

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Gonçalo de Lima Sonaglio

**SUCÇÃO MÁTRICA EM SOLOS ARTIFICIALMENTE
CIMENTADOS**

Porto Alegre
novembro 2016

GONÇALO DE LIMA SONAGLIO

**SUCÇÃO MÁTRICA EM SOLOS ARTIFICIALMENTE
CIMENTADOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lucas Festugato

Porto Alegre
novembro 2016

GONÇALO DE LIMA SONAGLIO

**SUCÇÃO MÁTRICA EM SOLOS ARTIFICIALMENTE
CIMENTADOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2016

Prof. Lucas Festugato
Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. pela Concordia University, Canadá

Rubén Alejandro Quinónez Samaniego (UFRGS)
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha querida mãe, Marisa Lima
(*In Memoriam*), que sempre me apoiou, incentivou e
esteve ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Marisa Lima, eu agradeço por tudo. O apoio incondicional e sincero, sempre buscando me mostrar e ensinar o melhor. Sempre acreditou em mim e fez meus sonhos se tornarem realidade. Agradeço eternamente por tudo que tu fez. Sei que, onde tu estiver, estará me dando o apoio que sempre deu. Obrigado.

Agradeço ao meu orientador e paraninfo, Prof. Lucas Festugato, por todas suas contribuições e ensinamentos. Tua orientação foi de extrema importância em todos os aspectos. Mais que professor, é também um amigo. Obrigado pelas conversas, dicas e tudo que tu fez por mim.

Agradeço ao Prof. Nilo Consoli e o doutorando Alejandro, pelo tempo que dispuseram para fazer parte da banca examinadora e também por fazerem parte da minha trajetória acadêmica.

Agradeço ao meu pai, Ivo, pelo apoio e carinho, principalmente neste último ano. Tua presença foi fundamental. Agradeço também aos meus familiares que sempre estiveram presente na minha vida e torceram por mim.

Agradeço à Carolina Kalil, minha namorada, amiga e companheira. Sempre presente e incentivadora. Sinto muito orgulho de ti. Obrigado pela confiança, pelas conversas e pela amizade. Obrigado pelo apoio nos tempos difíceis que passamos. Te amo. Também agradeço à minha sogra, Cláudia, dando amor e carinho, se tornando uma segunda mãe.

Agradeço aos colegas de iniciação científica: Andressa, Ayumi, Braun, Eduardo, Estéfano, Giovanna, Isadora, João Victor, Lorenzo, Menezes, Pablo, Obino, Zé, Rafael Nedel e, todos os outros que, porventura, esqueci. Nedel, teus dados foram fundamentais para a elaboração desse trabalho, te agradeço muito. Pablo, muito obrigado pela ajuda na realização dos ensaios.

Agradeço ao laboratorista João Diniz e aos pós-graduandos da época de bolsista: Alejandro, Bruno, Carina, Cinthia, Daniel, David, Eduardo, Graci, Jorge, Larissa, Laura, Quioga, Luis, Marina, Marina Bortolotto, Mozara, Naloan, Lidi, Lenda, Sergio, Vitor e todos os outros. Agradeço pelos ensinamentos passados e pelas conversas, foram de extrema importância.

Agradeço aos colegas de estágio na EGR, aos Engenheiros, Desenhistas e Topógrafos.

E um agradecimento especial aos meus amigos, muitos já citados aqui, estando presente cada um de sua forma durante toda a minha vida. Vocês foram e são fundamentais.

Nada na vida deve ser temido, somente compreendido.
Agora é hora de compreender mais para temer menos.

Marie Curie

RESUMO

Os primeiros estudos em mecânica dos solos tiveram um foco voltado para o comportamento de solos saturados, com o passar do tempo tornou-se comum simplesmente ignorar o efeito da sucção e assumir que sua não utilização asseguraria um projeto seguro e conservador. Atualmente, estudos apontam uma componente adicional para compreensão dos comportamentos dos solos, a sucção. A sucção basicamente se trata da energia para expulsar a água presente no solo, tendo influência na distribuição dos vazios, na condutividade hidráulica e na resistência do solo, por exemplo. O objetivo do trabalho foi, além de fazer a medição da sucção e obter as curvas características para uma areia artificialmente cimentada, tentar validar o uso da razão vazios/cimentos (η/Civ) na previsão da sucção. Foi realizado um programa experimental laboratorial, que consistiu em medições da sucção através do método do papel filtro em corpos-de-prova de areia de Osório com cimento e caulim com cimento para diferentes valores da razão vazios/cimento (η/Civ). Os resultados mostram que existe uma relação da razão η/Civ com alguns parâmetros da curva característica do sistema solo-água. Existe concordância entre autores de que os parâmetros da curva característica não são bem compreendidos, sendo necessários mais estudos para que exista um melhor entendimento.

Palavras-chave: método do papel filtro. sucção. sucção mátrica.
solo artificialmente cimentado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento	19
Figura 2 – Propriedades de solos não-saturados.....	27
Figura 3 – Exemplo de curvas características pela equação 4.....	28
Figura 4 – Estimativa da resistência ao cisalhamento através das curvas características.	29
Figura 5 – Comparação do cisalhamento estimado com dados experimentais.....	29
Figura 6 – (a)técnica em contato e (b) técnica sem contato.....	34
Figura 7 – Prensa automática.....	47
Figura 8 – Método do papel filtro.....	48
Figura 9 – Balança de precisão.....	49
Figura 10 – RCS x n/civ para misturas areia com cimento.....	50
Figura 11 – RCS x n/civ para misturas caulim com cimento.....	51
Figura 12 – Exemplo de ajuste de dados.....	52
Figura 13 – Ajuste da tabela 2.....	54
Figura 14 – Ajuste da tabela 3.....	55
Figura 15 – Ajuste da tabela 4.....	56
Figura 16 – Ajuste da tabela 5.....	58
Figura 17 – Relação parâmetro a x n/civ.....	58
Figura 18 – Relação parâmetro m x n/civ.....	59
Figura 19 – Relação inclinação máxima x n/civ.....	59
Figura 20 – Comparação da CCSA de areia de Osório com dados da tabela 5.....	60
Figura 21 – Exemplo de ajuste feito a partir dos dados de caulim-cimento.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens para medir de umidade.....	26
Quadro 2 – Descrição dos materiais utilizados.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas propriedades dos solos estudados	30
Tabela 2 – Dados de ajuste para $e=0,68$	53
Tabela 3 – Dados de ajuste para $e=0,68$	55
Tabela 4 – Dados de ajuste para $e=0,80$	56
Tabela 5 – Dados de ajuste para todos os índices de vazios	57
Tabela 6 – Dados de ajuste para a areia de Osório	60

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira Normas Técnicas

VEA – Valor de Entrada de Ar

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCSA – Curvas Características para o sistema Solo-Água

CP – cimento Portland

NBR – norma brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RCS- Resistência à compressão simpels

LISTA DE SÍMBOLOS

a = parâmetro do solo relacionado ao valor de entrada de ar (VEA)

av = parâmetro do solo relacionado ao valor de entrada de ar (VEA)

D_{10} = diâmetro efetivo do solo

e = número natural 2,71828

n = parâmetro do solo relacionado ao ponto de inflexão da curva (próximo ao VEA)

nv = parâmetro do solo relacionado à taxa de extração de água do solo

m = parâmetro do solo relacionado à porção valor de água residual da curva

mv = parâmetro do solo relacionado ao θ_r

ua – poro-pressão de ar (kPa)

uw – poro-pressão de água (kPa)

ψ – sucção total (kPa)

ψ_r = sucção residual (kPa)

π – sucção osmótica (kPa)

θ – teor de umidade volumétrico (%)

θ_s = teor de umidade volumétrico saturado (%)

θ_r = teor de umidade volumétrico na porção residual

w – teor de umidade gravimétrico (%)

w_s – teor de umidade gravimétrico saturado(%)

S – grau de saturação (%)

V_v – volume de vazios (cm³)

V_w – volume de água (cm³)

V_s – volume de sólidos (cm³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2.1 Objetivo Principal	17
2.2.3 Objetivos Secundário	17
2.3 HIPÓTESE	17
2.4 PRESSUPOSTO	18
2.5 PREMISA	18
2.6 DELIMITAÇÕES	18
2.7 LIMITAÇÕES	18
2.8 DELINEAMENTO	18
3 SOLOS NÃO SATURADOS	21
3.1 SUCCÃO MÁTRICA	22
3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS	22
3.2.1 Estimativa de propriedades de solos não-saturados com as CCSA	27
3.2.2 Ajuste de CCSA através de dados experimentais	30
3.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO	33
4 SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS	35
4.1 MATRIZ	35
4.1.1 Compactação	36
4.1.2 Granulometria	36
4.1.3 Cimentação	37
4.2 TENSÃO CONFINANTE	39
4.3 CIMENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ	38
4.4 CIMENTAÇÃO NAS DEFORMAÇÕES, COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO	41
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
5.2 MATERIAIS	42
5.2.1 Solo	43
5.2.1.1 Areia de Osório	43
5.2.1.2 Caulim	43
5.2.2 Cimento Portland	44
5.2.3 Água Destilada	44

5.2.4 Papel Filtro	44
5.3 MÉTODOS	44
5.3.1 Preparação das amostras	45
5.3.2 Caracterização do solo	45
5.3.3 Moldagem e cura dos corpos de prova	45
5.3.4 Resistência à compressão simples	46
5.3.5 Método do papel filtro	46
5.3.5 Software Soil ision™	49
6 RESULTADOS	50
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	50
6.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA O SISTEMA SOLO-ÁGUA	51
7 CONCLUSÕES	62
7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	62
7.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA O SISTEMA SOLO-ÁGUA	62
7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	63

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre mecânica dos solos tiveram um foco voltado para o comportamento de solos saturados com poro-pressões positivas (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Exemplos habituais na Engenharia Geotécnica envolvem a aplicação de conceitos em solos saturados. Com o passar do tempo se tornou comum simplesmente ignorar o efeito da poro-pressão negativa e assumir que a não utilização dela asseguraria um projeto seguro e conservativo (FREDLUND et al., 2012).

Com isso, o estudo da Mecânica dos Solos tem tido por foco principal os solos saturados (argilas, siltes e areias) e areias secas, a denominada Mecânica dos Solos Clássica. A mecânica dos solos não saturados é ensinada como uma extensão nos conceitos fundamentais da mecânica dos solos.

Cerca de um terço da superfície de terra é situado em regiões áridas e semiáridas. Há, todavia, peculiaridades quando a interface é um pouco mais complexa, que é o caso dos solos não-saturados.

Nos solos não-saturados há a presença de, pelo menos, três fases: sólida, líquida e gasosa. Com a presença das fases distintas, ocorre uma interação entre a parcela líquida e a gasosa, parte do fenômeno é a capilaridade, que é fundamental para o fenômeno da sucção.

A sucção é parâmetro mais significativo quando se trata de solos não saturados (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Estudar a sucção é fundamental para entender o comportamento desses materiais. A sucção é dividida em duas parcelas: mátrica e osmótica. A sucção mátrica representa a poro-pressão negativa da água do solo. A sucção osmótica deriva da medida da pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com a porção de água no solo. Nesse trabalho será abordada a sucção mátrica.

É necessário ter em mente que, em boa parte dos casos, quanto maior a sucção mais resistente o solo se torna (FREDLUND et al, 1996). A maioria dos problemas de Engenharia envolvendo os solos não saturados provém de mudanças no ambiente, como exemplo época de chuvas e de secas.

Muitos trabalhos (Consoli et al. 2007, Consoli et al. 2010, Consoli et al. 2013^a) demonstraram que o comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados em termos de resistência à compressão, resistência à tração e rigidez é governada pela relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento (η/Civ). Geralmente, o solo-cimento encontra-se não saturado em campo (AL SHENAWY et al., 2016). Desta forma analisar-se-á a influência da sucção em solos cimentados, utilizando o melhoramento com a adição de cimento ao solo.

Foi constatado que existem um número extremamente baixo de estudos que relacionem o teor de agente cimentante com uma possível interferência na sucção. Neste estudo será feita uma análise da resistência à compressão simples para diferentes níveis de cimentação e de sucção, e das curvas características dos solos não-saturados e suas propriedades.

Neste contexto, este trabalho analisará a sucção mátrica e sua influência em dois solos melhorados com cimento e investigará a validade do uso da relação η/Civ em sua previsão.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual é o efeito do η/Civ na sucção mátrica?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da relação entre a sucção e o parâmetro η/Civ para solos artificialmente cimentados com diferentes dosagens de cimento.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) verificação da relação entre grau de saturação e sucção para diferentes níveis de cimentação;
- b) determinação da relação entre a cimentação e valor de sucção;
- c) avaliação da técnica do papel filtro para solos cimentados.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que há um acréscimo de sucção mátrica para solos quanto maior o teor de cimentação.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os procedimentos de verificação da sucção, de moldagem de corpos de prova e ensaio de resistência à compressão irão seguir as diretrizes descritas nas normas: D5298 – 10 (ASTM, 2010), NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 5739 (ABNT, 2007), respectivamente.

2.5 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que mesmo a sucção sendo o parâmetro mais importante de um solo não saturado, existem poucos estudos levando em conta a cimentação artificial e sua influência na sucção.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao uso de Areia de Osório e Caulim a ser reforçados com Cimento Portland CP-V, ensaiado à compressão simples e ao uso do método do papel filtro para avaliação da sucção.

2.7 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a:

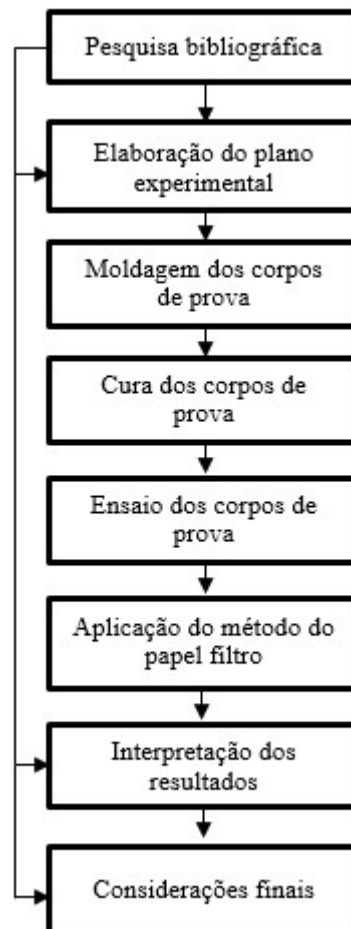
- a) dois solos,
 - areia de Osório e caulim;
 - índice de vazios de 0,8, 0,73, 0,68 para areia e peso específicos de 14, 15 e 16 kN/m³ para caulim;
 - teores de umidade;
- b) teores de cimento de 1, 3, 5 e 9%;
- c) tempo de cura das amostras de 7 dias;
- d) sucção mátrica;
- e) não será avaliada a histerese.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura dos corpos de prova;
- e) ensaios dos corpos de prova;
- f) aplicação do método do papel filtro;
- g) interpretação dos resultados;
- h) considerações finais.

Figura 1 – Delineamento



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** objetivou o aprofundamento e conhecimento do tema escolhido e a obtenção de informações relativas às misturas areia-cimento. Procurou-se estudos e publicações recentes acerca da influência dos tipos de sucção em diferentes tipos de solo e o comportamento tangente à resistência à compressão de solos artificialmente cimentados e suas propriedades em geral.

Na etapa de **elaboração do plano experimental** foram definidas as propriedades da amostra:

- a) pesos específicos;
- b) índices de vazios;
- c) teores de umidade;
- d) teores de cimento;
- e) tempo de cura das amostras;
- f) papel filtro utilizado.

Na sequência, iniciou-se a **moldagem dos corpos de prova**, respeitando as propriedades estabelecidas. A **cura dos corpos de prova** ocorreu em um período de 7 dias, sendo que no último dia de cura, para a obtenção de diferentes umidades na ruptura, os corpos de prova sofreram uma dessas alterações nas últimas 24 horas: alguns serão imersos totalmente em água, outros adicionados **10%** da massa de água, **5%** da massa de água e também sem adição alguma de água, fazendo com que existam diferentes umidades na ruptura, obtendo diferentes valores de sucção.

Posterior à essa etapa, iniciaram-se os **ensaios dos corpos de prova**. Foi utilizada uma prensa mecânica para o ensaio de compressão simples. Após os ensaios veio a **aplicação do método do papel filtro**, que consiste no equilíbrio hidrodinâmico do papel filtro com a água do solo, sendo possível, através de curvas de calibração, relacionar a umidade do papel filtro no equilíbrio a um valor de sucção.

Assim que as etapas anteriores foram concluídas foi feita a **interpretação dos resultados**, utilizando os dados obtidos. Por fim, as **considerações finais** foram baseadas na etapa de interpretação e de pesquisa bibliográfica.

3 SOLOS NÃO SATURADOS

Diferente dos solos saturados que possuem um sistema com duas fases: uma líquida e outra sólida, os solos não saturado possuem, pelo menos, um sistema com três fases: sólida, líquida e gasosa. Autores como Fredlund e Morgenstern (1977, p. 449, tradução nossa) ainda consideram a presença de uma quarta fase, nomeada de interface ar-água ou membrana contráctil. Nos solos não saturados a poro-pressão da água é negativa em relação à poro-pressão do ar. Um solo não saturado pode ser um solo residual, de depósito lacustre, formado a partir rocha matriz ou qualquer outro tipo de solo ou rocha. Todavia, alguns exemplos são mais comuns como os solos residuais tropicais e os expansivos.

Marinho (1994, p. 2, tradução nossa) cita que a importância no entendimento do comportamento mecânico dos solos não saturados reflete em diferentes situações na Engenharia, como: construções levemente carregadas em solos expansivos; estabilidade de taludes; armazenamento subterrâneo de lixo atômico; barreiras para proteção, entre outros. Segundo o mesmo autor, a sucção é a pressão isotrópica que a parcela de água impõe para absorver mais água. A sucção tem ligação com a ideia de energia e é dividida em duas componentes: mátrica e osmótica. A soma das duas parcelas resulta na sucção total.

A sucção total, ψ , então, é dividida em dois componentes. Um dos componentes da energia é devido a solicitações mecânicas em toda interface ar-água e isso levou a ideia de sucção capilar ou sucção mátrica, que é definida pela diferença entre a poro-pressão de ar, u_a , e poro-pressão de água, u_w , tendo a sucção mátrica definida como $(u_a - u_w)$. A energia devido à química do sistema solo-água foi considerada como um componente de adsorção ou sucção osmótica, π . Fredlund et al. (2012, p 185, tradução nossa)

A sucção mátrica é relacionada com a matriz do solo, por exemplo a combinação do tipo de partícula e o arranjo estrutural, já a osmótica é devida a concentração de sais na água do solo. Neste trabalho será estudada somente a sucção mátrica.

3.1 SUCCÃO MÁTRICA

É possível definir a componente mátrica da sucção segundo Aitchison¹ (1965 apud FREDLUND; RAHARDJO, 1993, p. 64, tradução nossa): “[...] sucção equivalente derivada da medida da pressão parcial de vapor da água em equilíbrio com a água do solo, relativa à pressão parcial de vapor da água em equilíbrio com a solução idêntica em composição da água do solo. [...]”.

A sucção mátrica é a pressão de água negativa desenvolvida na água do solo devido à capilaridade e forças de adsorção.

Para Fox et al. (2004, p. 33, tradução nossa) o fenômeno mais importante de tensão superficial é a criação de um menisco curvado, que aparece em manômetros e barômetros, levando à uma ascensão ou depressão capilar

3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas característica do sistema solo-água (CCSA) nos dão um entendimento conceitual entre massa (e/ou volume) da água no solo e do estado de energia da fase líquida (FREDLUND et al., 2012, p. 184, tradução nossa). As CCSA têm um papel importante na determinação das propriedades de um solo não saturado.

Os estudos das curvas características começaram da pesquisa em áreas relacionadas às ciências agrárias. É importante reconhecer a contribuição dada pelos estudos, mas é necessário adaptar para o uso na Engenharia Geotécnica.

Childs (1940) sugere que há uma relação entre as CCSA e o coeficiente de permeabilidade para um solo não saturado. É pressuposto que as curvas contêm informações valiosas sobre a estrutura do solo e da geometria e distribuição do tamanho dos poros. Childs (1940) ainda aponta que uso das características de umidade do solo depende do fato que essas características podem ser interpretadas da mesma forma que a distribuição do tamanho dos grãos no solo.

¹ AITCHISON, G. D. **Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas**. Sydney: Butterworths, 1965.

Assim eles incrementam a análise mecânica: dão o mesmo tipo de informação sobre os poros como as dadas por análises mecânicas das partículas.

Estudos antigos deram um modelo conceitual mostrando a relação entre a quantidade de água no solo e a energia nos poros. Os conceitos de energia associados com a fase líquida nos deram um modelo útil para descrever o comportamento dos solos não saturados. Combinando as CCSA com o modelo capilar leva à uma definição de diâmetro efetivo dos poros.

O solo é capaz de reter água permanentemente em consideráveis quantidades de água nos seus vazios em zonas acima de onde está o lençol freático. A presença permanente de água nessas zonas mostra que existem forças que contrariam o efeito da gravidade, essas forças são as chamadas forças capilares (FREDLUND et al., 2012, p. 188, tradução nossa).

Segundo Fredlund et al. (2012, p. 188, tradução nossa), as CCSA, nos anos 1980 e 1990, se tornaram a base para a estimativa de propriedades não-lineares dos solos não saturados para todos tipos de problemas geotécnicos. Todavia, um dos obstáculos para a implementação da mecânica dos solos não saturados era o custo excessivo e a demanda de técnicas de teste em laboratórios associadas com medidas experimentais das propriedades dos solos não saturados. Era necessário ser medido mediante estado de tensões controladas.

As curvas surgiram como uma ferramenta prática e precisa para estimar as propriedades dos solos não saturado. Elas são vistas como a “chave” para implementação da mecânica dos solos não saturados na prática (FREDLUND, 2002, p. 1, tradução nossa).

As CCSA são fundamentais para solução de problemas em solos não saturados. As curvas estão diretamente relacionadas com as propriedades ligadas ao volume e massa. Se a mudança de volume de um solo é pequena, é possível usar a relação do teor de umidade gravimétrico versus sucção do solo para determinar o valor da entrada de ar e conteúdo de água residual de um solo particular (FREDLUND et al., 2012, p. 189, tradução nossa).

O teor de umidade gravimétrico não requer medida de volume em laboratório, enquanto que o grau de saturação e teor de umidade volumétrico necessitam que o volume da amostra de solo seja conhecido. Porém é o teor volumétrico que é diretamente necessário para representar a água armazenada em um solo não saturado e o volume de água é importante para determinar as CCSA (FREDLUND et al., 2012, p. 189, tradução nossa).

Podem ser usadas diversas técnicas para verificar a quantidade de água na amostra para obter propriedades do solo não saturado, se mostram pouca variação de volume quando a sucção é alterada. Por outro lado, se o solo tiver uma variação considerável de volume quando a sucção é alterada, será necessário maior cuidado na obtenção das variáveis adequadas para o comportamento do solo não saturado (FREDLUND et al., 2012, p. 189, tradução nossa).

Os valores de transição das curvas são o valor de entrada de ar, que representa o nível de sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos maiores vazios do solo. O ponto de saturação residual corresponde ao teor de umidade no qual é necessária uma grande variação de sucção para remover a água ainda presente no solo, pelo fato da fase líquida encontrar-se descontínua (FREDLUND; XING, 1994).

Esses valores de transição podem dividir as curvas de grau de saturação versus sucção em três zonas: zona de efeito limite de entrada de ar; zona de transição; e zona residual de não saturação. Essas mesmas zonas podem ser definidas para secagem e para molhagem (FREDLUND et al., 2012, p. 190, tradução nossa).

As propriedades dos solos não saturados são estimadas a partir das curvas características e das propriedades dos solos saturados. As curvas são o melhor lugar para obter informações para a prática de Engenharia Geotécnica de solos não saturados (FREDLUND et al., 2012, p. 190, tradução nossa).

As CCSA são definidas como a relação entre a quantidade de água no solo e a sucção do solo. Essa definição simplista significa que as curvas se referem a certo tipo de relações e levantam uma série de questões. Segundo Fredlund et al. (2012, p. 191, tradução nossa), os questionamentos são:

- a) Como a quantidade de água deve ser quantificada?
- a) Existem modos diferentes de quantificar a quantidade de água usada para diferentes procedimentos de estimativa?
- c) A cimentação concede resistência à tração e coesão real ao material?
- d) Qual influência que a “inicialização de tensões” no início dos ensaios tem sobre a interpretação dos dados do ensaio?
- e) Qual são as componentes da sucção do solo plotadas nas curvas?
- f) Como as histereses das CCSA são levadas em conta para várias aplicações da Engenharia Geotécnica?

g) Qual é a primeira informação das CCSA que se utiliza para resolver problemas da Engenharia Geotécnica?

A quantidade de água no solo pode ser definida utilizando mais de uma variável. Essas variáveis são (i) teor de umidade gravimétrico w , (ii) teor de umidade volumétrico θ , (iii) grau de saturação S , e (iv) volume de água, V_w , relacionado com o volume original da amostra. As equações 1, 2 e 3 são apresentadas por Fredlund et al. (2012, p. 191, tradução nossa).

Teor de umidade gravimétrico é definido por:

$$w = M_w / M_t \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

w = teor de umidade gravimétrico;

M_w = massa de água;

M_t = massa total.

O teor de umidade volumétrico é bastante utilizado em disciplinas da área de ciências agrônomas e representa a quantia de água no solo ao volume total do solo:

$$\theta = V_w / (V_v + V_s) \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

θ = teor de umidade volumétrico;

V_w = volume de água;

V_v = volume de vazios;

V_s = volume de sólidos.

É difícil medir o volume total de uma amostra de solo não saturado, sendo mais fácil relacionar a quantidade de água no solo com o volume inicial da amostra. Utilizando o volume inicial como referência, é possível chegar a uma outra definição para o teor de umidade volumétrico. Teor de umidade volumétrico é relacionado com a massa de solo enquanto teor de umidade

volumétrico e grau de saturação são relacionados com volumes. O grau de saturação S relaciona o volume de água ao volume instantâneo de vazios e necessita de uma medida instantânea do volume total da amostra de solo:

$$S = V_w / V_v \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

S = grau de saturação;

Fredlund et al. (2012, p. 192) apresenta uma tabela, que está representada no quadro 1, trazendo as vantagens e desvantagens para essas várias designações para a quantidade de água no solo.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens para medidas de água

Designação	Vantagens	Desvantagens
Teor de umidade gravimétrico, w	Consistente com o uso na mecânica dos solos clássica Modo mais comum de medição Não requer medição de volume	Não permite diferenciação entre mudança no volume e mudança no grau de saturação Não fornece o valor de entrada de ar correto
Teor de umidade volumétrico, θ	Valor de referência é a "massa do solo" que permanece constante É a forma básica que surge na derivação do transiente de infiltração e no armazenamento de fluidos em solos não saturados Utilizada em base de dados nos resultados obtidos em ciências agrônomas	Requer medição de volume Para uma rigorosa definição requer medição de volume para cada sucção É o menos familiar e menos utilizado historicamente na Engenharia Geotécnica
Graus de saturação, S	Define mais claramente o valor de entrada de ar Parece ser a variável que melhor controle as propriedades do solo não saturado	Requer medição de volume Mesmo que medição de volume seja necessária, a variação do grau de saturação não quantifica a mudança geral de volume

(fonte: FREDLUND et al., 2012)

Estimativas das CCSA a partir de curvas granulométricas são mais praticáveis para siltes e solos arenosos (FREDLUND et al. 1997, p. 509, tradução nossa). As curvas de secagem fornecem a informação da quantidade de deformação ou mudança de volume que será mais provável de acontecer quando o solo seca.

Barbour (1998, p. 875) destaca que as CCSA desempenham, para os solos não saturados, um papel semelhante ao da curva de consolidação para os solos saturados.

Ainda, um dos fatores que tem mais influência no formato da curva é a umidade de compactação (MALAYA; SREEDEEP, 2012) (HESHMATI; MOTHARI, 2012).

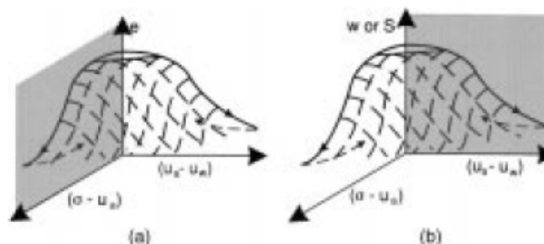
3.2.1 Estimativa de propriedades de solos não-saturados com as CCSA

Barbour (1998, p. 875) destaca que as informações contidas nas CCSA podem ser úteis para estimar propriedades de solos não-saturados. Já foram propostos métodos para estimar a variação de volume, resistência ao cisalhamento, permeabilidade, difusão, adsorção, condutividade térmica, entre outras propriedades de solos não-saturados com base nas informações dadas pelas curvas características solo-água.

O fundamental para as estimativas das propriedades de solos não-saturados é o entendimento do papel da distribuição e da geometria da água nos vazios e o impacto que ela tem na propriedade em interesse.

A figura 2 mostra quatro propriedades de solos não-saturados em função do grau de saturação. As propriedades foram normalizadas dividindo o valor da propriedade, em diversos graus de saturação, pelo valor da propriedade quando o solo está saturado. Os formatos das curvas são diferentes devido às relações interfásicas que controlam a propriedades serem diferentes.

Figura 2 – Propriedades de solos não-saturados.



(fonte: BARBOUR, 1998)

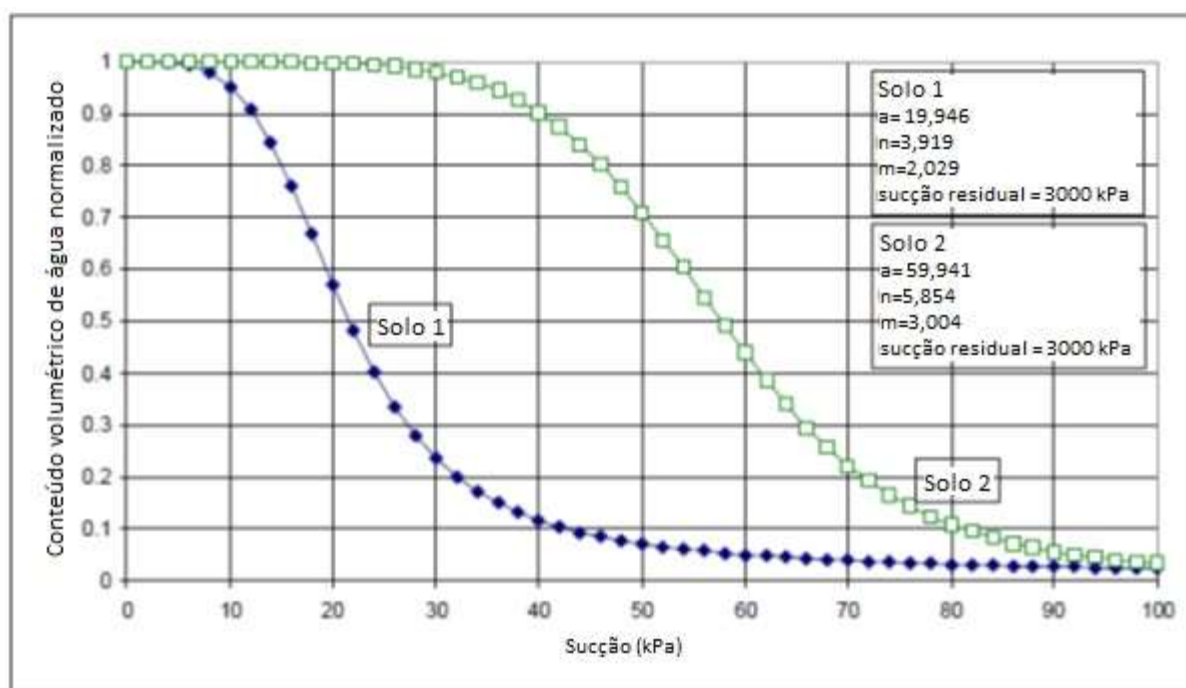
3.2.1 Estimativa da tensão de cisalhamento

A secagem de materiais grosseiros como areia, por exemplo, produz inicialmente um aumento na resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo no confinamento devido às poro-pressões negativas, contudo, com uma secagem adicional (aumento de sucção) o solo começa a diminuir a resistência. A distribuição e geometria dos vazios combinado com a tensão existente nas interfaces de contato foram fundamentais no entendimento da resistência de solos não-saturados.

A curva característica solo-água é, portanto, fundamental para este entendimento, já que fornece informações tanto da geometria quanto da distribuição de água na fase líquida, bem como a resistência nos vazios.

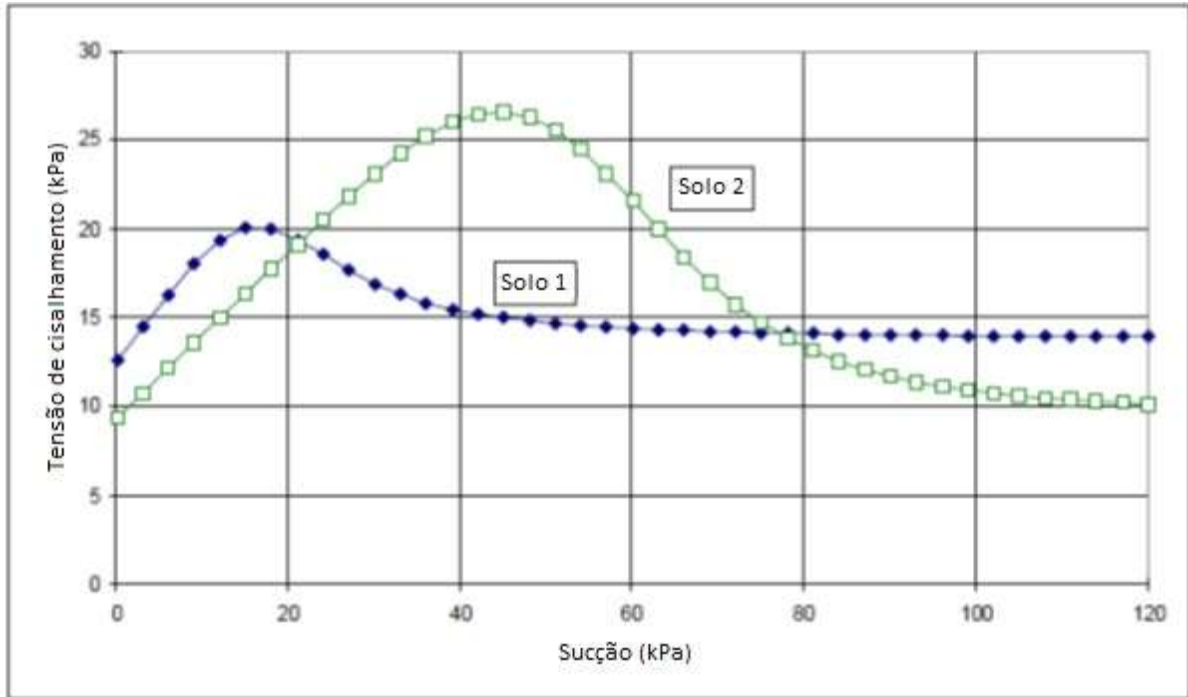
Fredlund et al. (1996) comparam dados experimentais com previsões da resistência ao cisalhamento em função da sucção através da equação de Fredlund e Xing (1994). Conforme o solo começa a dessaturar, há uma diminuição da área de contato efetiva entre a fase líquida e as partículas de solo. Conseqüentemente, um aumento na sucção não é tão efetivo para o aumento da resistência ao cisalhamento.

Figura 3 – Exemplo de curvas características pela equação 4.



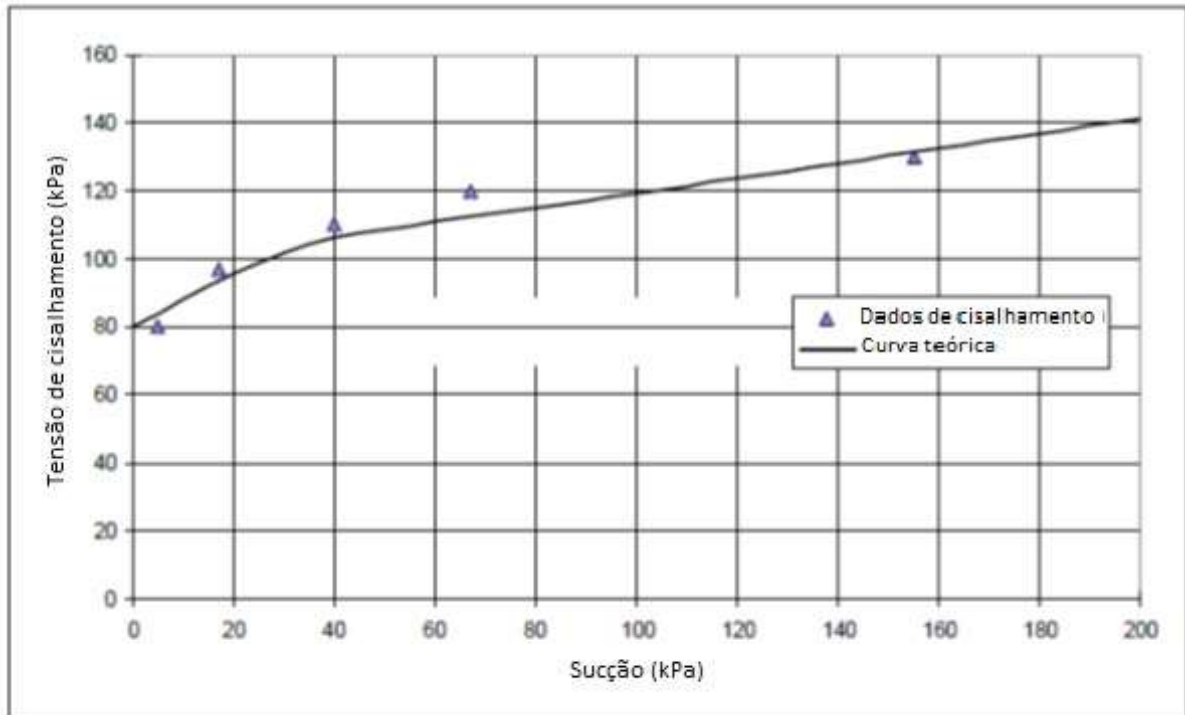
(fonte: adaptado de FREDLUND et al., 1996, p. 14)

Figura 4 – Estimativa da resistência ao cisalhamento através das curvas características.



(fonte: FREDLUND et al., 1996, p. 15)

Figura 5 – Comparação do ao cisalhamento estimado com dados experimentais.



(fonte: FREDLUND et al., 1996, p. 19)

A figura 3 mostra dois exemplos de ajuste através de dados experimentais, que será discutido em 3.2.2. A figura 4 mostra exemplos de previsão da resistência ao cisalhamento e a figura 5 mostra uma comparação entre uma previsão e dados experimentais feitas por Fredlund et al. (1996).

3.2.2 Ajuste de CCSA através de dados experimentais

O trabalho de Yang et al. (2004) mostra uma análise de curvas de secagem e umedecimento para diversos solos arenosos, algumas propriedades dos solos estudados podem ser vistas na tabela 1.

Tabela 1 – Algumas propriedades dos solos estudados por Yang et al. (2004)

	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia siltosa I	Areia siltosa II
G_s	2,62	2,6	2,65	2,64	2,59
Análise granulométrica					
D_{60} (mm)	5,15	1,25	0,35	0,66	0,56
D_{30} (mm)	3,68	0,62	0,23	0,051	0,021
D_{10} (mm)	2,73	0,29	0,17	0,003	0,0005
Coefficiente de uniformidade, C_u	1,89	4,31	2,06	220	1120
Coefficiente de curvatura, C_c	0,96	1,06	0,89	1,31	1,58

(fonte: Yang et al, 2004, p. 910)

Os solos utilizados por Yang et al. (2004) vão desde uma areia grossa com 50% dos grãos maiores que 4,75mm, até areias siltosas onde o conteúdo grãos menores que 0,075mm chega aos 39%.

As equações de Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980) foram utilizadas para fazer um ajuste no pontos experimentais e obter uma curva com diversos parâmetros contendo informações valiosas dos solos não-saturados.

A equação de Fredlund e Xing (1994) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\theta_w = \theta_s * [\ln(1 + \psi / \psi_r) / (\ln(1 + 10^6 / \psi_r))] * [1 / ((\ln(e + (\psi/a)^n))^m)] \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

θ_w = teor de umidade volumétrico;

θ_s = teor de umidade volumétrico saturado;

ψ = sucção (kPa);

ψ_r = sucção residual (kPa);

a = parâmetro do solo relacionado ao valor de entrada de ar (VEA);

n = parâmetro do solo relacionado ao ponto de inflexão da curva (próximo ao VEA);

m = parâmetro do solo relacionado à porção valor de água residual da curva;

e = número natural 2,71828.

A equação de van Genuchten (1980) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\theta_w = \theta_r - (\theta_s - \theta_r) * [1 + (\psi/a_v)^{nv}]^{mv} \quad (\text{equação 5})$$

Sendo:

θ_w, θ_s e ψ = mesmo significados da equação 4;

θ_r = teor de umidade volumétrico na porção residual;

a_v = parâmetro do solo relacionado ao valor de entrada de ar (VEA);

nv = parâmetro do solo relacionado à taxa de extração de água do solo;

mv = parâmetro do solo relacionado ao θ_r .

As CCSA têm relação com a distribuição dos vazios no solo que, por sua vez, tem relação com a distribuição granulométrica e com a porosidade. Sendo comum assumir que o diâmetro dos

vazios é cerca de 20% do diâmetro efetivo do solo, D_{10} , é possível relacionar o D_{10} de um solo com seus parâmetro do VEA e sucção residual da CCSA.

O VEA diminui conforme D_{10} aumenta, a diferença entre a sucção residual e o VEA também diminui conforme o aumento de D_{10} . Quando D_{10} cai para um valor de 3-6 mm, o VEA e a sucção residual parecem chegar no mesmo valor, próximo de zero.

A inclinação da CCSA também é consistente com a inclinação da curva granulométrica do solo. Uma inclinação elevada na curva granulométrica resulta em uma inclinação elevada na CCSA.

O trabalho de Fredlund et al. (1996) traz uma comparação de CCSA para os solos arenosos da tabela 1. É proposto um ajuste de parâmetros através da curva granulométrica. Fazendo uma retro-análise é possível obter uma curva teórica para um solo arenoso. A retro-análise é feita da seguinte forma.

Através do coeficiente de uniformidade (C_u), se tem uma relação com a inclinação da CCSA.

$$[(\theta_s - \theta_r) / (\log \psi_r - \log \psi_a)] = 0,347C_u + 0,144 \quad (\text{equação 7})$$

Através do diâmetro efetivo (D_{10}) se tem relações com a sucção residual e o VEA.

$$\psi_r = -3,915 \log D_{10} + 1,621 \quad (\text{equação 8})$$

$$\psi_a = -0,897 \log D_{10} + 0,441 \quad (\text{equação 9})$$

A partir dos dados obtidos nas equações 7 a 9, é possível obter parâmetro aproximados de ajuste para a equação de Fredlund e Xing (1994).

$$n = -2,997 \left(\frac{(\theta_s - \theta_r)}{(\log \psi_r - \log \psi_a)} \right) + 3,214 \quad (\text{equação 10})$$

$$m = -0,0709 \psi_r + 1,071 \quad (\text{equação 11})$$

$$a = 1,405 \psi_a - 0,083 \quad (\text{equação 12})$$

3.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO

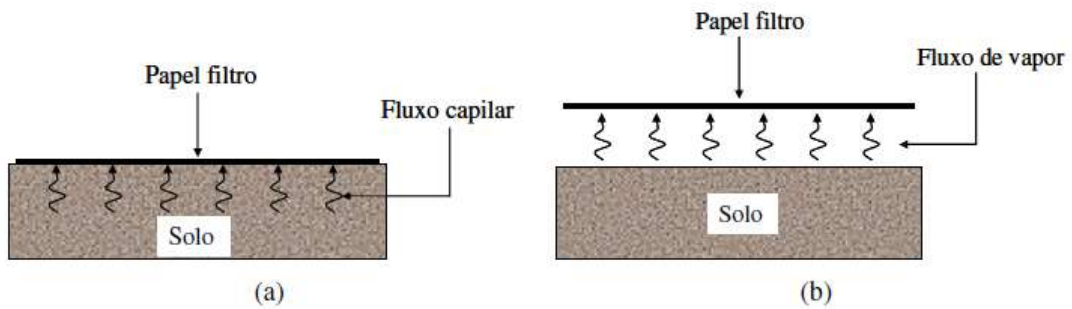
A sucção mátrica em um solo varia conforme a quantidade de água presente no mesmo, já a osmótica não se mostra tão sensível a isso. Com isso em mente, variações na sucção total representam variações na sucção mátrica. Fredlund et al. (2012, p. 149, tradução nossa) dizem que medições da sucção total podem ser usadas na Engenharia Geotécnica para indicar mudanças na sucção mátrica. Os mesmos autores ainda afirmam que a energia livre da água do solo (sucção total) pode ser determinada a partir da medição da pressão de vapor adjacente ao composto solo-água ou a umidade relativa no solo. Existem métodos diretos e indiretos para se obter a umidade relativa em um solo. Neste trabalho será utilizado o método do papel filtro, que é um método indireto.

Além de ser um método de fácil transporte para o local de investigação, barato e, relativamente, simples, ele contempla uma grande gama de resultados variando, segundo Houston et al. (1994, p. 185, tradução nossa), de valores próximo a zero até cerca de 100MPa. Os autores ainda comentam que mesmo que o método tenha recebido críticas, que limitaram o seu uso para investigações de rotina, as vantagens do método superam as desvantagens.

O método é classificado como indireto pois é necessário ter ou fazer uma calibração com o teor de água do papel filtro em relação à sucção do solo. O método é baseado na premissa de que o papel filtro irá atingir um equilíbrio hidrostático com a parcela de água do solo, podendo fazer as relações com a sucção.

O equilíbrio do teor de água no papel filtro deve corresponder à sucção mátrica se o papel estiver em contato direto com o solo, caso não haja contato será medida a sucção total. É apresentado um modelo na figura 6.

Figura 6 – (a) técnica em contato e (b) técnica sem contato.



(fonte: VIVIAN, 2008)

Pela norma D5298–10 (ASTM, 2010, p. 2) os papéis filtro são colocados em um recipiente hermético com a amostra de solo por, pelo menos, sete dias para permitir tempo suficiente para a pressão de vapor da água da amostra, a pressão de vapor da água no papel filtro, e a pressão de vapor parcial de água no ar dentro do recipiente atingirem o equilíbrio. A massa do papel filtro é determinada e a sucção da amostra é obtida através de uma relação de calibração do conteúdo de água do papel filtro com a sucção aplicável para o tipo do papel filtro e o procedimento do teste.

Muitos autores já não utilizam mais o método do papel filtro. Tendo como exemplo Hoyos et al. (2007) que utilizam o método do papel filtro para sucção acima de 690 kPa, devido a não ser tão preciso e rápido para níveis menores de sucção.

4 SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS

Este capítulo descreve os comportamentos típicos observados em solos melhorados. É abordado a influência da cimentação na matriz, na resistência, na rigidez, na coesão, no ângulo de atrito e nas deformações.

Areias naturalmente cimentadas são encontradas em vários lugares na Terra e a cimentação é atribuída, geralmente, à precipitação do cimento da calcita (SAXENA; LASTRICO, 1978, p. 1449, tradução nossa).

O estudo da areia cimentada é ligado diretamente com o problema de estabilidade de taludes, uma característica é suportar taludes naturais íngremes. A cimentação da areia vem de pequenas quantidades de agentes, como sílica, hidrosilicatos, óxidos hidro-ferrosos e carbonatos depositados nos pontos de contato entre as partículas de areia (CLOUGH et al., 1981, p. 799, tradução nossa).

Percebe-se, ainda, que a cimentação tem uma grande importância em obras geotécnicas garantindo, por exemplo, inclinações ou fatores de segurança maiores em taludes, e tal fato está relacionado com a resistência da areia (CRUZ, 2008, p. 26),

Para Saxena e Lastrico (1978, p. 1453, tradução nossa) o comportamento da resistência de um solo pode ser bem entendido se três componentes da resistência ao cisalhamento sejam: atrito, coesão e dilatância. Coesão inclui qualquer cimentação (natural, artificial ou inter-partículas). Atrito e dilatância são de difícil separação, mas ambas têm ligação direta com a força normal atuante na superfície de cisalhamento, esse entendimento serve muito bem para a análise de solos-cimentados.

4.1 MATRIZ

Será explicado a influência da matriz do solo.

4.1.1 Compactação

Conforme a densidade aumenta, a importância relativa do cimento diminui. O que é um resultado surpreendente, pois imagens mostram que para maiores densidades há maior contato entre as partículas de cimento e de areia, e o cimento preenche muito mais os vazios. Também, ensaios de resistência à compressão simples mostraram que a efetividade do cimento aumenta conforme a densidade (HUANG; AIREY, 1993, p. 559-560, tradução nossa).

A cimentação natural se deve, também, à densificação dos grãos de areia com partículas mais finas, de silte e argila, preenchendo os vazios segundo Dupas e Pecker (1979).

Após realizados ensaios em amostras de areia artificialmente cimentadas para verificação da quantidade de agente cimente e na densidade da areia na matriz do solo, os resultados mostraram que o comportamento de uma areia cimentada é influenciado consideravelmente pela quantidade do agente cimentante, densidade da areia, pressão confinante e distribuição granulométrica (CLOUGH et al., 1981, p. 800, tradução nossa).

Huang e Airey (1993, p. 558, tradução nossa) apresentam que, no comportamento drenado, os efeitos da cimentação para amostras menos densas são mais significativos do que para mais densas, reduzindo a importância relativa das ligações da cimentação. Também, um aumento no peso específico seco resulta em um significativo aumento na resistência de pico e o excesso de poro-pressão se torna mais negativo. A resposta é que a tensão de pico aumenta conforme o peso específico, fazendo o material parecer ser mais dúctil, enquanto a dureza é, aparentemente, inalterada.

Vieira et al. (2006, p. 10), constaram que módulos de deformabilidade não dependem só da compactidade, já que decaem mais no lado úmido. Assim, foi constatado que não é somente o grau de saturação que determina o comportamento mecânico, mas também, o teor em água da compactação.

4.1.2 Granulometria

Para o caso de cimentação natural, solos com grandes quantidades de finos se mostraram mais resistentes do que solos com pouca ou nenhuma presença de finos. Fato que aparenta ser devido a algum efeito incremental da cimentação nos próprios finos e um aumento da densidade devido

a um melhor modo de compactação com as partículas finas (CLOUGH et al., 1981, p. 816, tradução nossa).

A presença do cimento pode alterar algumas características do solo, por exemplo: a mudança na curva granulométrica devido a presença de um teor de finos maior; a presença da cimentação; e aumento da densidade da amostra (COOP; ATKINSON, 1993, p. 65, tradução nossa).

4.1.3 Cimentação

Materiais com cimentação de origem geológica (rochas brandas e intemperizadas, solos residuais), solos artificialmente cimentados e areia grauteadas mostram padrões similares de comportamento. Leroueil e Vaughan² (1990 apud CRUZ, 2008, p. 29) trazem os principais padrões:

- a) o fenômeno de plastificação é muito acentuado nestes materiais, o local da plastificação pode ser determinado experimentalmente com razoável precisão. Frequentemente uma inicial, menos pronunciada, plastificação é observada quando a trajetória de tensões está ainda dentro do local principal de plastificação;
- b) vários modos de plastificação são identificados: compressão, cisalhamento e descarregamento. Após a plastificação ocorre a degradação da cimentação de maneira gradual;
- c) a cimentação concede resistência a tração e coesão real ao material;
- d) quando a tensão confinante aumenta, as amostras ensaiadas no cisalhamento mostram uma transição do comportamento frágil/dilatante para o dúctil/compressivo. A rigidez inicial e tensão desviadora na plastificação também podem diminuir em altas tensões confinantes;
- e) as curvas de consolidação mostram em geral pontos de plastificação distintos, e após a plastificação, eles tendem a convergir em direção a curva de consolidação para o material não estruturado. A trajetória K_0 de tensões para material cimentado também tende para trajetória K_0 de tensões características do solo equivalente não estruturado.

Como resultado do aumento do teor de cimento há um aumento na resistência de pico, rigidez, quantidade de dilatação, e decréscimo na tensão para falha nesta tensão confinante (HUANG; AIREY, 1993, p. 556, tradução nossa).

² LEROUEIL, S.; VANUGHAN, P. R. The general and congruente effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotechnique*, v. 40, n. 3, p. 467-488, 1990.

4.2 TENSÃO CONFINANTE

Neste trabalho não será verificada a influência da tensão confinante. Todavia, é importante ter em mente alguns conceitos sobre como ela pode afetar o solo.

Em areias moderadamente e fracamente cimentadas a rigidez e a resistência de pico tendem a aumentar quanto maior for a pressão confinante (CLOUGH et al., 1981, p. 805, tradução nossa).

As areias mais resistentes mostram uma fratura frágil em todos níveis de confinamento, ao passo que as areias moderadamente e fracamente cimentadas mostram um padrão de transição de ruptura frágil para dúctil conforme a tensão confinante aumenta (CLOUGH et al., 1981, p. 805, tradução nossa).

A razão para a transição de comportamento parece estar relacionada com as contribuições relativas à resposta da areia pela cimentação e componentes friccionais do mecanismo de resistência à deformação (CLOUGH et al., 1981, p. 805, tradução nossa).

Para altas tensões confinantes as partículas de cimento parecem ter efeitos muito menores no comportamento (HUANG; AIREY, 1993, p. 559, tradução nossa).

Os efeitos das ligações de cimento só são significantes para tensões abaixo da tensão de pré-adensamento, onde causa aumento na dureza e na resistência do solo (HUANG; AIREY, 1993, p. 560, tradução nossa).

4.3 CIMENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ

O comportamento da resistência da areia depende da coesão criada pelas ligações de cimentação e resistência pelo atrito resultante do deslizamento entre as partículas (SAXENA; LASTRICO, 1978, p. 1453, tradução nossa).

Para agentes cimentantes do tipo frágil, as ligações de cimentação são quebradas em deformações muito pequenas, enquanto o atrito é mobilizado para grandes deformações (CLOUGH et al., 1981, p. 805, tradução nossa).

Os ensaios realizados sugerem que além da adição de cimento, a distribuição dos grãos, densidade e arranjos dos grãos desempenham um papel importante no comportamento de areias cimentadas (CLOUGH et al., 1981, p. 816, tradução nossa).

A resistência à tração de uma areia cimentada é em torno de 10% da sua resistência à compressão não confinada (CLOUGH et al., 1981, p. 816, tradução nossa). Consoli et al. (2013) mostram que a resistência à tração da areia de Osório cimentada com CP V é cerca de 15% da resistência à compressão.

Fatores que podem influenciar a relação tensão-deformação do solo-cimento incluem: o nível da água adicionado, o qual pode indicar o grau de hidratação do cimento; o tempo de cura; e a quantidade de cimento presente. É visto que a tensão de pico aumenta e o solo apresenta um comportamento mais frágil com um maior tempo de cura. Existe uma variação do módulo de deformação com o tempo de cura, implicando que a relação tensão-deformação é praticamente não sensível à quantidade de água (Akinmusuru³, 1987 apud BOSCH, 1996).

O módulo de deformação é um parâmetro para comparação da rigidez das amostras. No entanto, seu valor varia de acordo com as propriedades do material, que dependem da quantidade de agente cimentante presente, da umidade envolvida na cimentação e no nível de hidratação do cimento. (Akinmusuru⁴, 1987 apud BOSCH, 1996).

Allman e Poulos⁵(1988 apud CRUZ, 2008, p. 36-37) utilizaram cimento Portland e concluíram que para um carregamento isotrópico o principal efeito foi a redução no volume específico inicial do solo e um aumento na tensão de plastificação, a medida que há um aumento na quantidade de cimento. A cimentação gerou uma maior resistência e rigidez, qualidades influenciadas diretamente pela quantidade de cimento.

A adição de cimento causa um aumento na tensão aparente de pré-adensamento. A cimentação causa um aumento do local de plastificação, em parte devido ao aumento da tensão de pré-

³ AKINMUSURU, J. O. The effects of cementation on stress-strain behaviour of a sand. In: REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 9th, 1987, Lagos. **Proceedings...**Rotterdam: A. A. Balkema, 1987. v.1, p. 435- 442

⁴ op. cit.

⁵ ALLMAN, M. A.; POULOS, H. G. Stress-strain behaviour of na artificially cemented calcareous soil. In: INTERNATONAL CONFERENCE ON CALCAREOUS SEDIMENTS, 1988, Perth, **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema. 1988, p. 51-60

adensamento, assim como resultado das ligações (HUANG; AIREY, 1993, p. 558, tradução nossa).

4.4 CIMENTAÇÃO NAS DEFORMAÇÕES, COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO

A parcela de coesão da resistência ao cisalhamento de um solo cimentado permanece predominantemente a baixos níveis de deformação. Enquanto acima de certos níveis de cimentação há uma quebra gradual na cimentação e a resistência pelo atrito se torna predominante. A níveis de grandes deformações (condições de ruptura) há uma quebra completa na estrutura de cimentação e a resistência ao cisalhamento se torna totalmente dependente da parcela friccional (SAXENA; LASTRICO, 1978, p. 1453-1454, tradução nossa).

Para areias homogêneas não cimentadas é comum que o ângulo de atrito ou diminuía com um aumento de porosidade ou aumente com o aumento da densidade seca (SAXENA; LASTRICO, 1978, p. 1454, tradução nossa).

A introdução de um agente cimentante na areia produz um material com duas componentes de resistência: devido ao próprio cimento e devido ao atrito. O ângulo de atrito de uma areia cimentada é similar ao de uma areia não cimentada (CLOUGH et al., 1981, p. 816, tradução nossa).

Durante o cisalhamento ocorrem aumentos de volume mais rápidos e com menores deformações para areia cimentadas do que para não cimentadas (CLOUGH et al., 1981, p. 816, tradução nossa).

A coesão das amostras aumenta com o tempo de cura e com a quantidade de cimento. Outros resultados mostram que além de 21 dias a coesão permanece praticamente a mesma, isto pode indicar que o efeito da hidratação do cimento nas várias misturas solo-cimento terminou aos 21 dias. Como a hidratação iniciou no tempo da mistura, o grau de cimentação aumenta até a atingir a cimentação máxima. A coesão aumentou de 7 a 8 vezes em comparação com os tempos de

cura de 7 e 28 dias (AKINMUSURU⁶, 1987 apud BOSCH, 1996). Akinmusuru⁷(1987 apud BOSCH, 1996) apresenta que “Amostras com até 10% de cimento adicionado mostraram que o parâmetro predominante foi a coesão e não o ângulo de atrito.”.

A areia cimentada estudada por Consoli et al. (2010, p. 763, tradução nossa), mostrou uma relação da resistência à tração sobre a resistência à compressão igual a 0,15. Esta relação não mostrou-se dependente dos teores de cimento ou porosidade das misturas estudadas.

Consoli et al. (2013a) apresentou uma metodologia alternativa para a determinação dos parâmetros de Mohr-Coulomb de solos cimentados através dos resultados de ensaios resistência à compressão simples e da relação entre tração e compressão. A determinação da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e dos respectivos parâmetros (c' e ϕ') é possível através dessa metodologia.

O efeito da cimentação em baixas tensões é de aumento da coesão e do ângulo de atrito (LADE et al., 1989, p. 1382, tradução nossa).

A resistência pós-pico de uma areia cimentada é próxima de uma areia não cimentada, apesar de existir algum grau de coesão residual observado em todas areias cimentadas investigadas (CLOUGH et al., 1981, p. 816). No entanto, o ângulo de atrito crítico para solos cimentados foi ligeiramente inferior ao dos não cimentados, provavelmente devido a influência da cobertura das partículas pelo cimento. Todavia, as amostras cimentadas e não cimentadas atingiram, essencialmente, a mesma linha do estado crítico. O ângulo de atrito do estado crítico de materiais cimentados foi ligeiramente menor que o de amostras não-cimentadas, possivelmente devido à influência do cimento no revestimento das partículas (COOP; ATKINSON, 1993, p. 65, tradução nossa).

⁶ AKINMUSURU, J. O. The effects of cementation on stress-strain behaviour of a sand. In: REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 9th, 1987, Lagos. **Proceedings...**Rotterdam: A. A. Balkema, 1987. v.1, p. 435- 442

⁷ op. cit.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido para este Trabalho de Conclusão de Curso. São descritos os materiais e dosagens utilizados, os procedimentos de moldagem dos corpos de prova e os ensaios realizados.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência da sucção mátrica na resistência à compressão de uma amostra de solo artificialmente cimentada.

Visando uma comparação posterior com estudos realizados no mesmo laboratório, fixaram-se os seguintes **pontos de moldagem** para a mistura areia de Osório e cimento:

- a) índice de vazios de 0,8, 0,72 e 0,64;
- b) teores de cimento de 1, 3, 5 e 9% em relação à massa de solo seco;
- c) teor de umidade de moldagem igual a 10% em relação a massa de solo seco;
- d) tempo de cura das amostras de 7 dias.

Para a mistura caulim e cimento fixaram-se os seguintes pontos de moldagem:

- a) pesos específicos aparentes secos de 16, 15 e 14 kN/m³;
- b) teores de cimento de 3 e 9% em relação à massa de solo seco;
- c) teor de umidade de moldagem igual a 20% em relação a massa de solo seco;
- d) tempo de cura das amostras de 7 dias.

Definindo as características das amostras foram adotados a moldagem de quatro amostra iguais para cada ponto de moldagem.

5.2 MATERIAIS

Foram utilizados, para a realização do programa experimental, os seguintes materiais:

- a) solo;

- b) cimento;
- c) água;
- d) papel filtro.

5.2.1 Solo

Para realização do trabalho foram utilizados dois tipos de solo: areia de Osório e caulim.

5.2.1.1 Areia de Osório

Um dos solos utilizados neste trabalho é conhecido como areia de Osório. Proveniente do município de Osório, no estado do Rio Grande do Sul. Este solo possui várias propriedades semelhantes à de areias utilizadas em pesquisas na prática internacional. É uma areia fina quartzosa, proveniente de depósitos praias marinhos e eólicos e de retrabalhamento eólico atual da região costeira do estado do Rio Grande do Sul (SPINELLI, 1999, p. 34).

Segundo Casagrande (2005, p. 72) e NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS), a areia de Osório caracteriza-se por ser uma areia fina limpa e de granulometria uniforme, que tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmeinita, turmalina e magnetita. Não sendo observada a presença de matéria orgânica (SPINELLI, 1999, p. 37).

Segundo Consoli et al. (2010, p. 760, tradução nossa) o peso específico dos grãos é de 2,65. O diâmetro efetivo (D_{50}) de 0,16 mm, tendo coeficientes de uniformidade e de curvatura de 1,9 e 1,2, respectivamente. O índice de vazios mínimo e máximo são de 0,6 e 0,9, respectivamente.

5.2.1.2 Caulim

Segundo CORTE (2013), o caulim é um solo caolinítico, não apresentando expansividade, sendo adequado para a estabilização com agentes cimentantes.

As propriedades físicas do caulim, mostram que a quantidade de argila presentes no material é de 22% e a de silte é de 78%. Tendo a densidade dos grãos (G) com o valor de 2,55 e os pesos aparentes secos variando de 14 e 16 kN/m³, sendo o máximo de 16,7 kN/m³.

5.2.2 Cimento Portland

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) foi utilizado na realização do trabalho e tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação.

Justifica-se a utilização do cimento Portland CP V-ARI pois as principais reações do cimento acontecem no período de cura, 7 dias, isso faz com que a amostra não tenha mudanças consideráveis na estrutura do solo-cimento, podendo ser avaliada a sucção 14 dias após rompido o corpo de prova. Também a resistência à compressão simples do cimento aos 28 dias de cura se equivale para 7 dias de com o cimento CP V-ARI. Essas características permitem que o tempo de cura adotado para a execução dos ensaios de resistência à compressão seja de 7 dias. Do trabalho de Consoli et al. (2010, p. 760), é considerado a densidade dos grãos do cimento como 3,15.

5.2.3 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos de prova será a água destilada, é fundamental seu uso pois a presença de sais tem efeito na sucção osmótica e influi no resultado final. A água foi obtida através do processo de destilação da água proveniente da rede pública de abastecimento.

5.2.4 Papel Filtro

Foi utilizado o papel filtro Whatman n. 42. Fredlund e Rahardjo (1993, p. 77) afirmam que podem ser utilizadas quaisquer curvas de calibração que fazem referência ao papel Whatman n. 42, neste trabalho será utilizada a de Chandler et al. (1992).

5.3 MÉTODOS

Serão apresentados os métodos de ensaio e demais procedimentos a serem realizados durante o programa experimental. Para os ensaios que serão realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma. No caso de modificação de algum procedimento descrito em norma ou na ausência de norma técnica referente ao assunto abordado, será realizada uma descrição mais detalhada do método adotado.

5.3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986). As amostras foram armazenadas até a data da sua utilização em sacos plásticos identificados e vedados.

5.3.2 Caracterização do solo

Para a caracterização do solo foi determinado o seu teor de umidade e foram realizados ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos e índices de vazios máximo e mínimo.

A determinação do teor de umidade do solo seguiu as diretrizes da norma NBR 6457 (ABNT, 1986, p. 7).

A massa específica real dos grãos do solo foi determinada a partir da NBR 6508 (ABNT, 1984), onde está descrita a aparelhagem, execução e interpretação dos resultados.

Para a determinação dos índices de vazio máximo e mínimo foi utilizada a NBR 12051 (ABNT, 1990).

5.3.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

As amostras foram preparadas seguindo o mesmo procedimento, baseado nos trabalhos de Corte (2013, p. 42-44) e Cruz (2008, p. 74-75). Seguindo as dosagens desejadas, os corpos de prova foram preparados em um molde cilíndrico tripartido com dimensões suficientes para obter dimensões de $10 \pm 0,5$ cm de altura e $5 \pm 0,1$ cm de diâmetro.

A pesagem dos materiais foi feita em uma balança de precisão de 0,01 g. Após pesados os materiais necessários, foi dado início ao procedimento do processo de moldagem.

Misturam-se os materiais secos até atingirem uma forma homogênea e, em seguida, adiciona-se a parte de água, e é misturado até atingir novamente uma forma homogênea.

Após as misturas dos materiais, a quantidade necessária para a moldagem do corpo de prova foi dividida em três partes iguais. Visando a posterior compactação, as misturas foram armazenadas em recipiente hermético até a hora de seu uso, evitando a perda de umidade.

Após a etapa de mistura é necessário pesar duas cápsulas contendo o material recém misturado, para verificação da umidade, seguindo o item 4.3.2.

O processo de moldagem do corpo de prova é dado pela compactação das camadas. Cada uma das três partes iguais será compactada em uma mesma espessura de, aproximadamente 3,33 cm. Destaca-se a necessidade de escarificar entre cada compactação de camada, visando aumentar a ligação entre as camadas.

Ao fim deste processo, a amostra foi retirada do molde, armazenados e curados em condições ideais pelo período de 6 dias em temperatura controlada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Sob igual temperatura, no sexto dia as amostras foram tratadas da seguinte forma: (i) totalmente imersas em água, (ii) adicionado **10%** da massa do CP em água, (iii) adicionado **5%** da massa do CP em água, e (iv) sem alterações. O objetivo destes procedimentos é obter sucções diferentes para cada amostra, podendo compará-las posteriormente.

5.3.4 Resistência à compressão simples

A realização dos ensaios de compressão simples seguiu os procedimentos gerais descritos pela NBR 12025 (ABNT, 1990).

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática, figura 7, com capacidade máxima de 50kN. A velocidade de deformação destes ensaios será de 1,14 mm/min.

Foi utilizada uma curva de calibração que transforma o deslocamento no anel em força aplicada.

5.3.5 Método do papel filtro

A aplicação do método do papel filtro seguiu as diretrizes da D5298 – 10 (ASTM, 2010), com algumas pequenas alterações. O sumário do teste está exemplificado no capítulo 3.2. Os materiais e o processo de execução serão descritos a seguir.

Figura 7 – Prensa automática.



(fonte: elaborado pelo autor)

Os materiais utilizados estão exemplados no quadro 2.

O procedimento começa com a preparação do papel filtro. Foram utilizados somente os papéis filtros que forem previamente secos e que não estejam em contato com o ambiente nem com outros materiais úmidos.

Para a medição da sucção com o papel filtro, existem dois métodos que são possíveis de se utilizar: papel filtro em contato e sem contato com a amostra. Como foi desejada a medida da sucção mátrica, foi utilizada a técnica em que o papel filtro se mantém em contato com a amostra. Foram colocados 3 papéis filtro juntos à amostra (figura 8), todos em contato entre si e somente um em contato com o solo, através de um equilíbrio hidrodinâmico obtendo a mesma umidade. Os papéis foram mantidos pelo menos 14 dias em contato com o solo, para que o equilíbrio ocorresse.

Figura 8 – Método do papel filtro.



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 2 – Descrição dos materiais utilizados

Material	Descrição
Papel filtro	Whitman No. 42
Recipientes	Serão utilizados recipientes de metal para colocar o solo e par a hora da pesagem do papel filtro serão utilizados recipientes plásticos.
Balança	Será utilizada uma balança com leitura de 0,0001 g e herméticamente fechada
Estufa	Controlada termostaticamente (60° C)
Outros equipamentos	Pinças, tesouras, papel filme

(fonte: elaborado pelo autor)

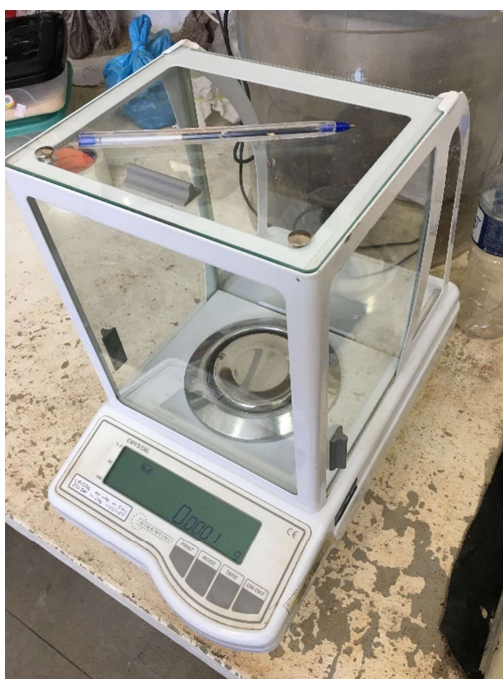
Após atingir o equilíbrio, foi realizada a pesagem do papel filtro úmido e, sendo levado à estufa (60° C) para secagem. A seguir a secagem, foi pesado o papel seco (figura 9), lembrando que esse processo necessita ser extremamente rápido, com o menor contato com o ambiente possível. Foi obtida uma relação de umidade no papel, que foi relacionada com uma curva de calibração pré-existente.

A curva de calibração é dada por Chandler et al. (1992):

$$\text{Para } w_{\text{papel}} \leq 47\%, \text{ Sucção (kPa)} = 10^{4,84-0,0522w(\%)} \quad (\text{equação 11})$$

$$\text{Para } w_{\text{papel}} > 47\%, \text{ Sucção (kPa)} = 10^{6,05-2,48\log(w(\%))} \quad (\text{equação 12})$$

Figura 9 – Balança de precisão.



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.6 Software SoilVision™

Após obtidos os dados através do método do papel filtro, foi utilizado o software SoilVision™ 4.0 para realização dos ajustes das equações 4 e 5, de uma maneira mais prática e precisa, fornecendo somente a sucção, a umidade gravimétrica e alguns dados sobre o solo.

6 RESULTADOS

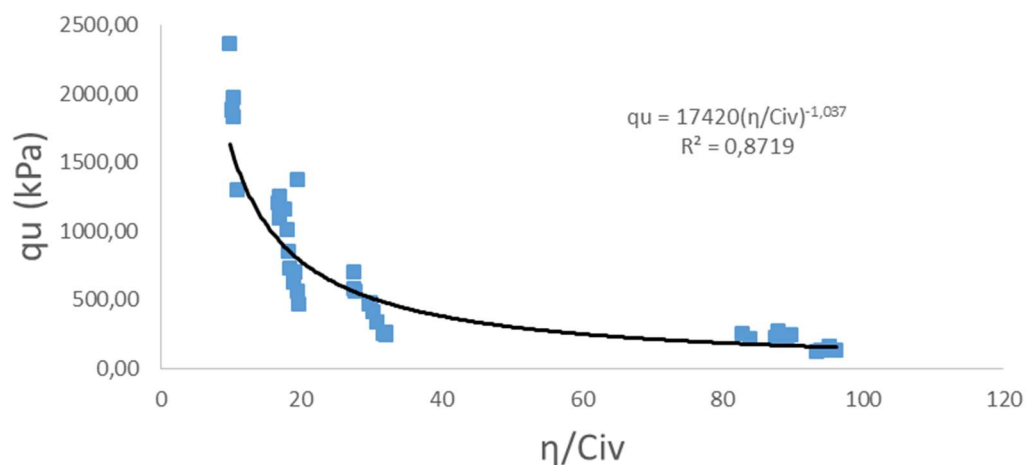
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do programa experimental elaborado. Primeiramente, são apresentados os resultados dos corpos-de-prova que foram rompidos através do ensaios de compressão simples. Em seguida são mostrados os resultados obtidos através do método do papel filtro, onde equações de ajuste são utilizadas para a realização de comparação das propriedades de solos não-saturados.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os corpos-de-prova submetidos aos ensaios de compressão simples foram analisados a fim de se confirmar o efeito do teor de cimento e da porosidade na resistência das misturas.

As misturas de areia de Osório-cimento utilizadas neste estudo já foram amplamente estudadas. Marques (2016) e Consoli et al. (2012) demonstram que quanto menor o valor da razão vazios/cimento (η/C_{iv}), que relaciona porosidade (η) e teor volumétrico de cimento (C_{iv}), maior resistência à compressão simples. O ajuste apresentado na figura 7 se mostrou adequado já que foco deste trabalho será o ajuste e interpretação das curvas características dos solos não-saturados. No ajuste da figura 10 estão todos os dados, incluindo os não-saturados.

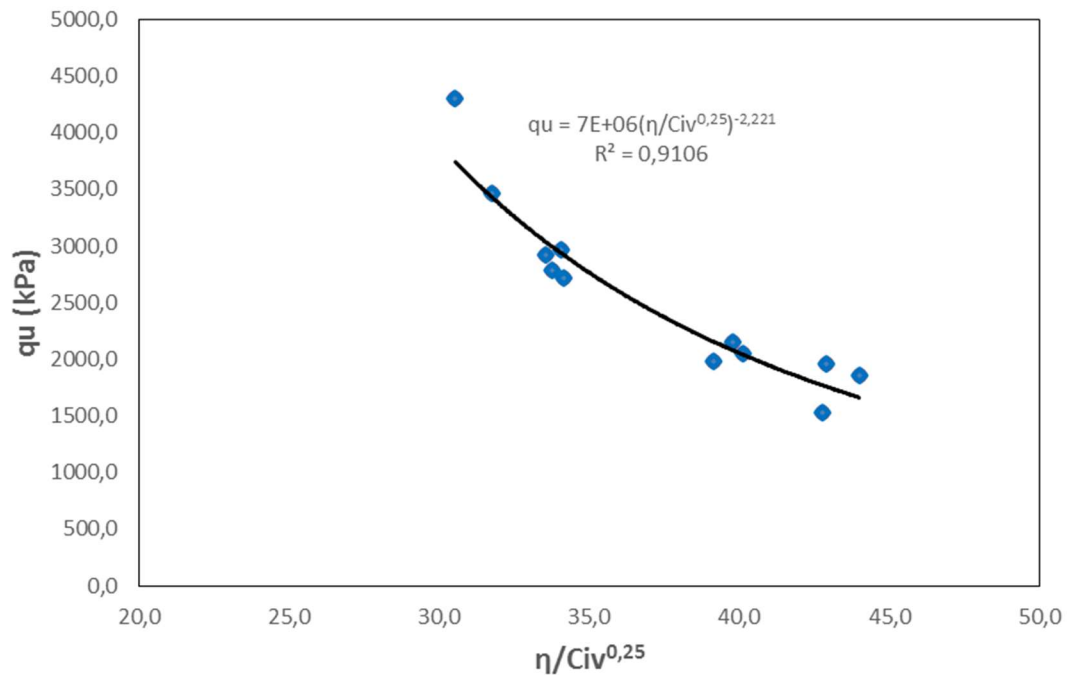
Figura 10 – RCS x η/civ para misturas areia-cimento



(fonte: elaborado pelo autor)

O ajuste foi realizado para a mistura caulim-cimento, representado na figura 11, mesmo com uma correlação satisfatória ($R^2 > 0,9$), foram coletados poucos dados, porém considera-se adequado o ajuste para o presente estudo, todos os corpos-de-prova (saturados e não-saturados) também foram utilizados para o ajuste. Sobre os dados foi aplicada a potência 0,25 sobre o teor volumétrico de cimento ($\eta/Civ^{0,25}$), o mesmo utilizado por Corte (2013) para o mesmo solo melhorado com cal, o ajuste se mostrou eficiente também para o cimento.

Figura 11 – RCS para misturas caulim-cimento



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA O SISTEMA SOLO-ÁGUA

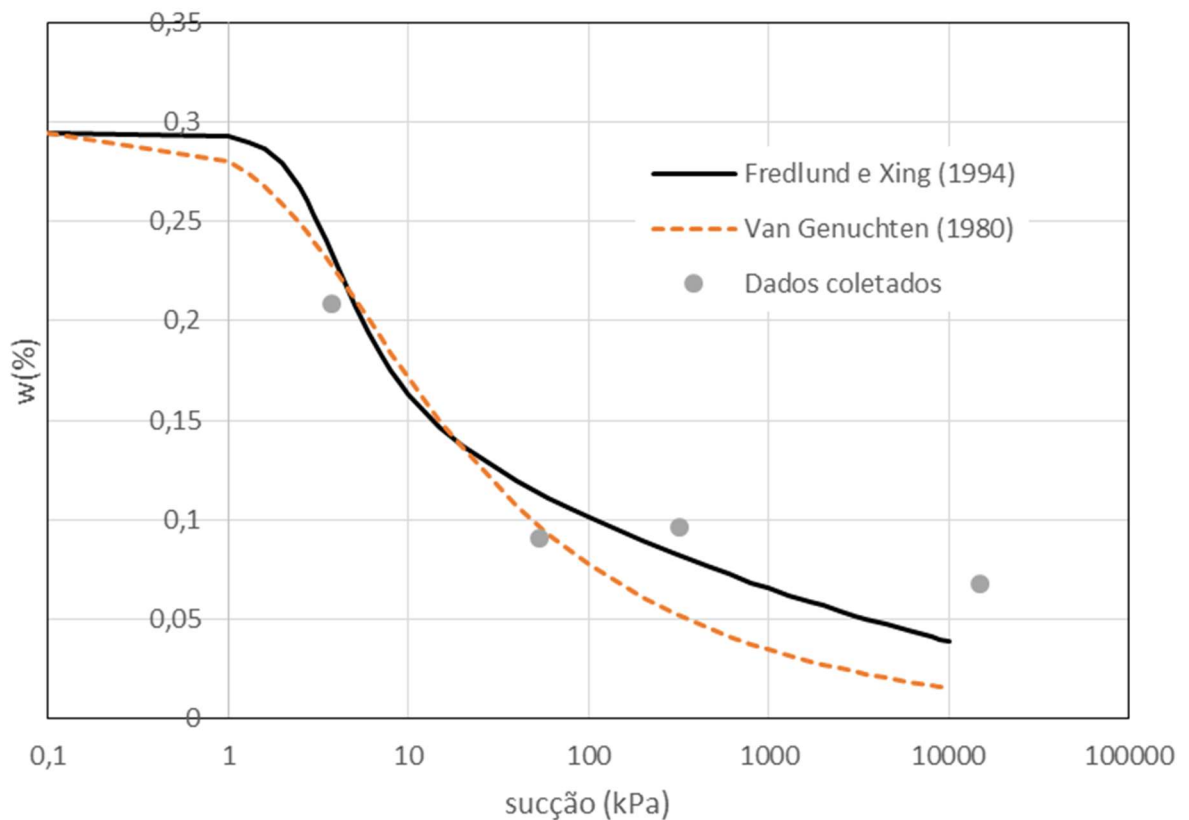
Após a aplicação do método do papel filtro nas amostras é obtido a sucção. As CCSA trazem uma relação da água no solo com a sucção. As curvas trazem informações importantes sobre o solo, como já descrito no capítulo 3.

Através das equações 4 e 5 e do *software* SoilVision™, foi possível montar as curvas características.

Um exemplo de ajuste das equações através dos pontos experimentais pode ser observado na figura 12, onde foram ajustados os valores obtidos em laboratório através das equações 4 e 5.

Em seguida, é apresentada uma tabela com os resumos dos ajustes e uma figura para exemplificar visualmente o ajuste.

Figura 12 – Exemplo de ajuste de dados



(fonte: elaborado pelo autor)

Todas as figuras mostram as curvas ajustadas pela equação de Fredlund e Xing (1994) (equação 4), uma vez que apresentam um melhor ajuste em relação à equação 5, de Van Genuchten (1980) (LEONG; RAHARDJO, 1997).

Os dados que serão mostrados a seguir seguirão uma ordem, nas tabelas 2, 3 e 4 estão os dados para os pontos moldados, separados pelos teores de cimento, para índice de vazios (e) = 0,68; 0,73 e 0,8, respectivamente. Na tabela 5 é feita uma comparação geral somente considerando o η/C_{iv} .

Nas tabelas a seguir, os parâmetros a e av estão ligados ao valor de entrada de ar (VEA) . O parâmetro n está relacionado à taxa de extração de água no solo. O parâmetro nv está relacionado ao ponto de inflexão da curva. Os parâmetros m e mv estão relacionados a porção relacionada ao teor volumétrico de água residual. O parâmetro ψ_r é o valor da sucção residual.

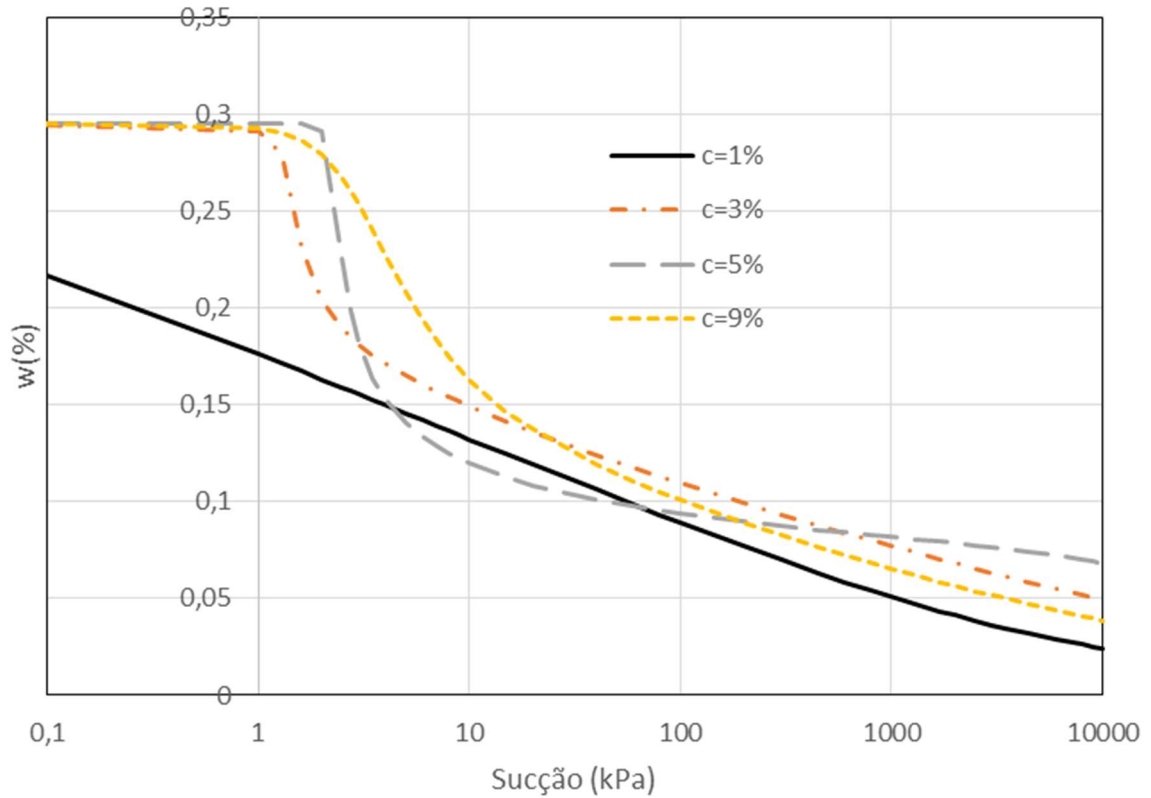
As figuras 13, 14, 15, 16 e 19 apresentam, os dados das tabela 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

Tabela 2 – Dados de ajuste para $e=0,68$ – areia-cimento.

	$e=0,68$			
	$c=1\%$	$c=3\%$	$c=5\%$	$c=9\%$
Fredlund e Xing (1994)				
a	0,765	1,311	2,203	2,616
n	0,279	20,000	20,000	3,280
m	1,784	0,162	0,264	0,386
ψ_r	150,307	6,251	18850,920	53,552
AEV (kPa)	11,050	0,127	1,740	1,890
Inclinação máxima	0,152	0,246	0,125	0,695
R^2	0,959	0,887	0,827	0,939
Van Genuchten (1980)				
av	0,001	0,039	0,023	0,444
nv	0,232	0,228	0,225	1,626
mv	3,042	1,277	1,290	0,216
AEV (kPa)	0,030	0,127	0,040	1,200
Inclinação máxima	0,152	0,246	0,125	0,411
R^2	0,956	0,852	0,640	0,907

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – ajuste da tabela 2



(fonte: elaborado pelo autor)

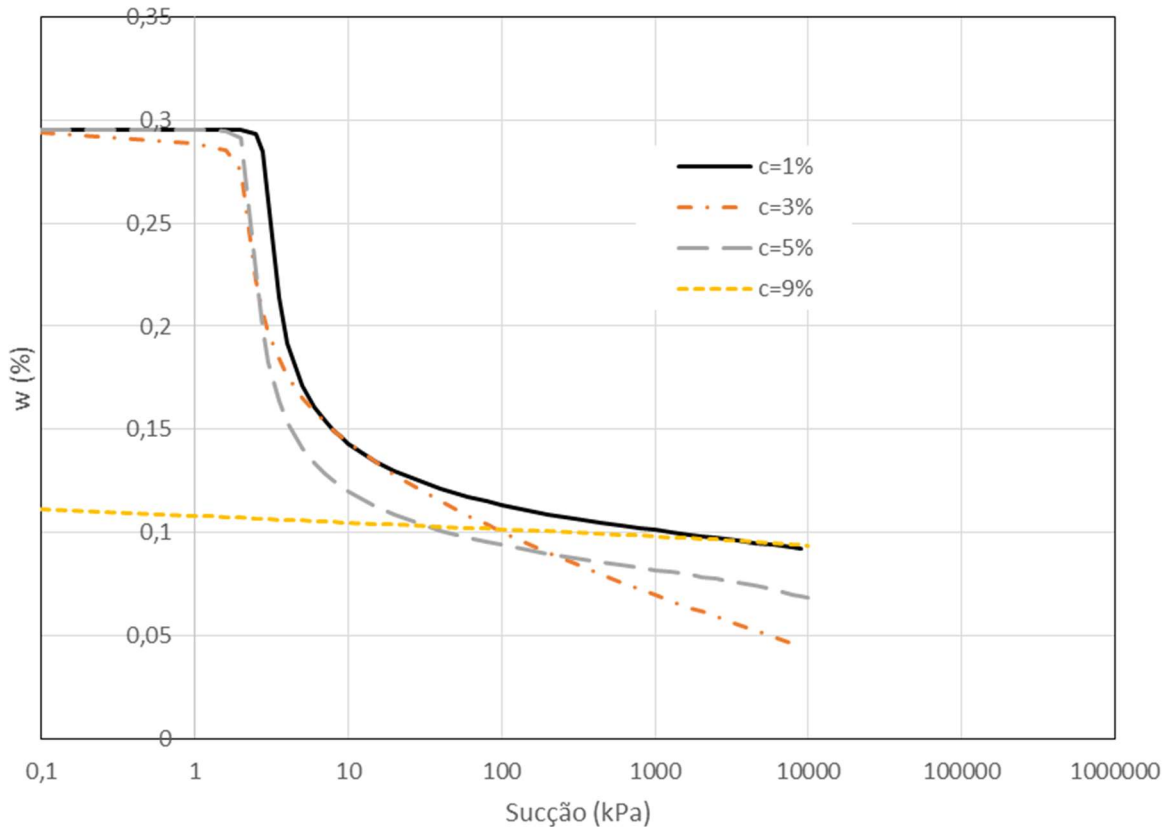
Percebe-se um aumento dos parâmetros a e m conforme o aumento do teor de agente cimentante. Apesar do ajuste mostrado na tabela não ficar claro, a tendência é que o valor de entrada de ar aumente e a sucção residual também cresça.

Tabela 3 – Dados de ajuste para $e=0,73$ – areia-cimento.

	$e=0,73$			
	$c=1\%$	$c=3\%$	$c=5\%$	$c=9\%$
Fredlund e Xing (1994)				
a	2,843	2,066	1,488	0,173
n	20,000	20,000	3,056	0,018
m	0,224	0,174	0,302	3,602
ψ_r	173473,600	3,102	570289,600	999998,900
AEV (kPa)	0,249	1,630	1,080	98295,200
Inclinação máxima	1,833	1,327	0,528	0,372
R^2	0,976	0,933	0,989	0,936
Van Genuchten (1980)				
a_v	4,074	1,345	0,090	0,002
n_v	2,628	3,000	0,282	0,027
m_v	0,063	0,086	0,586	1,966
AEV (kPa)	0,200	0,590	0,130	0,010
Inclinação máxima	0,270	0,392	0,121	0,016
R^2	0,654	0,747	0,994	0,936

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 14 – Ajuste da tabela 3



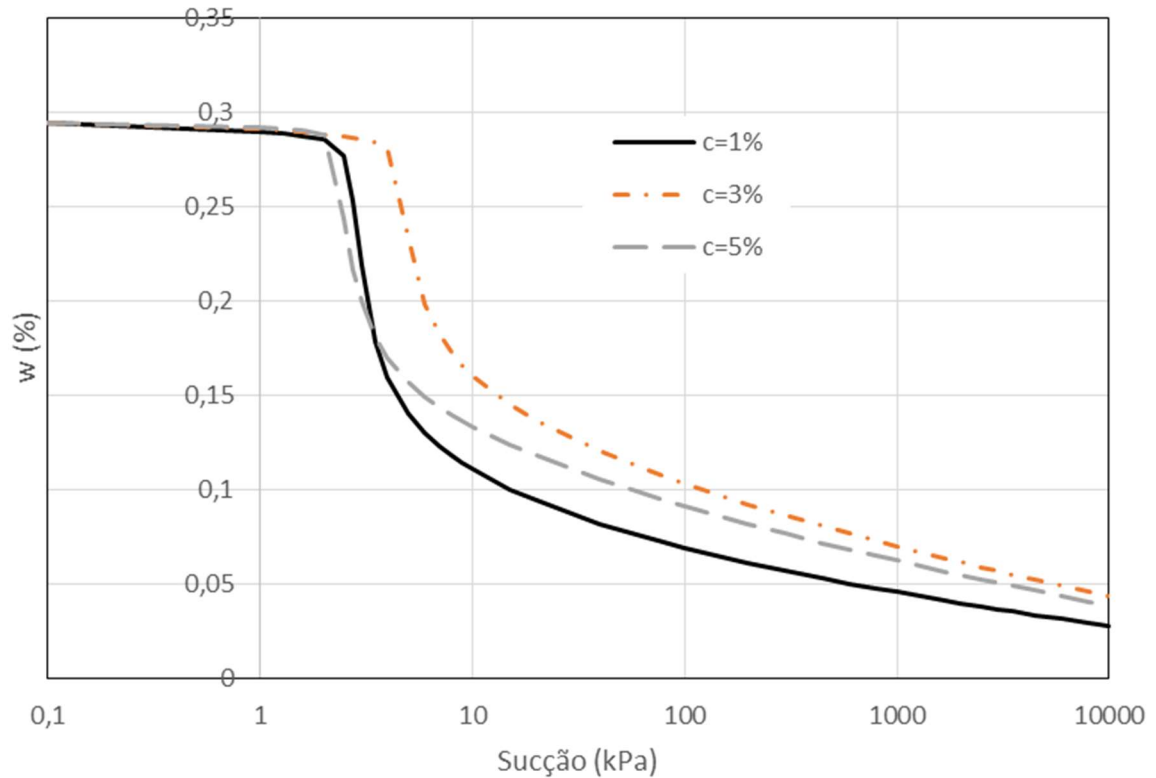
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4 – Dados de ajuste para $e=0,80$ – areia-cimento.

	$e=0,80$		
	$c=1\%$	$c=3\%$	$c=5\%$
Fredlund e Xing (1994)			
a	2,669	4,441	2,281
n	20,000	20,000	20,000
m	0,267	0,189	0,214
ψ_r	4,166	6,431	8,976
AEV (kPa)	2,350	3,390	1,860
Inclinação máxima	2,203	1,303	1,374
R^2	0,873	0,917	0,748
Van Genuchten (1980)			
a_v	0,598	0,617	0,837
n_v	3,000	3,000	0,404
m_v	0,211	0,095	0,616
AEV (kPa)	1,190	1,280	0,050
Inclinação máxima	0,741	0,422	0,176
R^2	0,589	0,709	0,609

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Ajuste da tabela 4



(fonte: elaborado pelo autor)

Com os dados das tabelas 2 a 4, percebe-se que existem problemas na construção das curvas para alguns pontos de moldagem ($e_{0,68} c=1\%$ e $e_{0,73} c=9\%$). Há uma tendência de diminuição da inclinação máxima da curva, conforme o aumento do teor cimentação. A sucção residual também tende a aumentar conforme o maior teor de cimento.

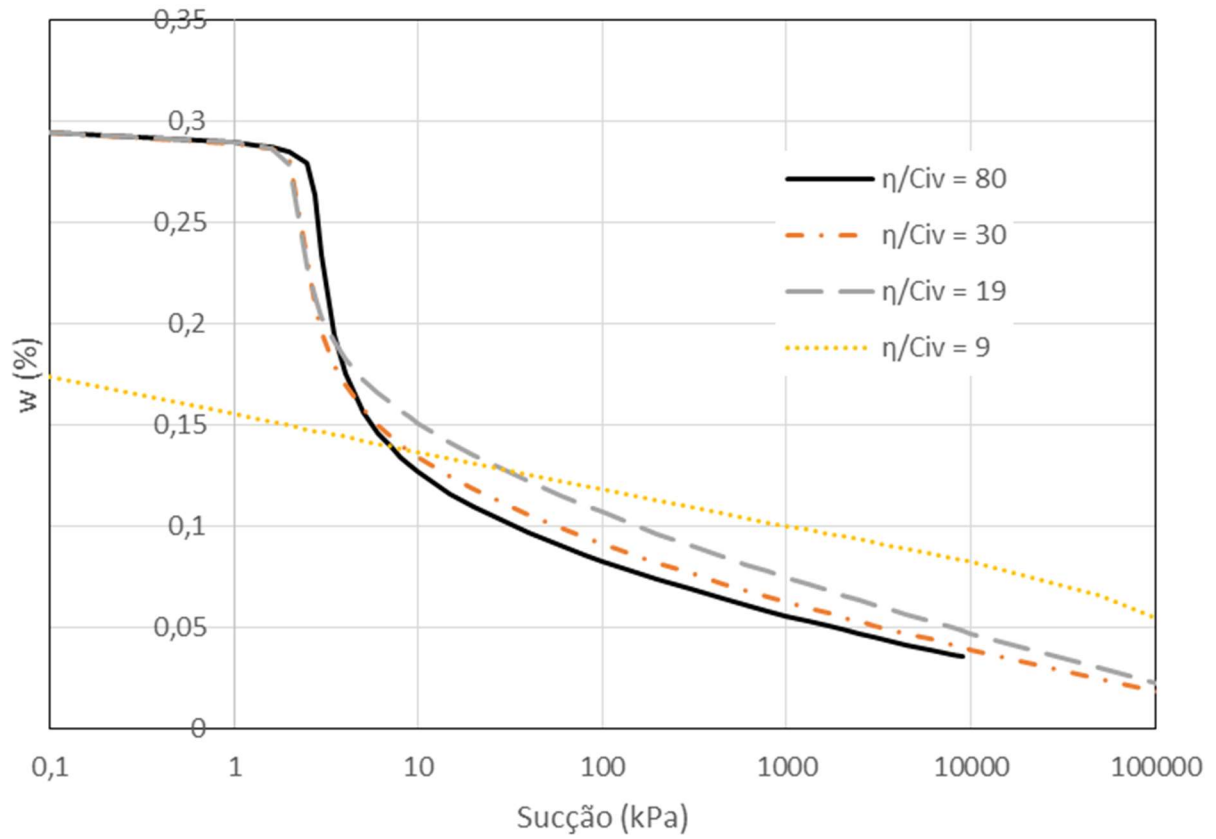
Na figura 16, é feita uma comparação das curvas com a relação η/C_{iv} . Nota-se que os dados para a relação $\eta/C_{iv}=9$ não mostraram um bom ajuste, por serem insuficientes. É vista a mesma tendência acima. Quanto menor o η/C_{iv} , menor o parâmetro a , menor o parâmetro m .

Tabela 5 – Dados de ajuste para a relação η/C_{iv} .

	η/C_{iv}			
	80	30	19	9
Fredlund e Xing (1994)				
a	2,723	2,209	2,080	1,636
n	20,000	20,000	20,000	0,108
m	0,226	0,198	0,164	2,447
ψ_r	3,992	3,556	3,982	241903,300
AEV (kPa)	2,360	1,630	1,640	945,130
Inclinação máxima	1,927	1,159	1,238	0,215
R^2	0,714	0,773	0,686	0,301
Van Genuchten (1980)				
a_v	0,954	1,338	4,742	0,007
n_v	3,000	3,000	1,497	0,117
m_v	0,133	0,103	0,116	1,652
AEV (kPa)	0,800	0,590	0,130	0,010
Inclinação máxima	0,547	0,450	0,248	0,069
R^2	0,503	0,619	0,708	0,305

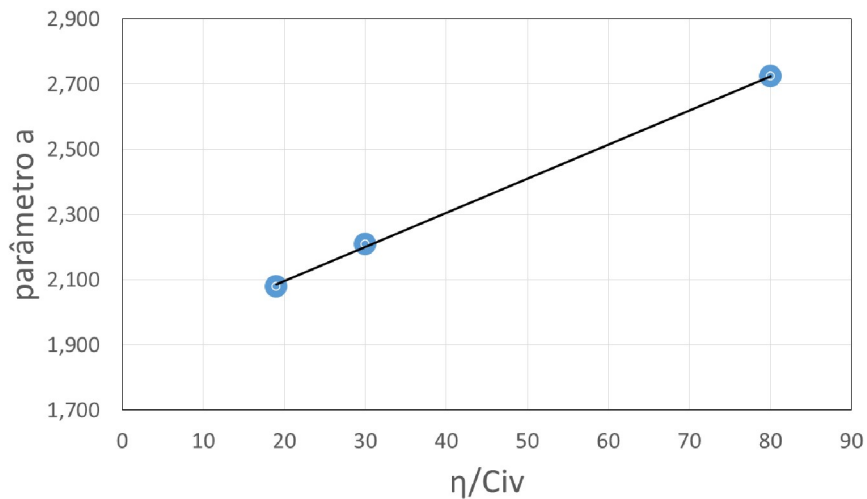
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Ajuste da tabela 5

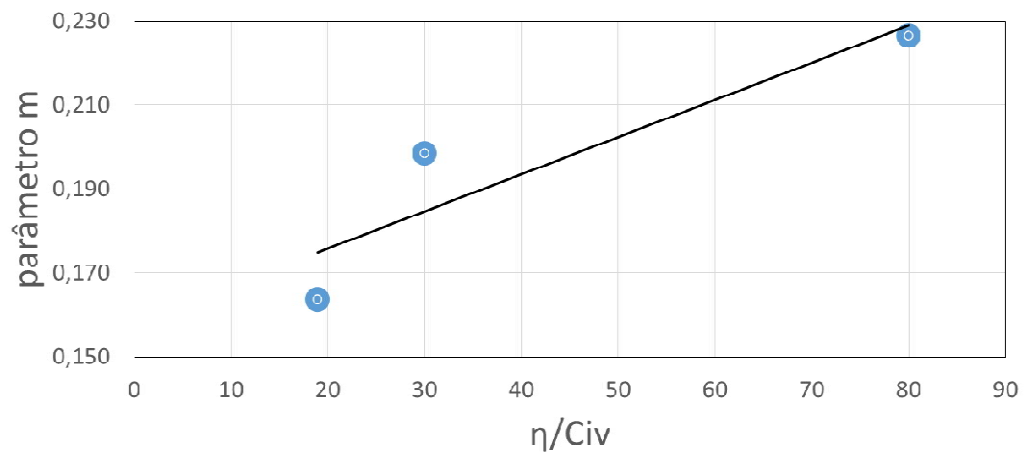


(fonte: elaborado pelo autor)

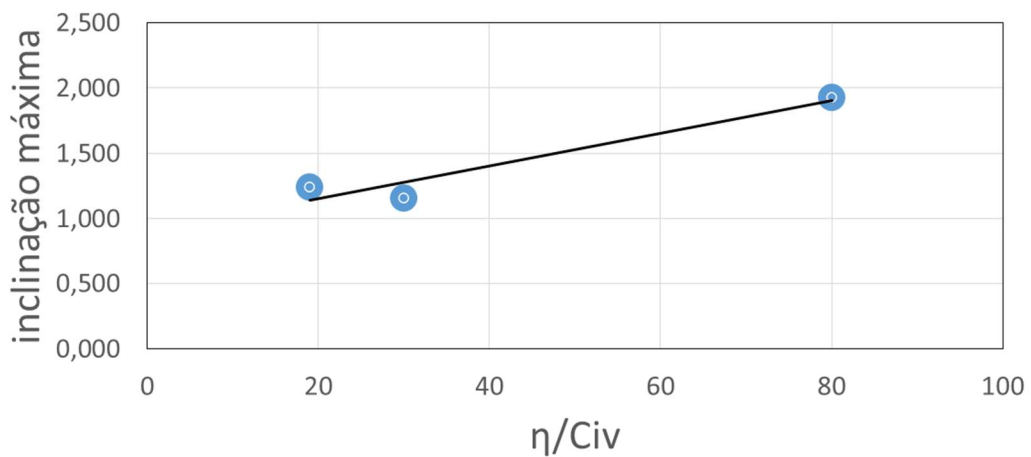
Tendo em vista o ajuste não adequado da equação de Fredlund e Xing (1994) para $\eta/C_{iv} = 9$, não será feita nenhuma análise com esta curva. Nas figuras 17 a 19 estão as relações obtidas através da análise dos parâmetros da curva com a relação η/C_{iv} .

Figura 17 – Relação parâmetro a x η/C_{iv} 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Relação parâmetro m x η/C_{iv} 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Relação parâmetro *inclinação máxima* x η/C_{iv} 

(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se um aumento do parâmetro a , do parâmetro m e da inclinação máxima em função do aumento de η/C_{iv} .

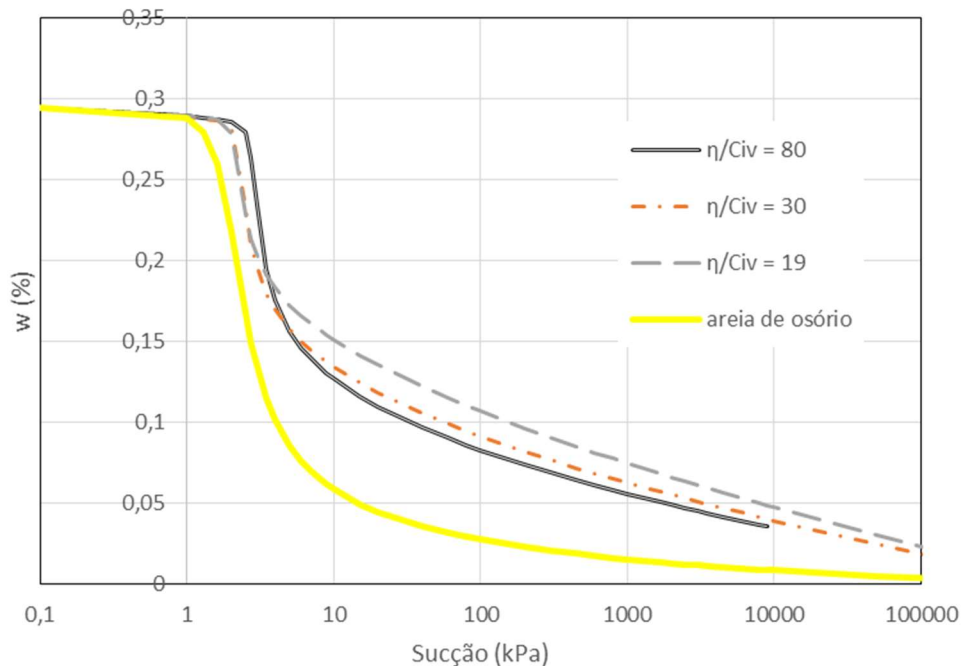
Através do trabalho de Fredlund et al. (1996) foi possível obter uma curva características teórica para a areia de osório, sem cimento. Os parâmetros obtidos estão na tabela 6 e a comparação com os solos melhorados com cimento está na figura 20.

Tabela 6 – Dados de ajuste para a areia de Osório

Areia de osório	
Fredlund e Xing (1994)	
AEV (kPa)	1,800
n	5,700
m	0,670
ψ_r	5,500
AEV (kPa)	1,350
Inclinação máxima	0,830

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Comparação da CCSA de areia de Osório com os dados da tabela 5



(fonte: elaborado pelo autor)

No trabalho de Al Shenawy et al. (2016) há uma tendência de aumento do valor de entrada de ar (VEA) e da sucção residual conforme o aumento do teor de cimento. Em comparação com os dados deste trabalho não se percebe mudanças no VEA, porém percebe-se um ligeiro acréscimo da sucção residual com o aumento da quantidade de teor cimentante.

Do trabalho de Aldaood et al. (2014) percebe-se que com um aumento do teor do agente cimentante há uma diminuição no parâmetro m , o mesmo que foi observado neste estudo.

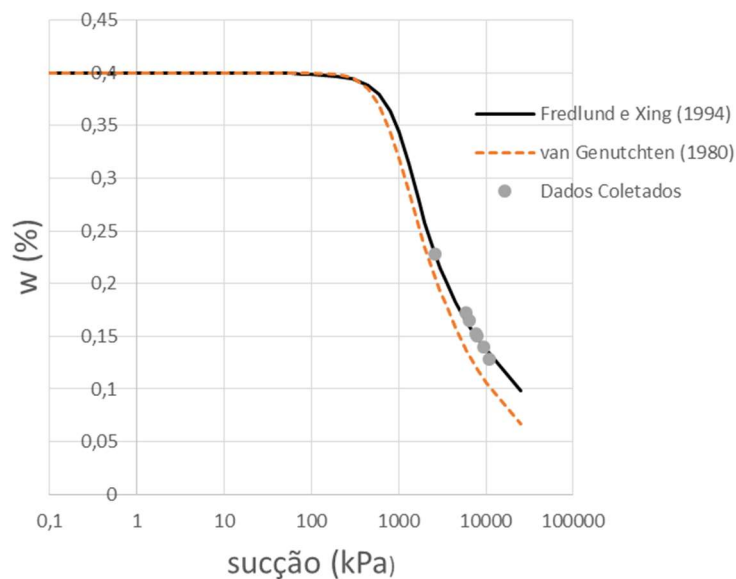
Os trabalho de Suazo(2016) e Al Shenawy et al. (2016) trazem a influência do tempo de cura nas curvas características, sendo utilizado acetona para interromper o processo de cimentação. No presente trabalho não foi utilizado do recurso para interromper a cimentação, o que pode ter influenciado nos parâmetros obtidos nas curvas.

Heshmati e Mothari (2012), Zhai e Rahardjo(2013) e Malaya e Sreedeeep(2012) concordam que existe bastante influência dos parâmetros de ajuste da curva relacionados com parâmetros específicos do solos, contudo essa relação não é tão bem compreendida. Os autores estudados concordam que são necessários mais estudos para uma melhor compreensão da influência dos parâmetros do solo nos parâmetros da curva característica.

Os dados coletados a partir dos ensaios feitos com caulim e cimento tiveram problema, a imersão dos corpos-de-prova não se mostrou eficiente para atingir maiores saturações. As umidades de ruptura dos corpos-de-prova variaram de 19 a 22%, não sendo o suficiente para atingir pontos necessários para o melhor ajuste da curva, como por exemplo próximos da saturação.

A figura 21 mostra como exemplo um ajuste feito com alguns dados coletados, a partir das equações 4 e 5. São pontos que se encontram somente na faixa da sucção residual, não sendo possível determinar corretamente uma curva confiável, com dados na curva de transição e perto do valor de entrada de ar.

Figura 21 – Exemplo de ajuste feito a partir dos dados de caulim-cimento.



(fonte: elaborado pelo autor)

7 CONCLUSÕES

A partir do programa experimental e da análise dos resultados, são apresentadas as conclusões neste capítulo. Também serão feitas sugestões para trabalhos futuros.

7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) mostrou-se adequada para avaliação da resistência nas misturas.

O estudo mostra que não há tendência aparente de ganho na resistência por conta da sucção. Os dados, contudo, são dispersos e necessitam mais ensaios para uma melhor avaliação.

7.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA O SISTEMA SOLO-ÁGUA

Foram ajustadas diversas curvas através das equações de Fredlund (1994) e Van Genuchten (1980). Apesar de diversos ajustes apresentarem uma correlação satisfatória ($R^2 > 0,98$), será necessário a realização de mais ensaios para o melhor entendimento e ajuste das curvas.

O método de adição de água no sexto dia de cura funcionou corretamente para as amostras de areia de Osório-cimento e não funcionando para as de caulim-cimento. Foi verificada a necessidade de refazer alguns corpos-de-prova para um melhor ajuste das curvas.

Notou-se que, apesar do método de adição de água para o controle da sucção se mostrar adequado, ainda faltam valores de sucção que se encontram antes do VEA e valores que se encontram depois da sucção residual, isto pode ser devido à compactação do material e ao problema de se atingir a saturação total pelo método de imersão.

Percebe-se um ligeiro aumento do valor de entrada de ar (VEA), conforme o aumento do teor de cimento. Porém, se percebe o oposto quando analisado o parâmetro α , que é o relacionado ao VEA.

Nota-se uma relação entre os parâmetros de ajuste a , m e *inclinação máxima* da curva característica e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento η/C_{IV} , sendo necessário mais estudos para o melhor entendimento e melhores ajustes para as curvas.

É necessário montar uma CCSA para a areia de Osório compactada para uma melhor comparação entre os dados, já que a curva apresentada neste trabalho foi obtida através de relações com a curva granulométrica.

7.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões, para a ampliação de conhecimento e o prosseguimento sobre os estudos das curvas características para solos artificialmente cimentados em futuros trabalhos, são dadas a seguir:

- a) realizar ensaios para a obtenção da curva característica da areia de Osório sem cimentação;
- b) repetição dos ensaios com uma gama maior de dados (mínimo 6) para um melhor ajuste da curva;
- c) utilizar um agente para interromper a cimentação, acetona por exemplo, e não influenciar nos ajustes das curvas;
- d) avaliar o efeito de maiores tempos de cura nas curvas;
- e) realizar ensaios com diferentes umidades de moldagem.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298-10**: standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. Conshohocken, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6457**: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 12025**: solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12051**: solo – determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos. Rio de Janeiro, 1991

_____. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ALDAOOD, A; BOUASKER, M.; AL-MUKHTAR, M. Soil-water characteristic curve of lime treated gypseous soil. **Applied Clay Science**, v. 102, p. 128-138, December 1998

AL SHENAWY, A. O.; AL-HADAMA, S. H.; ELKADY, T.Y.. Evaluation of Soil-Water Characteristic Curves of sand-cement mixture. In: Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils, 6th, 2015 GUILIN. **Proceedings...** Guilin: [s. n.], p. 543-546, 2016

BARBOUR, S. L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 5, p. 873-894, 1998

BOSCH, D. R. **Interpretação do ensaio pressiométrico em solos coesivo-friccionais através de métodos analíticos**. 1996. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CHILDS, E. C. The use of soils moisture characteristics in soil studies. **Journal of Soil Science**, v. 50, n. 4, p. 239-252, 1940

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented sands under static loading. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York: ASCE, v. 107, n. GT6, p. 799-817, June 1981.

COOP, M. R.; ATKINSON, J. H. The mechanics of cemented carbonate sands. **Geotechnique**, London, v. 43, n. 1, p. 53-67, July 1993.

CORTE, M. B. **Misturas solo-cal-fibra: comportamento mecânico à compressão e tração**. 2013. 70 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CONSOLI, N.C.; CRUZ R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Key parameters for Strength Control of Artificially Cemented SOils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 132, p. 197-205, February 2007.

CONSOLI, N.C.; CRUZ R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 136, p. 759-763, 2010.

CONSOLI, N.C.; CRUZ R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. A practical methodology for the determination of failure envelopes of fiber-reinforced cemented sands. **Geotextiles and Geomembranes**, Institute of Civil Engineers, v. 41, p. 50-54, July 2013a.

CONSOLI, N.C.; de MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York: ASCE, v. 25, n. 10, p. 1568-1573, October 2013b.

CONSOLI, N.C.; CRUZ R. C.; FONSECA, A. V.; COOP, M. R. Influence of Cement-Voids Ratio on Stress-Dilatancy Behavior of Artificially Cemented Sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 138, n. 1, p. 100-109, January 2012.

DUPAS, Jean-Michel; PECKER, Alain. Static and dynamic properties of sand-cement. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 105, n.3, p. 419-436, 1979.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introduction to fluid mechanics**. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.

FREDLUND, D. G. Use of soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3RD, 2002 RECIFE. **Proceedings...** Recife: [s. n.], 2002. p. 20-23.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 103, n. GT5, May 1977.

- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soils mechanics in engineering practice**. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G.; WILSON, G. W. Estimation of unsaturated soil properties using a knowledge-based system. In: CONGRESS ON COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING, 4th, 1997 Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: Citeseer, 1997, p. 16-18.
- FREDLUND, Delwyn G.; XING; Anqing. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994.
- GARDNER, W. R. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soil. **Highway Research Board Special Report**, n. 40, 1980
- HESHMATI, A. A.; MOTHARI, M. R. Identification of key parameters on Soil Water Characteristic Curve. **Life Science Journal**, New York: ASCE, v. 9, n. 3, p. 1532-1537, 2012.
- HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N.; WAGNER, A. M. Laboratory filter paper suction measurement. **Geotechnical Testing Journal**, Conshohocken: ASTM, v. 17, n. 2, p. 185-194, 1994.
- HOYOS, L. R.; THUDI, H. R.; PUPPALA, A. J. Soil-water retention properties of cement treated clay. In: **Proceedings of Sessions of Geo-Denver**, p. 4-11, 2007.
- HUANG, J. T.; AIREY, D. W. Effects of cement and density on an artificially cemented sand. In: GEOTECHNICAL ENGINEERING OF SOFT ROCKS-HARD SOIL, 1993 Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, v. 1, p. 553-560, 1993.
- LADE, P. V.; OVERTON, D. D. Cementation effects in frictional materials. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York: ASCE, v. 115, n. 10, p. 1373-1387, Oct. 1989.
- LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 123, n. 12, p. 1106-1117, December 1997.
- MALAYA, C.; SREEDEPP, S. Critical Review on the Parameters Influencing Soil-Water Characteristic Curve. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York: ASCE, v. 138, p. 55-62, January 2012.
- MARINHO, F. A. M. **Shrinkage behaviour of some plastic soils**. 1994. 216 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Faculty of Engineering, University of London, London, 1994.
- MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma areia artificialmente cimentada até altas tensões de confinamento**. 2016. 379 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SAXENA, S. K.; LASTRICO, R. M. Static properties of lightly cemented sand. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York: ASCE, v. 104, n. 12, p. 1449-1464, Dec. 1978.

SPINELLI, L. F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. 1999. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SUAZO, G.; FOURIE, A.; DOHERTY, J. Experimental Study of the Evolution of the Soil Water Retention Curve for Granular Material Undergoing Cement Hydratation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v. 142, n. 7, March 2016.

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.

VIEIRA, N.; FONSECA, A. V.; CORREIA, A. G. **Influência da estrutura induzida pela compactação na deformabilidade de um saibro granítico**. [s. l.; s.n.], 2006.

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**. 2008. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

YANG, H.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C.; FREDLUND, D. G. Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of Sandy soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 41, n. 5, p. 908-920, 2004.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H. Quantification of uncertainties in soil-water characteristic curve associated with fitting parameters. **Engineering Geology**, v. 163, p. 144-152, June 2013.