro com sucção controlada**. 157p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.

- MARINHO, F, A, M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, fundamentais e aplicados**. Tese de Livre Docência. São Paulo/SP: Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações – USP, 2005.
- MARSHALL, T. J.; HOLMES, J. W.; ROSE, C. W. **Soil Physics**. 3. ed. Cambridge, United Kingdom: The Press Syndicate of The University of Cambridge, 1996.
- MORGAN, R.P.C. Soil erosion & conservation. **Longman Scientific & Technical**, 3th, p. 298, 1995.
- MORTARI, D. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, 200p, 1994.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil Characterization of Mapping Units for Highway Purposes in a Tropical Area. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. n° 19. p.196-199, 1979.
- OLDECOP, L. A.; ALONSO, E. E. A model for rockfill compressibility. **Géotechnique**, v.51, n. 2, p. 127–139, 2001.
- OLIVEIRA, F. P. Avaliação de perdas de solo em estradas florestais não pavimentadas no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, p. 331-339, set 2010.
- OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP, escala 1:100000: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. Tese (Doutorado). EESC/USP. São Carlos, 1992.
- PEREIRA, W. **Avaliação da erosividade das chuvas em diferentes locais do Estado de Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 73. 1977.
- PLANO DIRETOR PARTICIPATIVO. Mapa dos Setores. Disponível em: <[http://hotsite.bauru.sp.gov.br/planodiretor/mapa\\_setores.aspx?im=1](http://hotsite.bauru.sp.gov.br/planodiretor/mapa_setores.aspx?im=1)> Acessado em: novembro de 2018.
- POPI, O. **Determinação e Análise de Escoamentos Unidimensionais e Bidimensionais Transientes em Meio Porosos Não-Saturados**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Hidráulica e Saneamento. EESC/USP. São Carlos. 75p.,1982.
- PREFEITURA DE BAURU. **Dados geográficos**. Disponível em: <<http://www.bauru.sp.gov.br/bauru.aspx?m=2>> Acesso em: novembro de 2018.

PREFEITURA DE BAURU. **Prefeitura trabalha no reparo de galeria no córrego Água Comprida.** Disponível em: <<http://www.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=28914#>> Acesso em: novembro de 2018.

RICHARDS, B. G. **The significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soils in relation to the design of engineering structures built on shallow foundations in Australia.** In: Symposium on Permeability and Cappillary, Atlantic City. Proceedings...American Society for Testing and Materials, 1966.

RIYIS, M. T. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução.** 173f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2012.

RODRIGUES, J. E. **Estudo de Fenômenos Erosivos Acelerados – Boçorocas.** Tese de Doutorado. Departamento de Vias de Transporte e Topografia. São Carlos. EESC/USP. 162p, 1982.

RODRIGUES, R. A. **Modelação das Deformações por Colapso Devidas à Ascensão de Lençol Freático.** Tese de Doutorado. Departamento de Geotecnia. São Carlos. EESC/USP. 262p., 2007.

SENA, Júlio Nascimento. **Ouso de sistema de informação geográfica para avaliação de diferentes técnicas de produção de cartas de suscetibilidade à erosão.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2008.

Silveira L. L. L.; Pejon O. J. Index properties to predict erodibility of tropical soil. **Bull Eng Geol Environ** 66:225–236, 2007.

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 10, n. 3, p. 177-185, 1980.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaio com Solos não Saturados.** 206p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

STEIN, D. P. **Diagnóstico de Erosão.** In: **V Simpósio Nacional de Controle de Erosão.** Bauru, v.5 p. 55-57, 1995.

TERZAGHI, K. **The shearing resistance os saturated soil and the angle between the plane of shear.** In: International Conference on soil mechanics and foundation engineering, 1., 1936, Cambridge. Proceedings... Cambridge: Harvard University Printing Office, v.1, p54-56., 1936.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

- VILAR, O. M. **Aspectos do comportamento colapsível de solos compactados**. 110p. Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996.
- VILAR, O. M. **Formulação de um modelo matemático para erosão dos solos pela chuva**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987.
- VIEIRA, A. M.; MARINHO, F. A. M. **Variação Sazonal de Sucção em um Talude de Solo Residual em São Paulo**. In: III Conferência Brasileira de Encostas. Rio de Janeiro. p. 287 - 295., 2001.
- VIVIAN, J. B. **Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar não Saturado Contaminado com Óleo Diesel**. 100f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre, RS, 2008.
- ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, J. A. R.; YAMANOUTH, G. R. D. B. Feições erosivas na bacia do córrego do Espreado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972 - 2002. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 37, p. 414-425, junho 2007.