



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTE E
GESTÃO TERRITORIAL

Aline Albernaz da Silva de Brito

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADA DE UM
SOLO RESIDUAL DE SIENITO: DOMO DE LAGES/SC**

FLORIANÓPOLIS

2021

Aline Albernaz da Silva de Brito

**Título: ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADA DE
UM SOLO RESIDUAL DE SIENITO: DOMO DE LAGES/SC**

Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação da
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de mestre em engenharia de transporte e gestão
territorial.

Orientador: Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Brito, Aline Albernaz da Silva de
Estudo da resistência ao cisalhamento não saturada de
um solo residual de sienito: Domo de Lages/SC / Aline
Albernaz da Silva de Brito ; orientador, Orlando Martini
de Oliveira, 2021.
101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, , Programa de Pós-Graduação em , Florianópolis,
2021.

Inclui referências.

1. . 2. Solos não saturados. 3. Resistência ao
cisalhamento. 4. Curva de retenção. 5. Solo residual de
Sienito. I. Oliveira, Orlando Martini de . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em . III. Título.

Aline Albernaz da Silva de Brito

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADA DE SOLOS
RESIDUAIS DE SIENITO: DOMO DE LAGES/SC**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Gracieli Dienstmann, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Murilo da Silva Espindola, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Transporte e Gestão Territorial.

Prof. Dr.^a Ana Maria Benciveni Franzoni
Coordenadora do Programa

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira
Orientador

Florianópolis, 9 de dezembro de 2021.

Este trabalho é dedicado ao meu esposo Uallas e à minha filha Alice.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus porque sem ele nada sou. Aos meus pais Manoel e Noêmia por apoiar as minhas escolhas. Ao meu esposo Uallas Henrique pelo incentivo e por acreditar que sou capaz até quando eu mesma duvido.

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram e fizeram parte desta jornada. Em especial à Tamires Nedel, Cândida Bernardi, Camilla Maria Torres, Ângela Grando, Gabryel Gomercindo e Caroline Christ, por dedicarem um pouco do seu tempo e compartilharem conhecimento.

Ao Prof. Orlando Martini de Oliveira, pela orientação, pelos conhecimentos compartilhados e pela dedicação para a conclusão deste trabalho.

À banca examinadora, pelas contribuições ao trabalho.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas.” (Carl Sagan)

RESUMO

A presente dissertação investiga a relação da resistência ao cisalhamento com as propriedades de retenção de água de solo residual compactado no estado não saturado. Foi utilizado um solo residual de Sienito coletado na região do Domo de Lages/SC. Os ensaios de caracterização permitiram definir a curva granulométrica, os limites de Atterberg e a densidade dos grãos. Da curva de compactação, obtida com a energia do Proctor normal, foram escolhidos três pontos de estudo associados ao teor de umidade ótima, ramo seco e ramo úmido. Para estas três condições de moldagem foram determinadas as curvas de retenção de água e realizados ensaios de compressão simples com imposição de uma sucção inicial e de cisalhamento direto inundado. As curvas de retenção de água do solo foram realizadas com a utilização da técnica do papel filtro por contato, na qual, para cada ponto de estudo foram moldados corpos de prova posteriormente umedecidos até quase saturados e gradativamente secados de forma a apresentarem diferentes valores de sucção. Aos pontos experimentais destas curvas de retenção foram aplicados os ajustes propostos por Fredlund e Xing (1994). Juntamente com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto inundados, foram definidos os interceptos de coesão para os três pontos de estudo. Dentre os interceptos de coesão, o da condição Ramo Seco apresentou menor resistência ao cisalhamento, em contrapartida, o Ramo Úmido forneceu maior valor de resistência ao cisalhamento para o mesmo valor de sucção. Os valores de resistência ao cisalhamento crescem no Ramo Seco até a 64 kPa que equivale a 24% na Umidade volumétrica, depois os valores tendem a diminuir. Na umidade ótima os valores de resistência ao cisalhamento chegam a 128kPa, correspondente a 24% de umidade volumétrica e depois apresenta tendência a estabilizar. Enquanto no Ramo Úmido, a resistência ao cisalhamento chega a valores de 141kPa, correspondente a 20% de umidade volumétrica e apresenta tendência a diminuir. Estes valores de sucção correspondem aproximadamente ao ponto de inflexão da curva de retenção. Foram aplicados três modelos para previsão da resistência ao cisalhamento: Vanapalli et al (1996), Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006). De modo geral, destaca-se que nenhum dos modelos aplicados foi capaz de descrever com eficiência o comportamento de resistência ao cisalhamento do solo estudado.

Palavras-chave: Solos não saturados. Resistência ao cisalhamento. Sucção. Curva de retenção. Solo residual de Sienito.

ABSTRACT

This thesis investigates the link between shear strength and water retention properties of compacted residual soil in the unsaturated state. A residual syenite soil found in the Domo de Lages region, located in the Brazilian state of Santa Catarina, was used. The characterization tests allowed to define the particle size curve, the Atterberg limits and the grain density. From the compaction curve, obtained with the energy of the standard proctor, three study points were chosen, associated with the optimum moisture content, dry side and wet side. For these three molding conditions, the water retention curves were determined and simple compression tests were carried out with the imposition of an initial suction and direct flooded shear. The soil water retention curves were performed using the contact filter paper technique, and for each study point, specimens were molded and subsequently moistened until almost saturated and gradually dried in order to present different suction values. The adjustments proposed by Fredlund and Xing (1994) were applied to the experimental points of these retention curves. Together with the results of the direct flooding shear tests, the cohesion intercepts for the three study points were defined. Among the cohesion intercepts, the dry side condition presented lower shear strength, on the other hand, the Wet Side provided higher shear strength value for the same suction value. Shear strength values increase in dry side up to 64 kPa which equates to 24% in volumetric humidity, then the values tend to decrease. At optimum moisture, shear strength values reach 128kPa corresponding to 24% volumetric moisture and then tends to stabilize. In the Wet Side, the shear strength reaches values of 141kPa corresponding to 20% of the volumetric humidity and shows a tendency to decrease. These suction values approximately correspond to the inflection point of the retention curve. Three models were applied to predict the shear strength: Vanapalli et al (1996), Khalili and Khabbaz (1998) and Vilar (2006). In general, none of the applied models were able to efficiently describe the shear strength behavior of the studied soil.

Keywords: Unsaturated soils. Shear strength. Suction. Retention curve. Residual syenite soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Conceito de sucção total, matricial e osmótica	18
Figura 2.2 Tipos de fluxos do solo para o papel filtro.....	20
Figura 2.3 Curvas de calibração para o papel filtro Whatman n°42	21
Figura 2.4 Curva de retenção.....	22
Figura 2.5 Curva de retenção de água do solo do tipo bimodal.	23
Figura 2.6 Representação da curva de retenção para diferentes tipos de solo.....	26
Figura 2.7 Curva de retenção de água para diferentes tipos de solo	26
Figura 2.8 Curva de retenção de água obtida por amostras de solo compactadas com diferentes teores de umidades.....	27
Figura 2.9 Curva de retenção obtida por amostras compactadas em diferentes umidades	28
Figura 2.10 Variação do valor da sucção no ramo seco submetido a diferentes pressões confinantes.....	29
Figura 2.11 Variação do valor da sucção no ramo úmido submetido a diferentes pressões confinantes.....	29
Figura 2.12 Determinação dos Interceptos de coesão	30
Figura 2.13 Obtenção do intercepto de coesão	31
Figura 2.14 Parâmetro de correlação κ	33
Figura 2.15 Determinação gráfica do valor de χ	34
Figura 2.16 Relação entre χ e sucção matricial.....	35
Figura 2.17 Variação de χ em função da sucção normalizada em relação à entrada de ar	35
Figura 3.1 Fluxograma da metodologia adotada	39
Figura 3.2 Mapa geológico da região domo de Lages.....	40
Figura 3.3 Local de coleta da amostra	41
Figura 3.4 Rocha Sienito em processo de alteração	42
Figura 3.5 Processo de coleta do material	42
Figura 3.6 Preparação do solo sienito para os ensaios	44
Figura 3.7 Ensaio para determinação do limite de liquidez	45
Figura 3.8 Ensaio para determinação do limite de plasticidade	45
Figura 3.9 Realização do ensaio para determinação da massa específica dos grãos.....	46
Figura 3.10 Ensaio de compactação	47
Figura 3.11 Molde cilíndrico tripartido	48

Figura 3.12 Ensaio cisalhamento direto inundado.	50
Figura 4.1 Curva granulométrica do solo residual sienito.....	51
Figura 4.2 Classificação do solo residual de sienito na carta de plasticidade de Casagrande..	52
Figura 4.3 Curva de compactação do solo residual de Sienito.....	53
Figura 4.4 Pontos experimentais do Grau de Saturação x Sucção, Umidade Volumétrica x Sucção e Índice de vazios x Sucção para os corpos de prova nas 3 condições de moldagem.	56
Figura 4.5 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para a curva de retenção na condição de moldagem Ramo Seco.....	57
Figura 4.6 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para a curva de retenção na condição de moldagem Umidade Ótima	58
Figura 4.7 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para a curva de retenção na condição de moldagem Ramo Úmido	58
Figura 4.8 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para as curvas de retenção nas condições de moldagem Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido.....	60
Figura 4.9 Curvas de tensão cisalhante e deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal para as 3 condições de moldagem	61
Figura 4.10 Tensão Cisalhante X Tensão Normal do Ramo Seco	62
Figura 4.11 Tensão Cisalhante X Tensão Normal da Umidade Ótima	63
Figura 4.12 Tensão Cisalhante X Tensão Normal do Ramo Úmido.....	64
Figura 4.13 Tensão cisalhante em função da tensão normal para as 3 condições de moldagem	65
Figura 4.14 Intercepto de coesão <i>versus</i> Sucção para o solo moldado no Ramo Seco	66
Figura 4.15 Intercepto de coesão <i>versus</i> Sucção para o solo moldado na Umidade Ótima	67
Figura 4.16 Intercepto de coesão <i>versus</i> Sucção para o solo moldado no Ramo Úmido.....	67
Figura 4.17 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as condições de moldagem no Ramo Seco.	69
Figura 4.18 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as condições de moldagem na Umidade Ótima.	70
Figura 4.19 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as condições de moldagem no Ramo Úmido.....	71
Figura 4.20 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as três condições de moldagem em estudo.	72
Figura 4.21 Módulo de elasticidade e deformação específica em função da sucção dos corpos de prova moldados no Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido.	77

Figura 4.22 Tensão axial versus deformação específica para o solo moldado no Ramo seco.	78
Figura 4.23 Tensão axial versus deformação específica para o solo moldado na Umidade Ótima.	78
Figura 4.24 Tensão axial versus deformação específica para o solo moldado no Ramo Úmido.	79
Figura 4.25 Formas de ruptura dos corpos de prova moldados na condição do ramo seco: (a) Ruptura longitudinal, (b) Transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas, (c) Ruptura de cisalhamento Simples.	80
Figura 4.26 Formas de ruptura dos corpos de prova moldados na condição Umidade Ótima; (a) Transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas, (b) Ruptura longitudinal, (c) Ruptura de cisalhamento Simples.	81
Figura 4.27 Formas de ruptura dos corpos de prova moldados na condição Ramo Úmido; (a) Transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas, (b) Ruptura de cisalhamento Simples.	81
Figura 4.28 Aplicação do modelo de Vanapalli et al (1996) para o solo moldado no Ramo Seco	82
Figura 4.29 Aplicação do modelo de Vanapalli et al (1996) para o solo moldado na Umidade Ótima	83
Figura 4.30 Aplicação do modelo de Vanapalli et al (1996) para o solo moldado no Ramo Úmido	83
Figura 4.31 Aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para o solo moldado no Ramo Seco	84
Figura 4.32 Aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para o solo moldado na Umidade Ótima	85
Figura 4.33 Aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para o solo moldado no Ramo Úmido	85
Figura 4.34 Aplicação do modelo de Vilar (2006) para o solo moldado no Ramo Seco	86
Figura 4.35 Aplicação do modelo de Vilar (2006) para o solo moldado na Umidade Ótima	87
Figura 4.36 Aplicação do modelo de Vilar (2006) para o solo moldado no Ramo Úmido	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Técnicas para medir a sucção	18
Tabela 2.2 Equações empíricas para ajuste dos dados da curva de retenção de água do solo unimodal em formato S.	24
Tabela 4.1 Resumo dos ensaios de caracterização	52
Tabela 4.2 Condições de moldagem dos 3 pontos de estudo desta pesquisa.	53
Tabela 4.3 Dados de moldagem dos corpos de prova utilizados para determinação da curva de retenção.....	54
Tabela 4.4 Dados experimentais das curvas de retenção obtidas para os 3 pontos de estudo..	55
Tabela 4.5 Parâmetros característicos do ajuste da curva de retenção por Fredlund e Xing (1994)	57
Tabela 4.6 Sucção do início de entrada de ar e sucção de entrada de ar generalizada das curvas de retenção dos 3 pontos de estudo.	59
Tabela 4.7 Resultado cisalhamento direto para o Ramo Seco.....	62
Tabela 4.8 Resultado do ensaio de cisalhamento direto para as condições de moldagem na umidade ótima	63
Tabela 4.9 Resultado cisalhamento direto para o Ramo Úmido	64
Tabela 4.10 Resultado dos ensaios de cisalhamento direto.....	65
Tabela 4.11 Dados de moldagem e preparação dos CPs no Ramo Seco para ensaio de compressão Simples com Sucção.	73
Tabela 4.12 Dados de moldagem e preparação dos CPs na Umidade Ótima para ensaio de compressão Simples com Sucção.	74
Tabela 4.13 Dados de moldagem e preparação dos CPs no Ramo Úmido para ensaio de compressão Simples com Sucção	74
Tabela 4.14 Resultado do ensaio de compressão Simples dos CPs no Ramo Seco	75
Tabela 4.15 Resultado do ensaio de compressão Simples dos CPs moldados nas condições da Umidade Ótima	75
Tabela 4.16 Resultado do ensaio de compressão Simples dos CPs no Ramo Úmido.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CRAS – Curva de Retenção de Água no Solo

CP – Corpo de prova

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras

PPGTG – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

a, n, m	Parâmetros de ajuste da equação da equação Fredlund e Xing (1994)
a, b	Parâmetros de ajuste da equação Khalili e Khabbaz (1998)
c	Intercepto de coesão
c'	Coesão efetiva
C_{ult}	Intercepto de coesão do valor de resistência atingido pelo solo seco ao ar
C_m	Intercepto de coesão máxima
$C(\psi)$	Fator de correção da equação de Fredlund e Xing (1994)
e	Índice de vazios
E	Módulo de elasticidade
S	Grau de saturação
u_a	Poropressão do ar
u_w	Poropressão da água
$(u_a - u_w)_b$	Sucção de entrada de ar generalizada
$(u_a - u_w)_{res}$	Sucção residual
V	Volume
W	Teor de umidade
W	Teor de umidade gravimétrico
ψ	Sucção
ψ_m	Maior valor de sucção
ψ_a	Sucção de entrada de ar no início da dessaturação
ψ_b	Sucção de entrada de ar generalizada
$\psi_{início}$	Sucção de início de entrada de ar
κ	Parâmetro de ajuste do modelo de previsão de resistência Vanapalli et al (1996)
Θ	Teor de umidade volumétrico normalizada
θ	Teor de umidade volumétrico
θ_s	Teor de umidade volumétrica saturada
θ_r	Teor de umidade volumétrica residual
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
χ	Parâmetro de tensão efetiva em função do grau de saturação
ρ_s	Massa específica dos grãos

ρ_d	Massa específica seca
σ_1	Tensão axial
ε_r	Deformação específica na ruptura
τ	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	SUCÇÃO E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO.....	17
2.1.1	Papel-filtro com contato.....	19
2.2	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DOS SOLOS.....	21
2.2.1	Principais equações para determinar a CRAS	23
2.2.2	Fatores que influenciam na curva de retenção	25
2.2.2.1	Tipo de solo	25
2.2.2.2	Umidade de moldagem.....	27
2.2.2.3	História de tensões.....	28
2.3	INTERCEPTO DE COESÃO	30
2.4	MODELOS DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS	31
2.4.1	Modelo proposto por Vanapalli <i>et al</i> (1996).....	32
2.4.2	Modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998)	33
2.4.3	Modelo proposto por Vilar (2006)	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS.....	39
3.2	LOCAL DE AMOSTRAGEM.....	40
3.3	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO, ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO	43
3.3.1	Preparação da amostra de solo	43
3.3.2	Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação	44

3.3.3	Limites de consistência.....	44
3.3.4	Determinação da massa específica dos grãos do solo.....	46
3.3.5	Determinação da curva de compactação.....	47
3.4	DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	48
3.4.1	Papel filtro.....	48
3.5	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA	49
3.5.1	Cisalhamento direto	49
3.5.2	Compressão simples	50
4	RESULTADOS E ANÁLISES	51
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	51
4.2	CURVA DE COMPACTAÇÃO	52
4.3	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	53
4.4	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA	60
4.4.1	Resistência ao Cisalhamento Direto	60
4.4.2	Intercepto de Coesão	66
4.4.3	Resistência à Compressão Simples	73
4.4.3.1	Modos de Ruptura dos Corpos de Prova	79
4.5	MODELOS DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	81
4.5.1	Método de Vanapalli <i>et al</i> (1996).....	82
4.5.2	Método de Khalili e Khabbaz (1998).....	84
4.5.3	Método de Vilar (2006)	86
5	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Os processos de instabilização de maciços de terra são comuns no Brasil e acarretam questões ambientais, econômicas e sociais, como danos em ecossistemas e perdas de vidas. Alguns acidentes ambientais, de maiores proporções, geram prejuízos que impulsionam as discussões acerca de ações e procedimentos para preveni-los ou mitigá-los.

Em clima tropical, na maior parte do tempo, maciços apresentem o solo na situação não-saturada. No período chuvoso, as ocorrências de acidentes por deslizamento aumentam consideravelmente. Isso porque a presença da água reduz a sucção do solo e por consequência a resistência ao cisalhamento. Deste modo, entender os efeitos hidrodinâmicos na variação da resistência para os diversos tipos de solo, apresenta-se como uma estratégia interessante a ser adotada. Estudar a instabilidade da encosta para representar sua condição real permite compreender a dinâmica envolvida e prevenir os eventos futuros, ou ao menos promover ações rápidas e estratégicas, contribui na tomada de decisão.

O solo no seu estado não saturado apresenta comportamento bastante diferenciado em relação ao estado saturado. A heterogeneidade e particularidade geológica dos solos residuais dificulta a elaboração de um modelo que generalize o seu comportamento. Sabe-se que o comportamento deste tipo de solo é fortemente influenciado pela sua estrutura e características herdadas da rocha matriz. As propriedades do solo irão depender fundamentalmente do grau de intemperismo a que o solo foi submetido.

Ao se tratar de solos compactados, é essencial conhecer o comportamento do solo correspondente a umidade da compactação, pois é através dessa investigação que será possível deixar o maciço de solo com as melhores propriedades. O estudo em solo não saturado demanda tempo. Mas a curva de retenção associada à modelagem permite prever o comportamento do solo, obtendo-se a resistência não saturada de forma rápida e confiável.

Pode-se dizer, contudo, que são pouco comuns os estudos do comportamento mecânico dos solos residuais de sienito. As pesquisas que envolvem a rocha matriz sienito são voltadas para as questões geológicas e mineralógicas. Grande parte das obras de engenharia são feitas em solos não saturados. Nesta condição o solo quando sujeitos a variações de grau de saturação, mudam suas características de estado, podendo expandir, colapsar ou reduzir a sua resistência. Compreender como este solo se comporta em termos de resistência ao cisalhamento

quando em diferentes condições de umidade permitirá apresentar o modelo do seu comportamento para tomada de decisões.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar a correlação entre curvas de retenção e interceptos de coesão para um solo residual de sienito compactado em diferentes umidades.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos estão descritos a seguir:

- Determinar a curva de retenção de água de um solo residual de sienito para diferentes umidades de moldagem;
- Determinar a relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção para as condições de moldagem de estudo;
- Verificar a aplicabilidade de modelos de previsão utilizados para se estimar a relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos aspectos teóricos básicos para o entendimento e desenvolvimento da pesquisa envolvida neste trabalho.

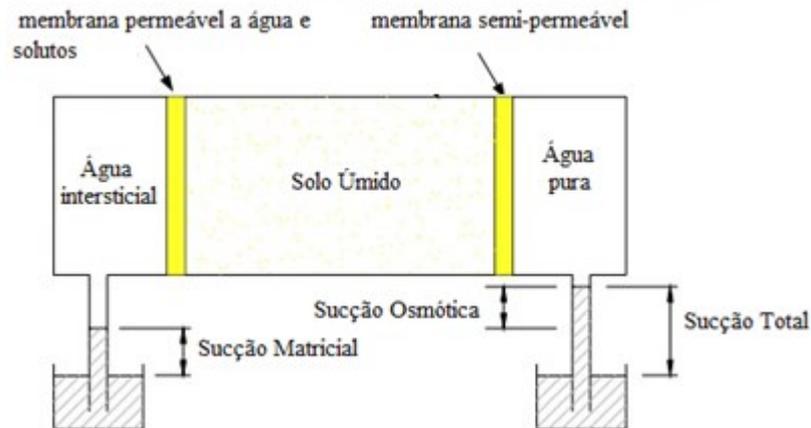
2.1 Sucção e técnicas de medição

A sucção é frequentemente definida como a diferença entre a pressão do ar e a pressão na água. Mas o conceito de sucção vai mais além. Marinho (1994) define que sucção, expressa em kN/m^2 , é a pressão isotrópica imposta pelos poros para absorver mais água. De acordo com Villar (2002), a sucção de um solo é um dos parâmetros mais importante para entender o seu comportamento não saturado, e considera que a sucção é uma quantidade energética para avaliar a sua capacidade de reter água.

A sucção em solos é composta basicamente por duas partes: a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção matricial é associada à matriz do solo, ou seja, a atração da água entre as partículas do solo. Portanto, sucção matricial é a pressão negativa exercida na água intersticial em virtude de forças capilares e de absorção. Já a parcela osmótica é associada à atração da água destilada para a água com sais dissolvidos, ou seja, relaciona-se à concentração de sal no interior da água do solo. A soma destas duas parcelas compõe a sucção total (MARINHO e PEREIRA, 1998).

Marinho (1994) explica utilizando o experimento apresentado na Figura 2.1, o conceito físico de sucção total, mátrica e osmótica. No experimento foi colocado uma membrana semipermeável que permite a passagem apenas da água e não dos solutos, e gera uma pressão que ocorre devido a diferença de concentração química entre a água pura e a água do solo. A diferença de pressão nesse sistema é a representação da sucção total. Por outro lado, sucção mátrica é definida pela diferença de pressão que ocorre através de uma membrana permeável (permite a passagem de água e dos solutos) que separa o sistema solo-água intersticial de uma solução idêntica a água intersticial, mas sem o solo. Já a sucção osmótica é definida pela diferença entre as sucções total e mátrica.

Figura 2.1 Conceito de sucção total, matricial e osmótica



Fonte: Adaptado de Marinho (1997)

Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas técnicas para medir a sucção. Essas técnicas estabelecem uma relação entre a quantidade de água de um meio poroso com a respectiva sucção através de uma função denominada curva de retenção. A Tabela 2.1 cita algumas das técnicas para determinação em laboratório ou em campo e o respectivo tipo de sucção medida.

Tabela 2.1 Técnicas para medir a sucção

Método	Sucção
Tensiômetro	Matricial
Placa de pressão	Matricial
Tensiômetro de alta capacidade	Matricial
Psicrômetros	Total
Papel filtro (com contato)	Matricial
Papel filtro (sem contato)	Total

Fonte: Adaptado de Marinho (1994)

O tensiômetro é utilizado para obter a sucção matricial através da medida direta da energia de retenção de água no solo. O tempo de equilíbrio pode levar alguns minutos e o tempo de resposta depende da condutividade da pedra porosa e a sensibilidade do elemento medido. A diferença entre os métodos utilizando o tensiômetro padrão e o tensiômetro de alta capacidade está na faixa medida de sucção. O tensiômetro padrão mede sucções de até 100kPa, enquanto o tensiômetro de alta capacidade mede sucções de até 1500 kPa.

A placa de pressão usada para medir sucção matricial emprega a técnica de translação de eixos. O tempo de equilíbrio pode levar horas e mede sucções de até 1500kPa. Já o

psicrômetro mede sucção total. Sua aplicação depende de rigoroso controle de temperatura, portanto, é recomendado em laboratório. O tempo de equilíbrio também pode levar horas, medindo sucções de até 8000 kPa.

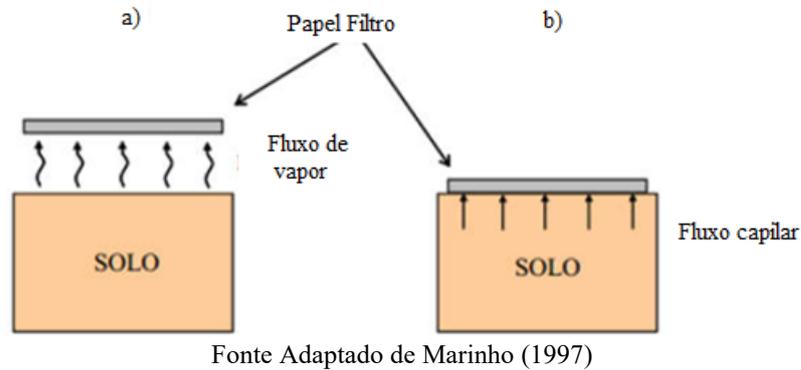
No método do papel-filtro sem contato, o papel não toca o solo. É usual a colocação de um material inerte entre eles para garantir que apenas vapor seja trocado, permitindo medir a sucção total. O método do papel-filtro com contato é amplamente utilizado como instrumento de medição da sucção matricial como foi feito nos estudos de Oliveira e Marinho, (2004); Pecapedra, (2016); Massocco, (2017); Bernardi (2018). A técnica consiste no princípio de absorção de água e equilíbrio de energia entre o solo e o papel que ocorre de 7 a 30 dias. Este método mede sucções de até 30.000kPa, necessita de calibração do papel e pesagem com precisão de 0,0001g.

O método do papel filtro foi escolhido para obtenção da sucção e curva de retenção de água desta pesquisa. A técnica experimental deste método será descrita de forma mais detalhada.

2.1.1 Papel-filtro com contato

A transferência de água para o papel pode ocorrer através de vapor ou por capilaridade. Quando o fluxo de água do sistema ocorre por vapor, será medida a sucção total. Já quando o fluxo se dá por capilaridade será medida a sucção matricial (Figura 2.2). O uso do papel-filtro na determinação da sucção é baseado no princípio de que o contato entre o solo e o papel permite a troca de água até que seja alcançado o equilíbrio. Este equilíbrio é alcançado quando o papel filtro atingir o mesmo valor de sucção do solo. Tendo-se o equilíbrio, a umidade do papel-filtro possibilita a determinação da sucção do solo através da relação com a sua curva de calibração. Quanto menor a umidade absorvida pelo papel, maior é o valor da sucção.

Figura 2.2 Tipos de fluxos do solo para o papel filtro



A curva de calibração ou curva característica do material é obtida através do equilíbrio do papel-filtro imposto a uma sucção conhecida. O papel da marca Whatman N°42 é frequentemente utilizado pois é considerado satisfatório para medida da sucção. Existem várias curvas de calibração disponíveis na literatura, dentre estas, estão apresentadas na Figura 2.3 algumas para o papel filtro Whatman N°42.

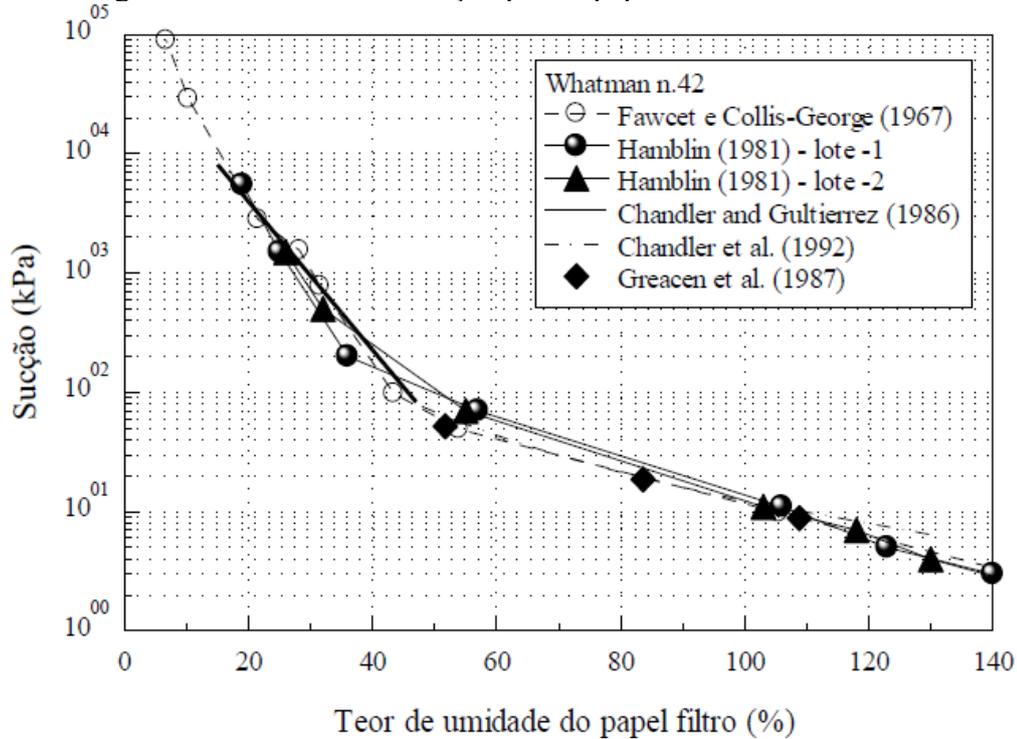
A curva de calibração mais utilizada é a proposta por Chandler et al. (1992), que definiram as equações (1) e (2) para a calibração do papel-filtro Whatman n°42 (MARINHO, 1997).

$$\text{Sucção} = 10^{(4,84 - 0,062w)}, \text{ para } w \leq 47\% \quad (1)$$

$$\text{Sucção} = 10^{(6,05 - 2,48 \log w)}, \text{ para } w > 47\% \quad (2)$$

No qual w é o teor de umidade gravimétrico do papel-filtro.

Figura 2.3 Curvas de calibração para o papel filtro Whatman n°42



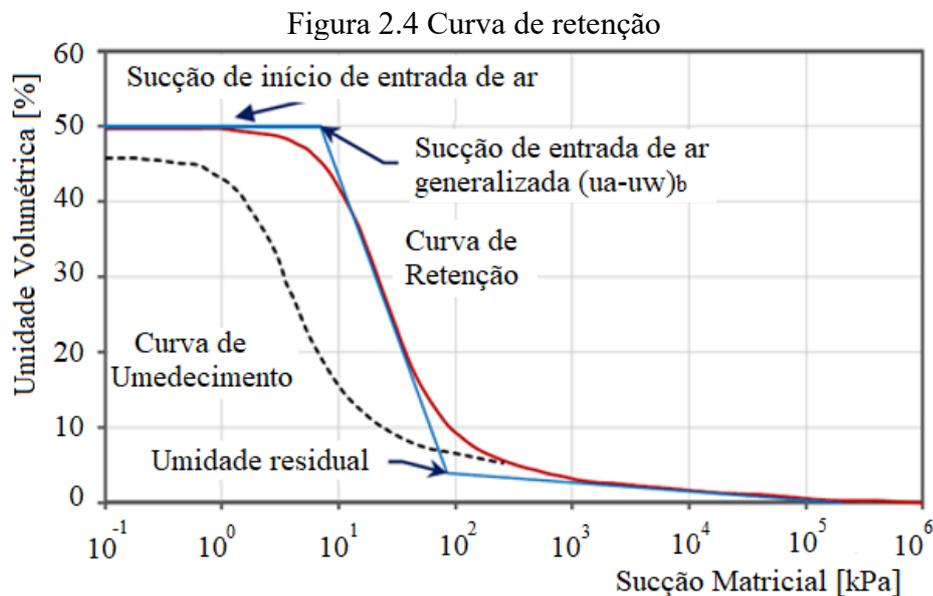
O método do papel-filtro é padronizado pela norma D5298-03 (ASTM, 2003), que dá instruções para a calibração do papel-filtro e descreve o procedimento de medição. Como qualquer outro ensaio de laboratório, o método do papel filtro deve ser executado com cuidado, seguindo as recomendações da norma. Woodburn e Lucas (1995) destacam alguns pontos a serem observados na execução do procedimento que podem levar a resultados errôneos: a variação da temperatura durante todo o processo e a precisão de medição da massa do papel que pode variar rapidamente após a retirada do contato. Villar (2002) descreve detalhadamente a metodologia dos ensaios realizados com o papel filtro.

2.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DOS SOLOS

A curva de retenção de água do solo (CRAS) representa a relação do teor de água no solo com a força que este solo retém a água. Fredlund et al (1994) refere-se à curva de retenção de água do solo como a representação gráfica da capacidade de retenção de água nos macro e microporos do solo com a variação da sucção. Dentre as formas de representação CRAS, existe: grau de saturação em escala linear e sucção em escala logarítmica; teor de umidade volumétrica; grau de saturação e sucção na escala linear; e o grau de saturação efetivo (FREDLUNG, 1995).

A CRAS é um importante instrumento de análise no estudo de solos não saturados. Os parâmetros hidráulicos e a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados podem ser previstos através de diferentes proposições matemáticas com base na curva de retenção (GEHLING, 2004).

A Figura 2.4 mostra uma representação esquemática das CRAS definidas com processo de secagem e umedecimento. A CRAS apresenta trajetória diferente para o mesmo valor de sucção em função da secagem ou umedecimento do solo, o que caracteriza o fenômeno de histerese.

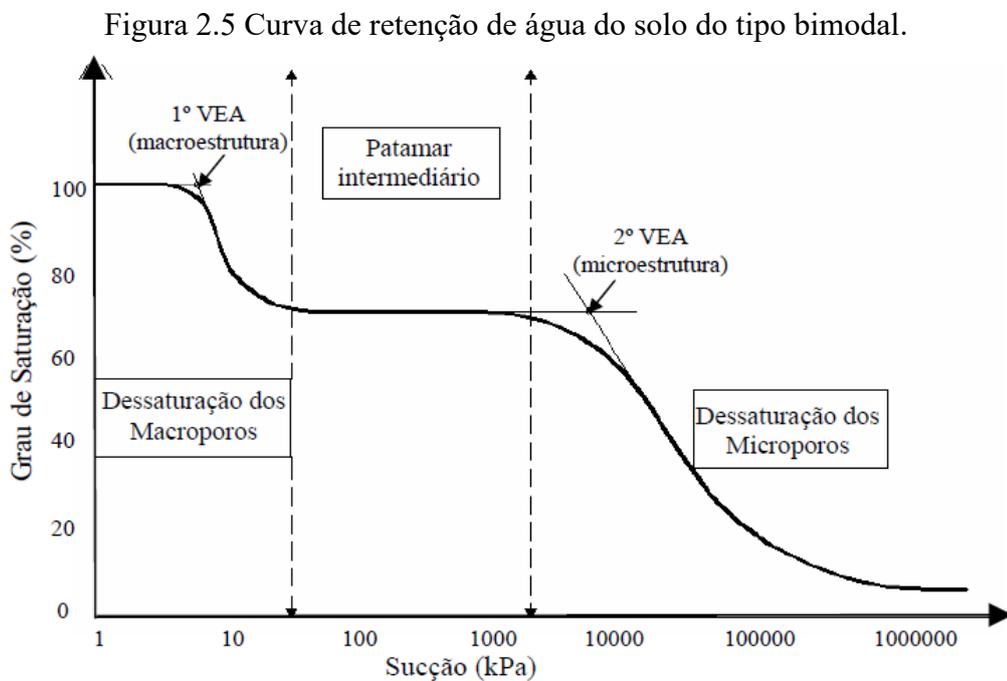


O primeiro trecho da curva (zona saturada) é delimitado pelo ponto $(u_a - u_w)_b$ que corresponde ao valor de entrada de ar na estrutura do solo. No trecho que antecede o ponto de entrada de ar, o material encontra-se completamente saturado, mesmo que apresente um determinado valor de sucção matricial. O segundo trecho (zona de dessaturação) tem início logo após o ponto de máxima sucção que os poros são capazes de suportar sem drenar e estende-se à sucção residual $(u_a - u_w)_{res}$. Neste segundo intervalo, o solo sofre drenagem devido ao aumento da sucção, condição em que a água se encontra livre nos poros. Após atingir a sucção residual inicia-se a zona residual. A drenagem agora exige sucção elevada, portanto, ocorre predominantemente em forma de vapor.

Fredlund e Xing (1994) indicam a determinação gráfica da sucção equivalente à entrada de ar e o valor da umidade volumétrica residual. A entrada de ar é definida pela interseção da reta horizontal, no trecho de estado saturado, com a reta tangente ao ponto de

inflexão da curva. A umidade residual é definida pela interseção da reta tangente ao ponto de inflexão com a reta que passa pelo ponto com valor de sucção 10^6 kPa.

A CRAS pode apresentar formato unimodal em forma de “S”, como apresentado na Figura 2.4, mas também pode ter formato bimodal com forma de “Duplo S”, como apresentado na Figura 2.5. A curva unimodal apresenta três estágios de dessaturação: o estágio de efeito limite de entrada de ar, o estágio de transição e o estágio residual. Na curva bimodal, os três estágios de dessaturação são: estágio de dessaturação dos macroporos, patamar intermediário e estágio de dessaturação dos microporos (Feuerharmel et al, 2005).



2.2.1 Principais equações para determinar a CRAS

A CRAS pode ser representada por relações empíricas que se ajustam aos valores experimentais da curva. A Tabela 2.2 apresenta algumas equações aplicadas a dados da curva unimodal.

Tabela 2.2 Equações empíricas para ajuste dos dados da curva de retenção de água do solo unimodal em formato S.

Autores	Ano	Equação	Parâmetros
Gardner	1958	$\Theta = \frac{1}{1 + \alpha\psi^n}$	α Parâmetro do solo em função do valor de entrada de ar n parâmetro em função da taxa de extração de água do solo
Brooks e Corey	1964	$\Theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda; \Theta \leq 1$	ψ_b Sucção correspondente à entrada de ar ψ Sucção matricial λ Parâmetro obtido graficamente
Brutsaert	1967	$\Theta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n}$	ψ Sucção matricial a Parâmetro do solo em função do valor de entrada de ar n parâmetro em função da taxa de extração de água do solo
Van Genuchten	1980	$\Theta = \left(\frac{1}{1 + \alpha\psi^n}\right)^m$	ψ Sucção matricial a Parâmetro do solo em função do valor de entrada de ar(1/kPa) n parâmetro em função da taxa de extração de água do solo m parâmetro em função do teor de umidade
Fredlund e Xing	1994	$\Theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n \right]^m}$	ψ Sucção matricial θ_s Umidade volumétrica da saturação a, m e n Parâmetros de ajuste

Moura et al (2017) realizaram levantamento de 50 curvas de retenção de água de solos não saturados que foram ajustadas por modelos propostos por Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980), Williams et al (1983), Fredlund e Xing (1994) e Marinho (1994). Os parâmetros de ajuste dos modelos foram determinados pela minoração do erro entre as

curvas experimentais e as curvas previstas de forma iterativa. Os autores compararam as curvas de retenção experimentais de alguns solos com a curvas estimadas pelos modelos de ajuste. Contudo, concluíram que os modelos de Willians et al (1983), Brooks e Corey (1964), Fredlund e Xing (1994) e Gardner (1958) proporcionaram, dentre todos os modelos analisados, o melhor ajuste.

De acordo com Almeida (2016), os modelos propostos por Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) são considerados os mais difundidos para relacionar o conteúdo de água no solo com a sucção. O autor estudou a influência da constante dielétrica na resistência ao cisalhamento de um solo residual de granulito-gnaiss de predominância argilosa. Utilizou diferentes técnicas para determinar a curva de retenção de água do solo (tensiômetro, placa de pressão, câmara multifásica e papel filtro). Para ajustar a curva de retenção utilizou a equação proposta por Fredlund e Xing (1994).

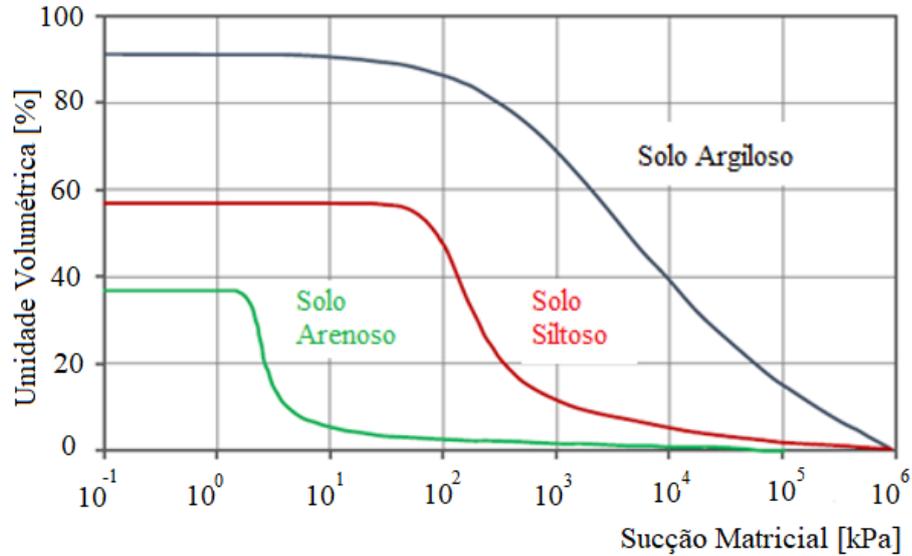
Como afirma Vanapalli (1994), não existe uma equação desenvolvida com embasamento teórico considerado adequado para todos os solos em todas as faixas de sucção. Para este estudo, optou-se por aplicar as equações propostas por Fredlund e Xing (1994). Nesta proposta, o termo $C(\psi)$ faz com que a curva de retenção apresente sucção 10^6 kPa aos valores de grau de saturação próximo de zero. Os parâmetros “a”, “n” e “m” influenciam no formato da curva. O parâmetro “a” altera o valor da sucção de entrada de ar, o parâmetro “n” faz com que a curva gire em torno do ponto de inflexão e o parâmetro “m” influencia nos valores elevados de sucção, no qual o aumento de “m” faz com que a curva se aproxime do eixo das abscissas.

2.2.2 Fatores que influenciam na curva de retenção

2.2.2.1 Tipo de solo

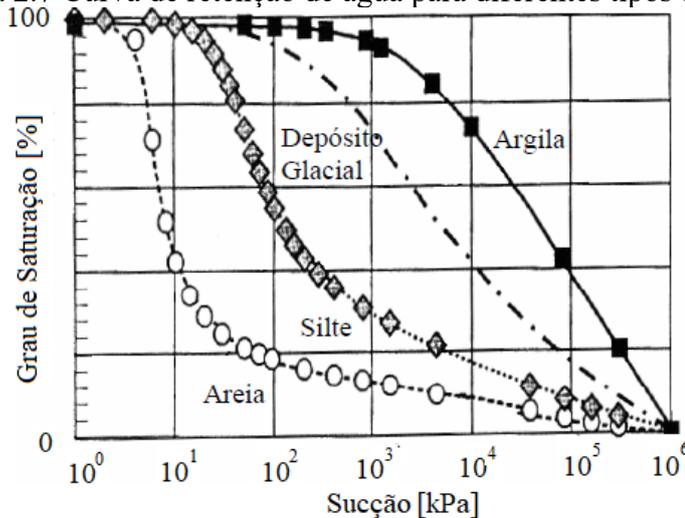
Diferentes tipos de solo possuem comportamentos distintos quanto a sua capacidade de retenção da água em seu interior. Esta influência é notada nos valores de entrada de ar e na inclinação da curva de retenção quando se compara os solos argilosos, siltosos e arenosos. Uma representação esquemática das CRAS destes tipos de solo está apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.6 Representação da curva de retenção para diferentes tipos de solo



Fonte: Adaptado de Vanapalli (1994)

Figura 2.7 Curva de retenção de água para diferentes tipos de solo



Fonte: Barbour (1998)

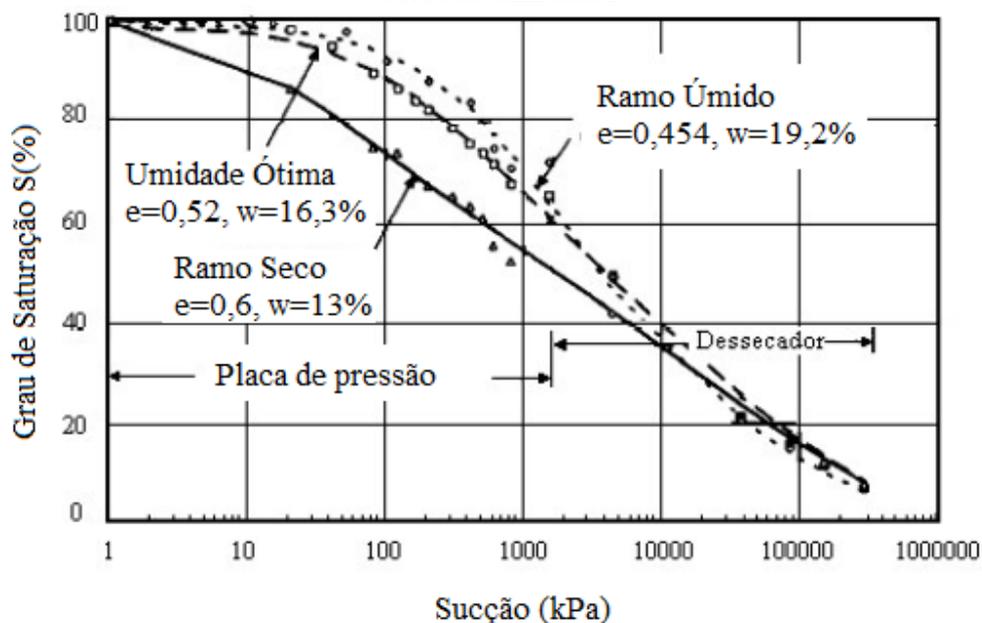
Note na Figura 2.6 e Figura 2.7, que os solos mais grossos apresentam curva mais íngreme, isso pode estar associado aos seus grandes poros interconectados favorecerem a perda de água mais facilmente com o aumento da sucção. As argilas conferem curva mais suave, possivelmente porque possuem poros menores e teor de finos mais elevado, assim, armazenam mais água. Pode-se associar a elevada retenção de umidade nas argilas às ligações intermoleculares que podem ocorrer entre a superfície dos argilominerais e as moléculas de água. Os solos siltosos apresentam um comportamento intermediário. Observa-se que para sucção igual a zero, ou seja, com os solos no estado saturado, o solo argiloso apresenta o maior valor de teor de umidade, seguido do solo siltoso e arenoso (FREDLUNG E XING, 1994).

2.2.2.2 Umidade de moldagem

A moldagem de corpos de prova a diferentes condições de umidade produz estruturas distintas das partículas para um mesmo tipo de solo. Portanto, as curvas de retenção em consequência são distintas.

Estudos realizados por Vanapalli et al. (1999) mostram CRAS definidas para um solo argilo-arenoso, compactado estaticamente nas condições de umidade ramo seco, ramo úmido e umidade ótima. A Figura 2.8 mostra a comparação entre as CRAS. Os autores observaram que os aspectos de sucção de fato variam com a condição de moldagem dos corpos de prova apesar de idênticos na mineralogia, textura e método de preparação.

Figura 2.8 Curva de retenção de água obtida por amostras de solo compactadas com diferentes teores de umidades

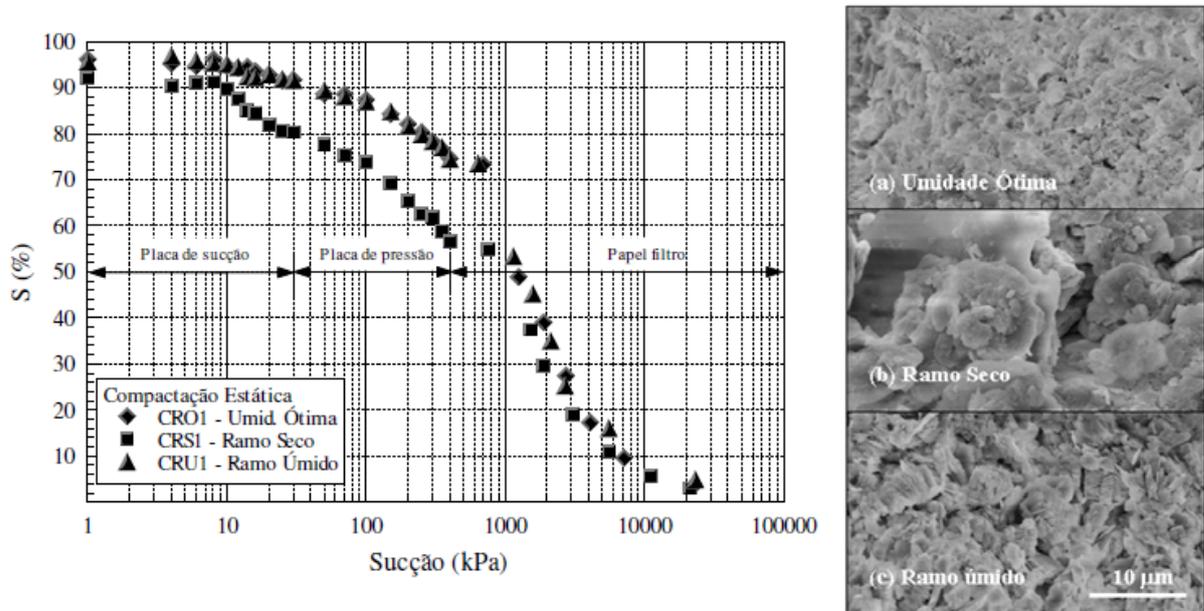


Fonte: Vanapalli et al. (1999)

Oliveira (2004) verificou o comportamento da CRAS quanto a condição de moldagem em um solo residual de gnaiss. As curvas obtidas pelo autor apresentadas na Figura 2.9 indicam que a moldagem na umidade ótima e no ramo úmido possuem certa semelhança e ausência de agregações após a compactação. Em contrapartida, a curva obtida para a condição seca apresentou um comportamento bimodal. Isto indica que as partículas de solo formaram agregações com vazios maiores entre elas. A primeira entrada de ar para sucções da ordem de

10 kPa corresponde a saída de água dos poros maiores formados entre as agregações. Após esta primeira entrada de ar, a perda de água se dá de forma gradativa na medida em que ocorre a saída de água no interior das agregações de partículas.

Figura 2.9 Curva de retenção obtida por amostras compactadas em diferentes umidades

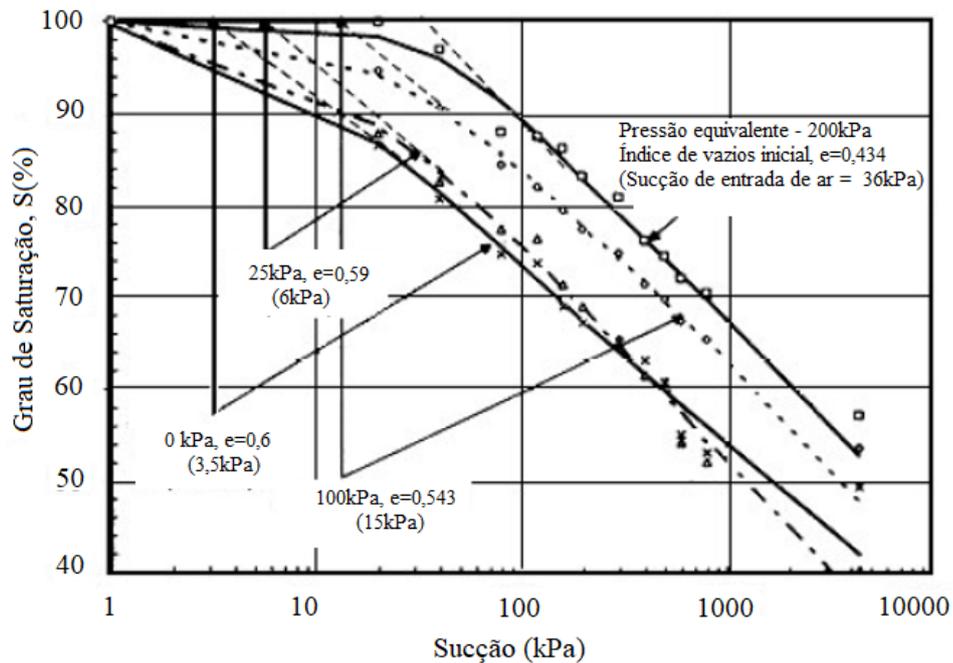


Fonte Oliveira (2004)

2.2.2.3 História de tensões

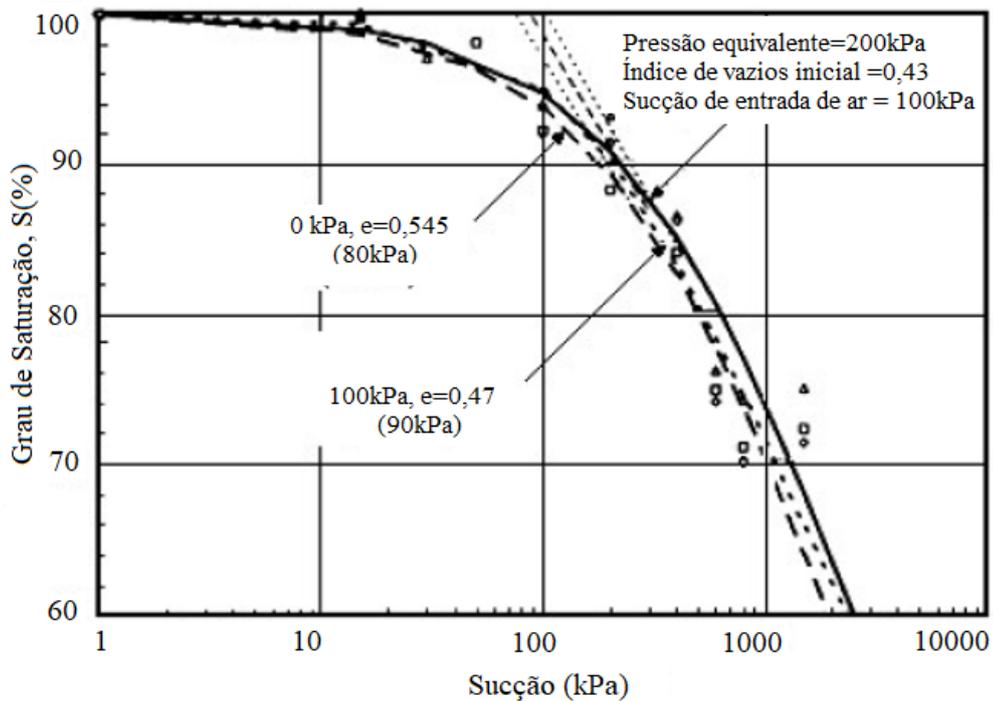
A história de tensões das amostras compactadas é outro fator influenciador da CRAS, pois podem alterar a estrutura do solo. A fim de verificar esta influência na curva de retenção Vanapalli et al. (1999) realizaram simulações impondo os corpos de prova a pressões confinantes de 25kPa, 100kPa e 200kPa. Os corpos de prova moldados no ramo seco apresentaram os resultados da Figura 2.10. Os autores relataram que para esta condição de moldagem ocorreu aumento da sucção de entrada de ar à medida que se aumentou a pressão de confinamento. Já os resultados apresentados na Figura 2.11 indicam que a pressão de confinamento não exerceu forte influência no formato da curva.

Figura 2.10 Variação do valor da sucção no ramo seco submetido a diferentes pressões confinantes



Fonte Vanapalli et al. (1999)

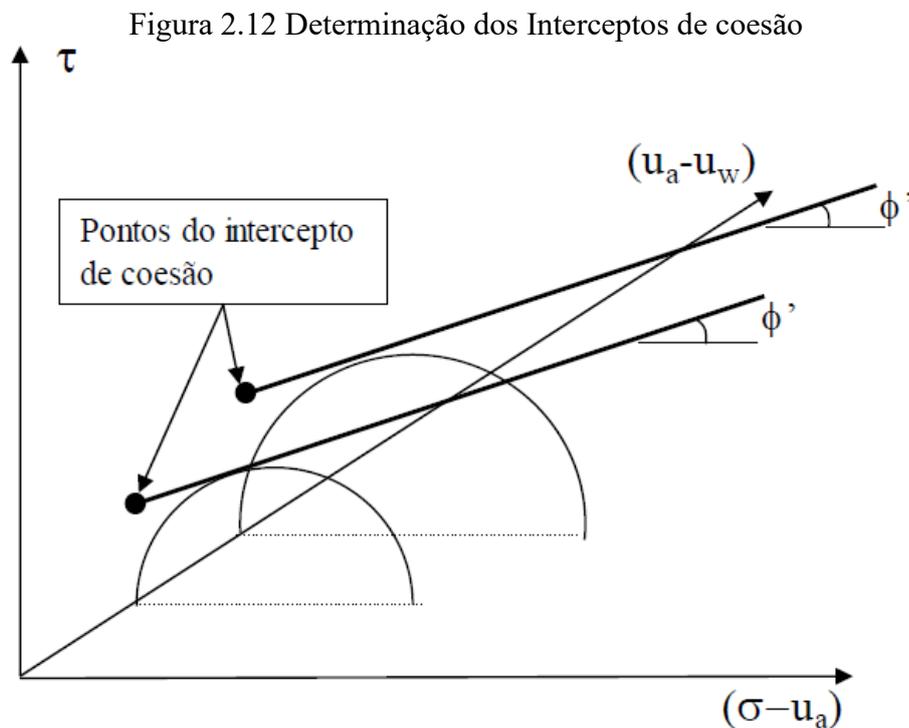
Figura 2.11 Variação do valor da sucção no ramo úmido submetido a diferentes pressões confinantes



Fonte Vanapalli et al. (1999)

2.3 INTERCEPTO DE COESÃO

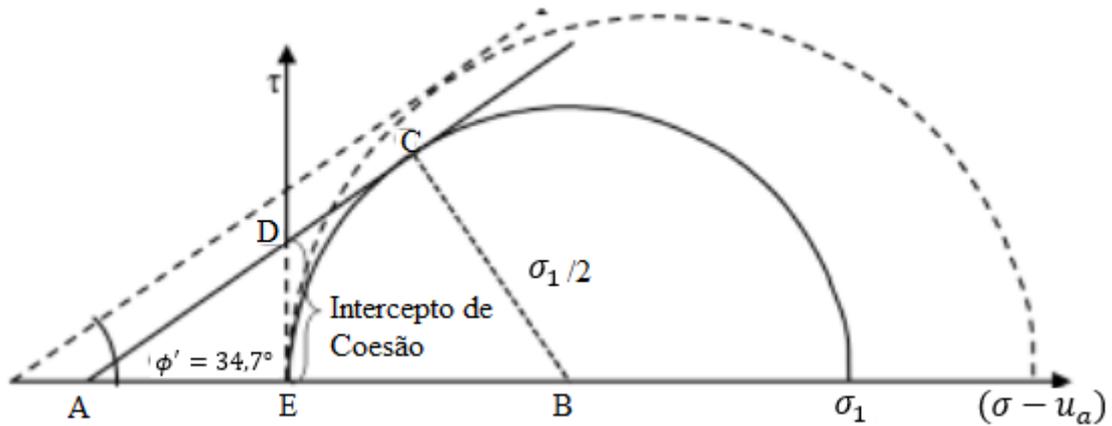
O intercepto de coesão representa a resistência ao cisalhamento no plano tensão cisalhante. A sua determinação se dá pelo intercepto da superfície de ruptura com o plano que representa a resistência ao cisalhamento em função da sucção. Deste modo, a Figura 2.12 ilustra graficamente como são obtidos os valores de intercepto, assim, pode-se obter o intercepto de coesão pela interseção das retas que tangenciam o círculo de Mohr, obtidos facilmente com o ensaio de compressão simples, com o plano da resistência ao cisalhamento em função da sucção. Para isso, as retas apresentam inclinação dada pelo ângulo de atrito efetivo do solo, considerado invariante à medida que aumenta a sucção.



Fonte: Pecapedra et al (2018)

A Figura 2.13 exemplifica o procedimento de obtenção do valor do intercepto de coesão, calculados pelas relações matemáticas dadas nas equações (3), (4) e (5)

Figura 2.13 Obtenção do intercepto de coesão



Fonte: Bernardi (2018)

$$AB = \frac{(\sigma_1/2)}{\sin(34,7^\circ)} \quad (3)$$

$$AE = AB - (\sigma_1/2) \quad (4)$$

$$DE = coes\tilde{a}o = AE \cdot \tan(34,7^\circ) \quad (5)$$

2.4 MODELOS DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS

Considerando a importância e as dificuldades para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, alguns autores propõem uma estimativa do comportamento desses solos através de modelos de previsão da resistência. Esses modelos utilizam resultados de ensaios de laboratórios como os realizados para obtenção dos parâmetros de resistência e a determinação da curva característica da retenção de água.

Embora exista uma variedade de modelos para estimativa da resistência ao cisalhamento do solo não saturado, serão destacados os propostos por Vanapalli et al (1996), Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006). De modo geral, para utilizar estes modelos é necessário determinar os parâmetros efetivos do solo, obtidos de ensaios triaxiais ou cisalhamento direto na condição inundada. O modelo proposto por Vanapalli et al (1996) utiliza na íntegra a CRAS na sua aplicação, enquanto Khalili e Khabbaz (1998) extraem da curva de

retenção o valor da sucção referente a entrada de ar. Por outro lado, Vilar (2006) não utiliza dados da curva de retenção. Para sua aplicação, faz uso do intercepto coesivo para obter o valor último C_{ult} .

2.4.1 Modelo proposto por Vanapalli et al (1996)

O modelo proposto por Vanapalli et al (1996) utiliza uma função não linear para representar a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado, com base na curva característica de retenção de água no solo e os parâmetros de resistência, através da equação (6):

$$\tau = [c' + (\sigma - u_a) \tan \phi'] + [(u_a - u_w)(\Theta^\kappa \tan \phi')] \quad (6)$$

Na qual:

κ = Parâmetro de ajuste para obter a melhor adequação entre os valores medidos e os valores preditos.

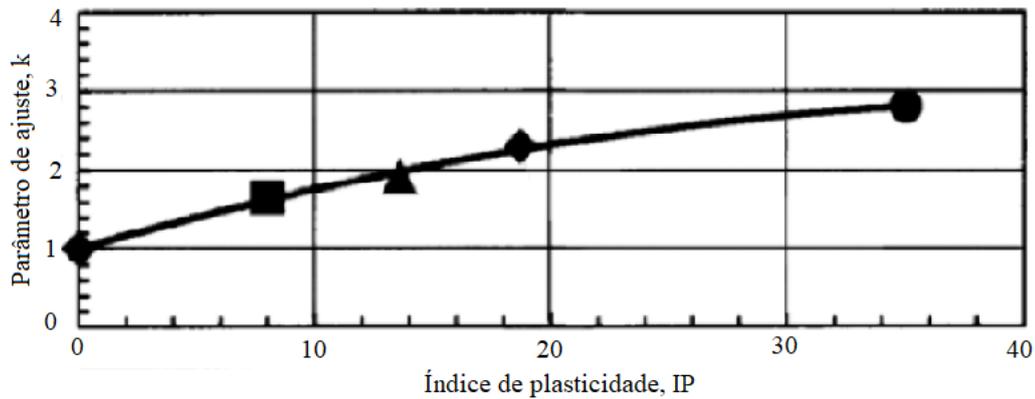
Θ = Umidade volumétrica normalizada em função da umidade volumétrica na condição saturada.

c' = coesão efetiva

ϕ' = ângulo de atrito efetivo

A primeira parcela da equação, que está entre colchetes, refere-se à resistência saturada. Os parâmetros de resistência desta parcela são considerados constantes e obtidos de ensaios triaxiais ou cisalhamento direto na condição inundada. A segunda parcela da equação refere-se à resistência ao cisalhamento devido à sucção. A relação entre a sucção e a umidade volumétrica normalizada é fornecida pela CRAS.

Para aplicar a Equação (6) é necessário determinar os valores de coesão e ângulo de atrito, obtidos de ensaios de resistência ao cisalhamento na condição inundada, a curva de retenção de água e o parâmetro κ que proporcione o melhor ajuste aos dados experimentais. Com base nos resultados de Escário e Jucá(1996), Vanapalli et al (1996) e Adaams et al (1996), Vanapalli e Fredlund (2000) propuseram uma correlação para determinar o valor de κ a partir do valor de Índice de plasticidade como apresentado na Figura 2.14.

Figura 2.14 Parâmetro de correlação κ 

Fonte: Adaptado de Vanapalli e Fredlund (2000)

2.4.2 Modelo proposto por Khalili e Khabbaz (1998)

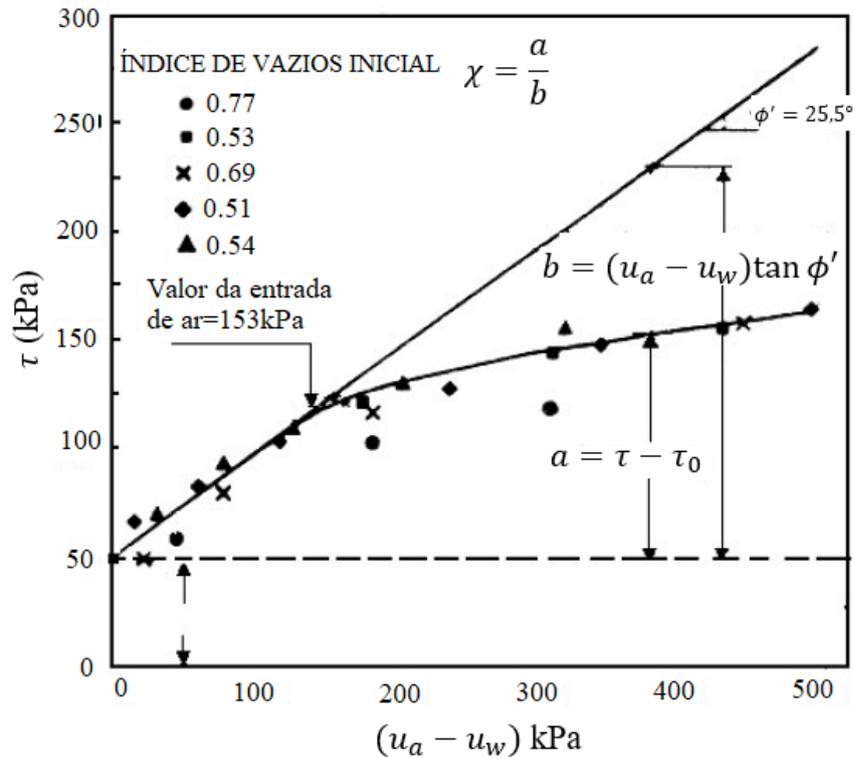
O modelo Khalili e Khabbaz (1998) é baseado na proposta de Bishop (1959) para equação de tensões efetivas em solos não saturados, apresentado pela Equação (7).

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (7)$$

Na formulação de Khalili e Khabbaz (1998) para o valor de χ é proposto uma relação entre a sucção e a sucção correspondente à entrada de ar. Na saturação $u_a = u_w$, o valor de χ é dado pela Equação (8).

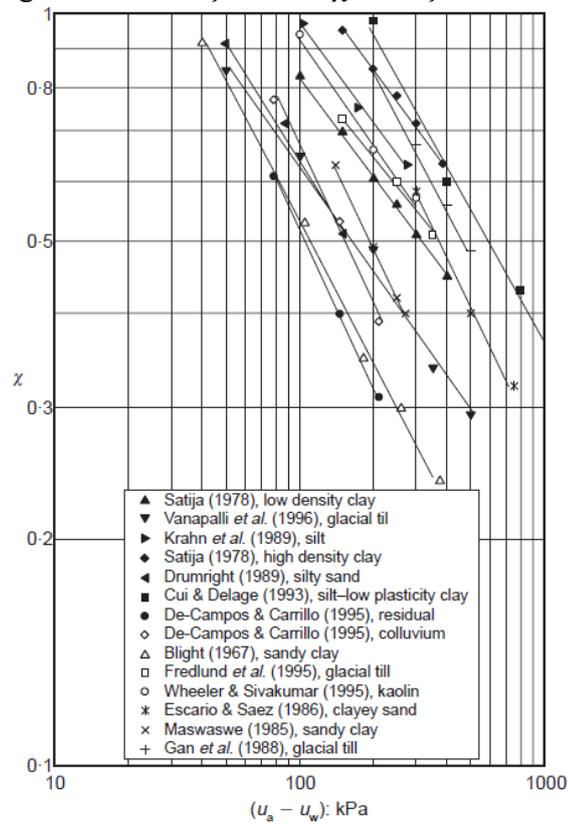
$$\chi = \frac{\tau - \tau_0}{(u_a - u_w) \tan \phi'} \quad (8)$$

Khalili e Khabbaz (1998) esquematizaram, como apresentado na Figura 2.15, a determinação gráfica do valor de χ em função da sucção e dos resultados dos ensaios de resistência. O valor de χ para um determinado valor de sucção é obtido dividindo-se “a” por “b”, em que “a” é dado pela diferença $\tau - \tau_0$ e “b” pela relação $(u_a - u_w) \tan \phi'$.

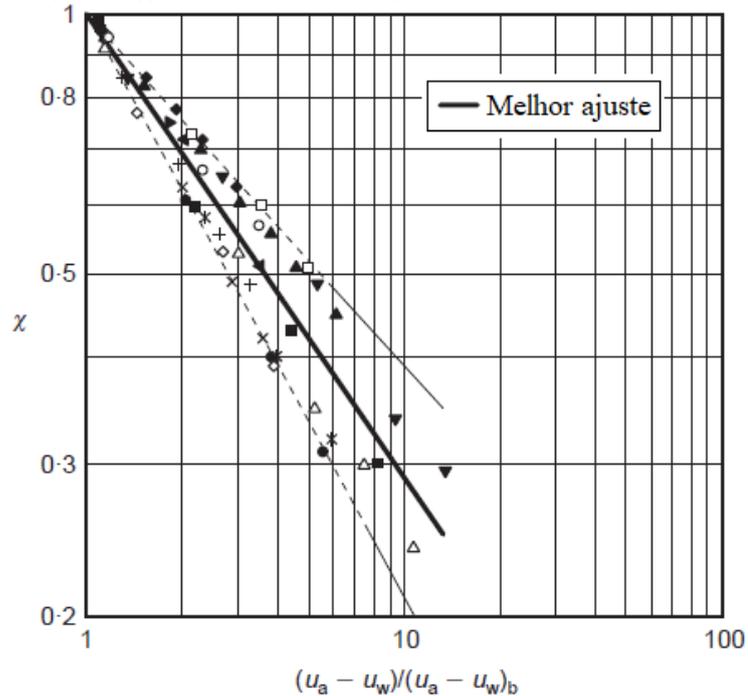
Figura 2.15 Determinação gráfica do valor de χ 

Fonte: Khalili e Khabbaz (1998)

A Figura 2.16 apresenta a relação entre χ e a sucção matricial de 14 casos publicados na literatura analisados por Khalili e Khabbaz (1998) com o intuito de investigar a variação de χ . Os autores afirmam que há uma tendência entre χ e a sucção mátrica que pode ser ajustada para uma linha reta. Os valores foram normalizados e apresentados na Figura 2.17, em que a reta limite inferior está relacionada a solos granulares e a reta limite superior corresponde a solos de granulação fina.

Figura 2.16 Relação entre χ e sucção matricial

Fonte: Khalili e Khabbaz (1998)

Figura 2.17 Variação de χ em função da sucção normalizada em relação à entrada de ar

Fonte: Khalili e Khabbaz (1998)

O melhor ajuste aos dados representado pela reta central da Figura 2.17 pode ser expresso pela Equação (9).

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0,55} \quad (9)$$

Onde, χ é o parâmetro de tensão efetiva

$(u_a - u_w)$ = sucção matricial

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

Khalili e Khabbaz (1998) indicam que ao aplicar o valor médio (equação 9) a todos os casos considerados na pesquisa resultou em um erro inferior a 10% na determinação da resistência ao cisalhamento.

Alguns autores identificaram a necessidade de ajustar a potência da equação na determinação de χ , ao aplicar o modelo de previsão de resistência ao cisalhamento Khalili e Khabbaz (1998) em solos brasileiros.

Oliveira (2004) analisou o solo residual de gnaiss compactado. Ao aplicar o modelo aos dados experimentais obteve melhor ajuste da resistência ao cisalhamento ao alterar o expoente para -0,321.

Georgetti (2010), ao aplicar o modelo a um solo laterítico compactado, propôs um novo valor para a potência da equação de χ . Considera que apesar da proposta original proporcionar uma curva com formato adequado, a potência -0,240 apresenta melhor ajuste aos dados experimentais.

Pecapiedra e Oliveira (2016) utilizaram o modelo ao verificar a influência da estrutura dos solos formada pela compactação em diferentes condições de moldagem, na relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção. Analisaram solo residual de gnaiss, granito e diabásio. Propuseram modificação da potência para determinação de χ . Definiram -0,49 para solo residual de granito e -0,48 para solo gnaiss.

2.4.3 Modelo proposto por Vilar (2006)

Vilar (2006) propõe modelo empírico de previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, representados pela Equação (10) hiperbólica

$$c = c' + \frac{\psi}{(a+b.\psi)} \quad (10)$$

Na qual:

c = intercepto de coesão

c' = coesão efetiva

ψ =sucção

a e b = parâmetro de ajuste

Os parâmetros de ajuste “a” e “b” são definidos segundo as Equações (11) e (12). Neste caso, admite-se que a temperatura e umidade ambiente contribui para que a sucção matricial atinja seu valor máximo. Deste modo, os ensaios para determinação dos parâmetros efetivos são realizados em amostras de solo com umidade residual.

$$a = \frac{1}{\tan \phi} \quad (11)$$

$$b = \frac{1}{c_{ult} - c'} \quad (12)$$

Onde,

ϕ é o ângulo de atrito efetivo.

c' é a coesão efetiva.

c_{ult} é o intercepto de coesão do valor de resistência atingido pelo solo seco ao ar.

Na impossibilidade de realizar ensaios nesta condição, a alternativa sugerida pelo autor é calcular o parâmetro b pela Equação (13) em que é necessário determinar o valor do intercepto de coesão máximo (c_m) correspondente ao maior valor de sucção (ψ_m).

$$b = \frac{1}{(c_m - c')} - \frac{1}{(\psi_m \cdot \tan \phi')} \quad (13)$$

Furman e Faro (2021) utilizaram o modelo Vilar (2006) para solos tropicais e consideram a previsão válida para o solo estudado. Salientaram que o modelo Vilar (2006) se destaca pela simplicidade na utilização. O modelo não necessita da curva de retenção, apenas da resistência ao cisalhamento de uma amostra seca ao ar e de dados da resistência ao cisalhamento na condição inundada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar a resistência ao cisalhamento não saturado do solo residual de sienito foi elaborado um programa experimental de ensaios de laboratório. Esta etapa foi precedida de saídas de campo com reconhecimento dos possíveis locais de amostragem de solos residuais de sienito. As atividades de campo foram realizadas com base no mapa geológico da folha de Lages escala 1:100.000, apresentado por Scheibe (1986), que identificou a nefelina sienito porfirítico presente no Domo de Lages em Santa Catarina.

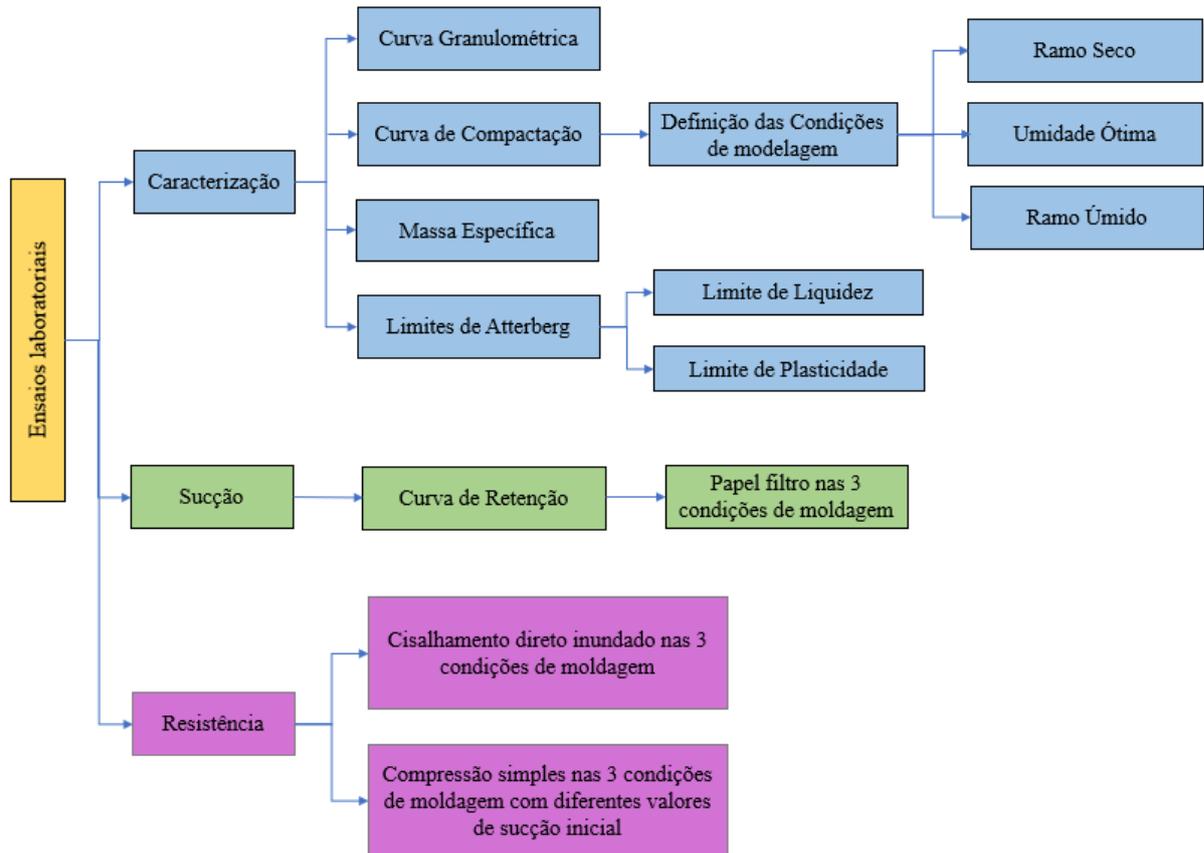
A metodologia consiste em caracterizar o solo através dos ensaios de análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, determinação da densidade real dos grãos e determinação da curva de compactação. Da curva de compactação foram definidos 3 pontos de estudo que representam o ramo seco, o ponto ótimo e ramo úmido. Feita a caracterização e definidas as condições de moldagem, foi dado início a definição dos parâmetros de resistência do solo através do ensaio de cisalhamento direto na condição inundada. O cisalhamento direto foi realizado nas 3 condições de moldagem considerando tensões normais de 50kPa, 100kPa e 200kPa, que permitem a determinação dos parâmetros efetivos: coesão e ângulo de atrito efetivo. Dados indispensáveis para subsidiar estudos geotécnicos.

Foram realizados ensaios de compressão simples para as três condições de moldagem com corpos de prova preparados por secagem e umedecimento, obtendo-se assim, os interceptos de coesão que é a relação entre a coesão e a sucção.

A CRAS foi definida através do ensaio método do papel filtro. Para a determinação da relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção foram realizados ensaios de compressão simples nas 3 condições de moldagem considerando as trajetórias de secagem e umedecimento. A sucção inicial dos corpos de prova foi determinada com o método do papel filtro. Posteriormente foram aplicados os modelos Vanapalli et al (1996), Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006) para verificar a aplicabilidade dos modelos na precisão da resistência ao cisalhamento do solo Sienito.

A esquematização da metodologia proposta é apresentada no fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 Sequência de execução dos ensaios

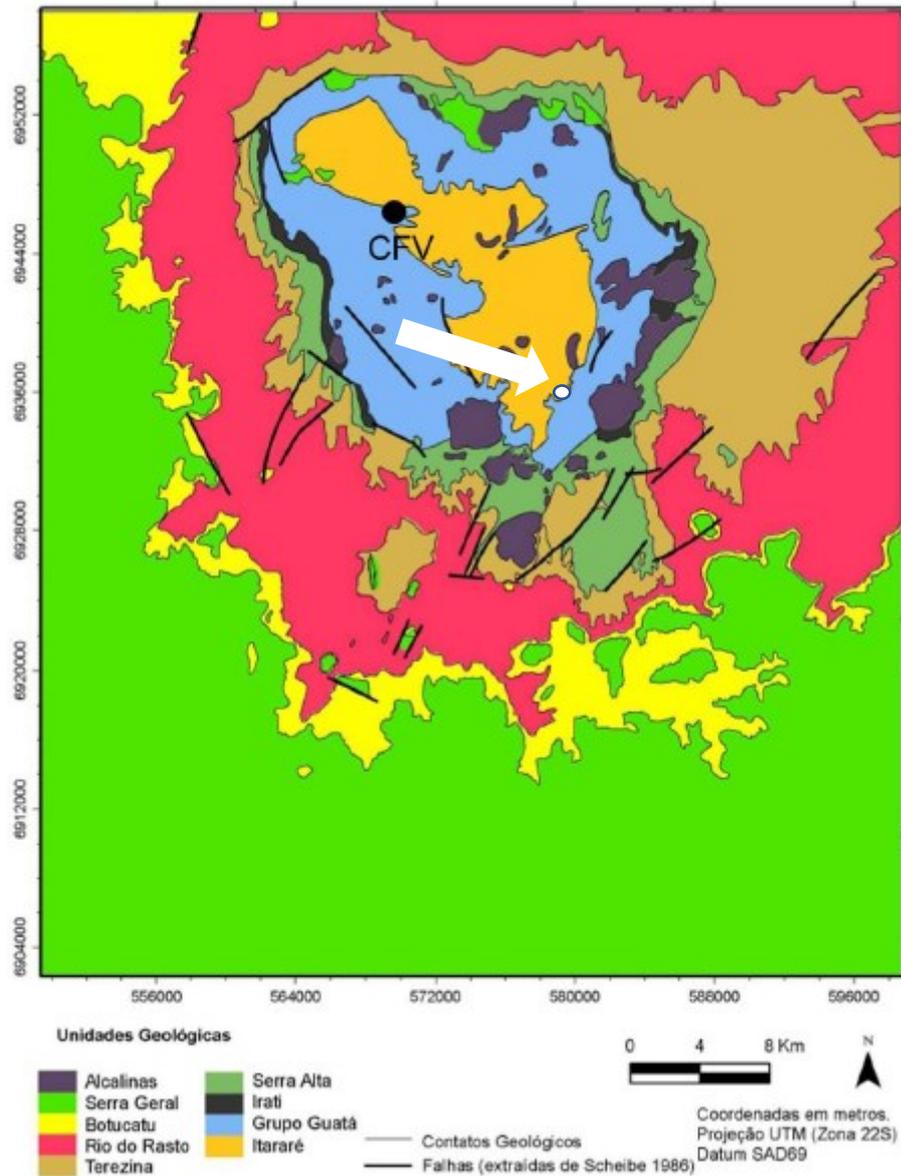


3.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

O Domo de Lages está localizado na Bacia Sedimentar do Paraná, mais precisamente a cerca de 120km do bordo Leste, porção centro-sul do estado de Santa Catarina. Esta região está situada entre duas importantes feições tectônicas da bacia: o Arco de Ponta Grossa e o Sinclinal de Torres. Essa região é caracterizada pela ocorrência de rochas alcalinas, que a difere das demais estruturas dômicas da bacia (Rômulo Machado et al., 2012).

Scheibe (1986) apresenta dados de geologia e petrologia do distrito alcalino de Lages. O mapa geológico da Figura 3.2 mostra as unidades geológicas da região em estudo, caracterizado por uma significativa porção de Formação Serra geral, além de Formação Rio do Rastro, Formação Teresina, Grupo Guatá, Formação Botucatu, Grupo Itararé, Formação Serra Alta, Rochas Alcalinas e uma pequena Formação Irati. O ponto de estudo está indicado na Figura 3.2 com um ponto branco, pertencente a formação geológica do Grupo Itararé.

Figura 3.2 Mapa geológico da região domo de Lages



Fonte: Adaptado de Manfredi (2013)

3.2 LOCAL DE AMOSTRAGEM

O solo escolhido para este estudo foi o residual de sienito, que são rochas ígneas plutônicas, formadas a partir da cristalização do magma a grande profundidade. Possui composição alcalina ricas em Na_2O e K_2O de cor cinza que tem como principal mineral o feldspato. Outra característica é a presença de pouco ou nenhum quartzo. O seu afloramento na superfície ocorre após atuação dos processos geológicos, com a remoção do material sedimentar ou metamórfico presente na superfície terrestre (Frasca, 2014; Teixeira et al., 2009). O ponto

de coleta da amostra de solo está localizado nas proximidades do município de Palmeira. A Figura 3.3 mostra a imagem de satélite do ponto de coleta com as coordenadas geográficas no sistema UTM (Universal Transversa de Mercator). Esse local está inserido dentro do grupo Itararé que se trata de formações geológicas pertencentes à Bacia do Paraná. Esse grupo foi originado por um processo de Glaciação que gerou grandes depósitos de rochas glaciais. Os depósitos constituídos principalmente por arenitos, diamictitos, conglomerados e rochas argilosas, estão relacionados a processos de ressedimentação, em que sedimentos previamente acumulados são movidos pela ação da gravidade em fenômenos como deslizamentos, escorregamentos e fluxos de detritos (MOTTIN, 2017; SUSS, 2014). Na Figura 3.4 é possível visualizar um fragmento de rocha sienito encontrado no local da coleta do solo, já em processo de alteração.

Figura 3.3 Local de coleta da amostra



Coordenadas do ponto de coleta
Zona 22J
Latitude: 6935414,0 S
Longitude: 579566,0 E

Fonte: Google Earth Pro, 2019

Figura 3.4 Rocha Sienito em processo de alteração



Fonte: autor

A amostra de solo foi coletada do horizonte B de forma manual, com auxílio de pá e picareta e acondicionadas em sacos de nylon e posteriormente transportadas para o laboratório. A Figura 3.5 apresenta: a) o corte onde foi extraída a amostra; b) o processo de extração e c) as amostras ensacadas.

Figura 3.5 Processo de coleta do material



Fonte: autor

O tamanho da amostra foi cerca de 70 kg para a realização de todos os ensaios de resistência, caracterização e compactação. No laboratório, esta amostra foi depositada em padiolas identificadas e dispostas ao ar para secar e depois seguiu-se com o processo de ensaios.

3.3 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO, ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO

Para realização dos ensaios foram tomados por base as instruções normativas correspondentes a cada ensaio como segue:

- a) Preparação da amostra para ensaios de caracterização e compactação – ABNT 6457 (2016)
- b) Análise granulométrica – ABNT 7181(2016)
- c) Limite de Plasticidade – ABNT 7180 (2016)
- d) Limite de Liquidez – ABNT 6459 (2016)
- e) Massa específica dos sólidos – ABNT 6458 (2016)
- f) Compactação – ABNT 7182 (2016)

3.3.1 Preparação da amostra de solo

As amostras coletadas foram preparadas para os ensaios segundo as recomendações da norma ABNT 6457(2016) que apresenta os procedimentos para preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização (análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos e limites de consistência). Os ensaios foram realizados no laboratório de mecânica dos solos da UFSC, seguindo-se as etapas ilustradas na Figura 3.6 a) secagem da amostra ao ar até a umidade higroscópica; b) destorroamento dos grãos com auxílio de um almofariz e mão de gral com ponteira de borracha, a fim de desagregar as partículas a suas dimensões reais; c) quarteamento de toda a amostra visando a homogeneização; d) material homogeneizado e pronto para os ensaios. Destaca-se que após o processo de preparação a amostra foi armazenada em vasilhames com tampa para evitar variações na umidade.

Figura 3.6 Preparação do solo sienito para os ensaios:



Fonte: autor

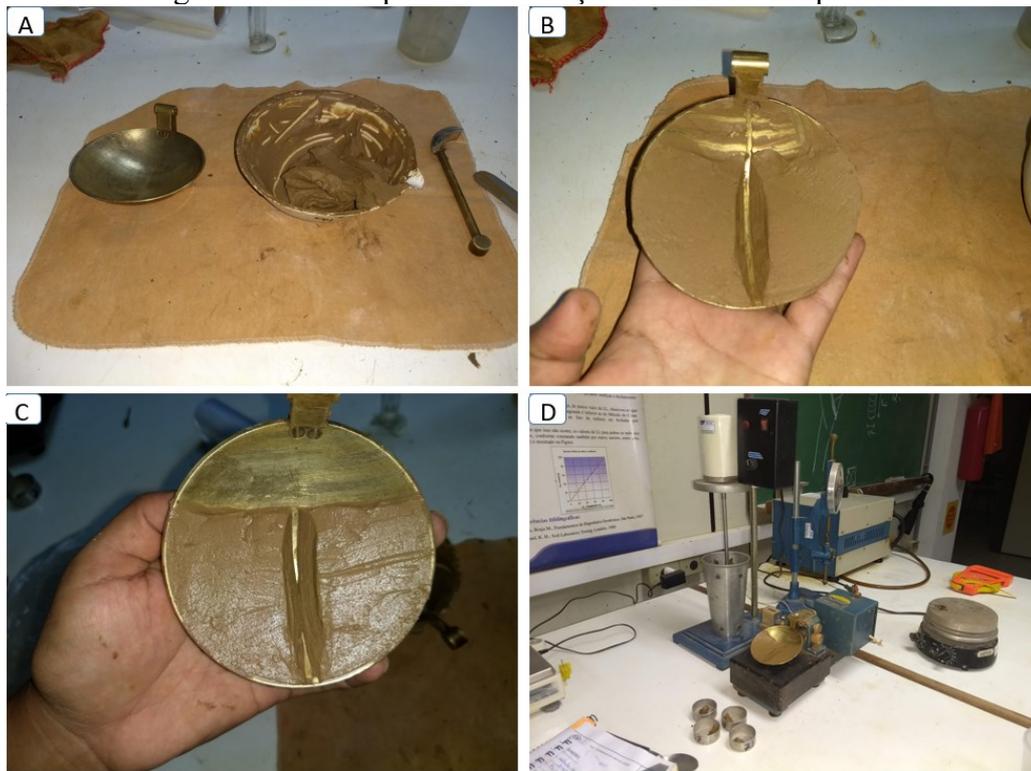
3.3.2 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

A obtenção da distribuição granulométrica consistiu em dois processos: peneiramento e sedimentação, com base nas especificações das NBRs 7181/16 e 7180/16.

3.3.3 Limites de consistência

Para realização dos ensaios para determinação dos limites de consistência (LL e LP), foram utilizadas determinações das NBR 6457/16. A Figura 3.7 ilustra a execução do ensaio para determinação do LL. Nela vemos: a) Preparação do material; b) abertura da ranhura antes de executar os golpes; c) ranhura após o ensaio; d) material para determinação da umidade.

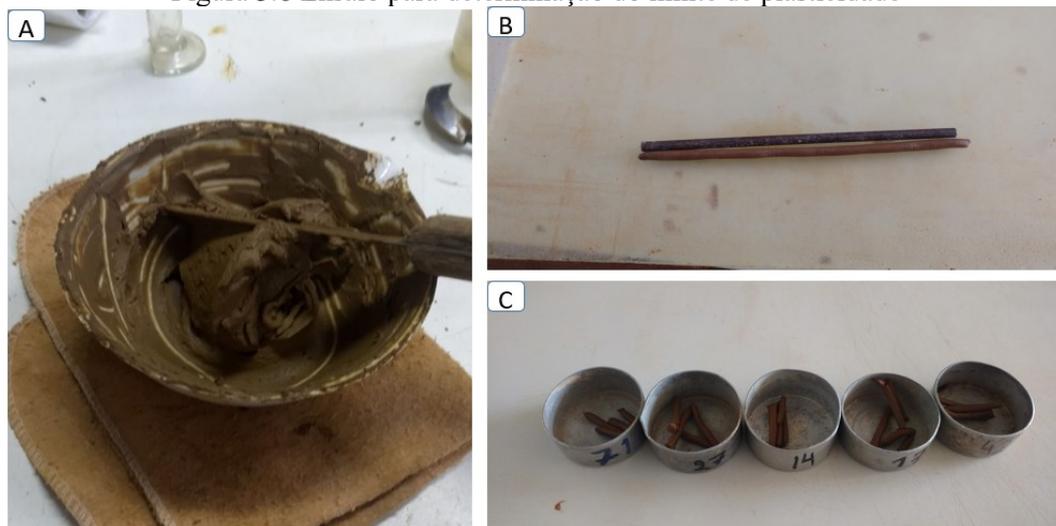
Figura 3.7 Ensaio para determinação do limite de liquidez:



Fonte: autor

Na Figura 3.8 é apresentado o procedimento executado para determinação do limite de Plasticidade. Nela encontramos: a) homogeneização da mistura; b) amostra moldada em cilindro e comparação com gabarito; c) cilindro fragmentado para determinação da umidade.

Figura 3.8 Ensaio para determinação do limite de plasticidade

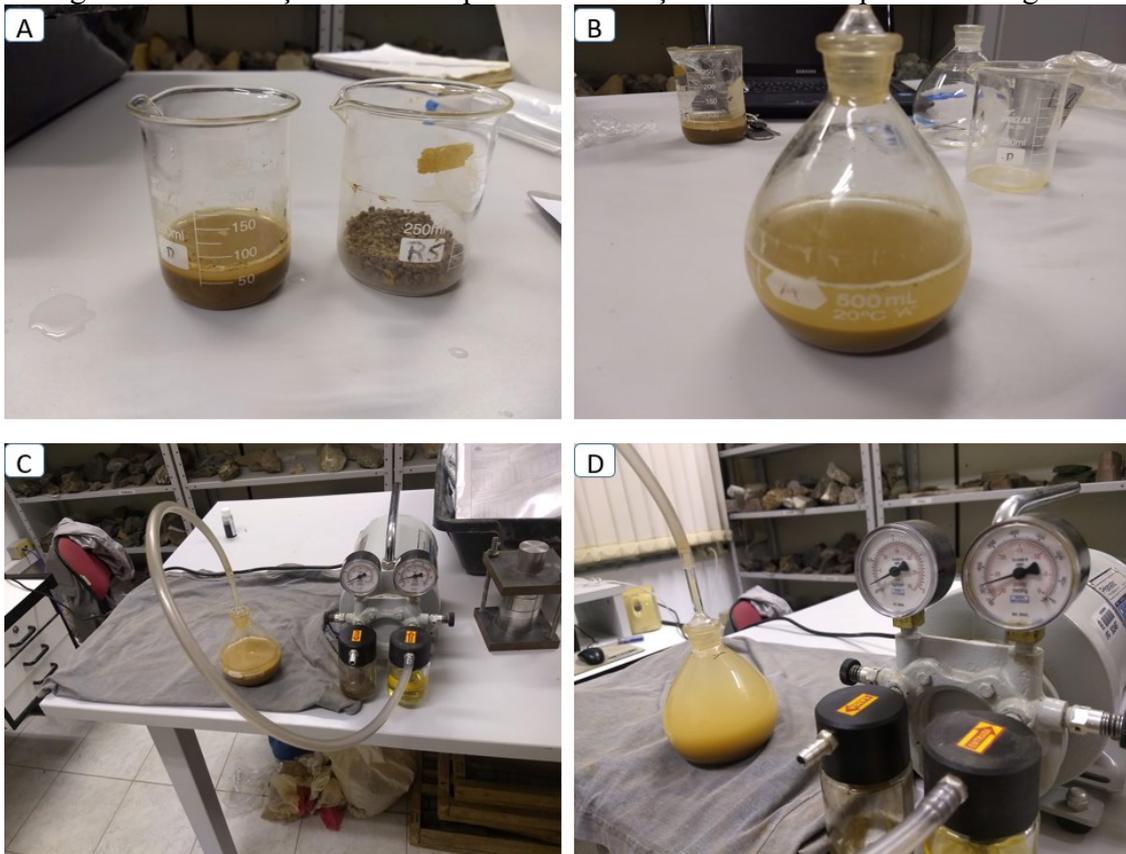


Fonte: autor

3.3.4 Determinação da massa específica dos grãos do solo

A massa específica dos grãos relaciona a sua massa total com o seu volume. É um dado importante na determinação dos índices físicos do solo, como por exemplo, o índice de vazios. A determinação consistiu na realização de dois ensaios, seguindo a prescrição da norma 6458/16 com a utilização de solo passante na peneira 4,8mm por meio de picnômetro. Na Figura 3.9 estão ilustradas algumas etapas do ensaio: a) amostra de 50g de solo com água destilada em repouso por 12 horas; b) amostra transferida para picnômetro, com água destilada até cerca de metade do volume; c) aplicação de vácuo durante pelo menos 15 minutos; d) Picnômetro com solo e água destilada até cerca de 1cm abaixo da base do gargalo e submetido a pressão de vácuo.

Figura 3.9 Realização do ensaio para determinação da massa específica dos grãos



Fonte: autor

3.3.5 Determinação da curva de compactação

O ensaio de compactação foi realizado para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo e definir 3 pontos pertencentes as regiões de umidade ótima, ramo seco e ramo úmido. Os procedimentos para a execução seguiram o que prescreve a norma ABNT 7182/16. Neste ensaio, optou-se pela reutilização de material e uso de cilindro pequeno, com volume $997,46 \text{ cm}^3$ em que a amostra passante na peneira com abertura 4,8 mm foi compactada com energia Proctor normal em 3 camadas de solo a 26 golpes cada. Algumas etapas da execução do ensaio de compactação são apresentadas na Figura 3.10: a) Pesagem do solo a ser utilizado na compactação; b) Preparação da amostra; c) compactação; d) Pesagem do cilindro com solo compactado; e) extração do solo compactado; f) retirada de amostra para determinação da umidade.



Fonte: autor

O resultado deste ensaio gerou uma curva de compactação que relaciona os teores de umidade (%) e a massa específica aparente seca (g/cm^3). A umidade ótima de compactação corresponde ao ponto de maior massa específica seca desta curva. Com a curva de compactação definida, foi possível determinar os três pontos de estudo desta pesquisa. Optou-se por adotar o ponto de umidade ótima e valores aproximadamente 5% abaixo e acima da umidade ótima que possuíssem o mesmo valor de massa específica seca. Esses pontos têm o objetivo de verificar

a influência da estrutura resultante das diferentes condições de moldagem na resistência ao cisalhamento e na curva de retenção de água.

3.4 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Foram determinadas três curvas de retenção de água para corpos de prova moldados nas regiões do ramo seco, umidade ótima e ramo úmido da curva de compactação obtida com a energia do Proctor normal. Foram moldados corpos de prova com dimensões 38mm de diâmetro e 48mm de altura para cada condição de moldagem, compactados estaticamente em três camadas com ranhuras entre as camadas. Esta compactação foi realizada do interior de um molde metálico tripartido, apresentada na Figura 3.11. Após a compactação, cada corpo de prova foi submetido ao processo de umedecimento até ficarem encharcados. Para este procedimento foi borrifado água no corpo de prova, controlando a variação da massa.

Figura 3.11 Molde cilíndrico tripartido



Fonte: Bernardi (2018)

3.4.1 Papel filtro

As curvas de retenção de água foram obtidas com o emprego da técnica do papel filtro. Após os procedimentos de compactação e saturação foram colocados dois papéis filtro na lateral dos corpos de prova, sendo posteriormente envoltos em plástico filme e papel alumínio. Em

seguida, os assim preparados corpos de prova foram armazenados em caixas de isopor para evitar a perda de umidade, incidência direta da luz solar e variações de temperatura. Os papéis filtros foram retirados após um período mínimo de 7 dias. Após esse período foi feita a determinação da umidade do papel, secando-o em estufa por 2 horas, sendo a sucção obtida pela média dos dois valores. Para a determinação do teor de umidade do papel filtro foi utilizada uma balança de 4 casas decimais. Após a retirada dos papéis filtro, foram obtidas a massa dos corpos de prova, com utilização de balança com duas casas decimais, e de suas alturas e diâmetros com auxílio de paquímetro.

A partir do valor de umidade, a curva de calibração de Chandler et al. (1992) para determinação do valor referente à sucção foi utilizada. O resultado deste procedimento permite determinar o primeiro ponto da curva de sucção. Os outros pontos foram obtidos a partir da secagem dos corpos de prova, este processo de secagem ocorreu à temperatura ambiente ou com ajuda de um ventilador. A medida da sucção foi definida repetindo o processo já descrito.

3.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Os parâmetros de resistência do solo foram determinados para os 3 pontos de estudo definidos na curva de compactação: um no ramo seco, um na umidade ótima e um no ramo úmido. Os parâmetros efetivos do solo (coesão e ângulo de atrito) foram obtidos em ensaios de cisalhamento direto inundado. Para a determinação dos interceptos de coesão foram realizados ensaios de compressão simples.

3.5.1 Cisalhamento direto

O ensaio de resistência ao cisalhamento direto foi realizado na condição consolidado drenado.

Com este ensaio foi possível determinar os valores de coesão e ângulo de atrito efetivos. O procedimento do ensaio seguiu as prerrogativas da norma ASTM D3080-03, adotando-se as tensões normais de consolidação 50 kPa, 100kPa e 200 kPa. Algumas das etapas destes ensaios estão apresentadas na

Figura 3.12: a) e b) a moldagem do corpo de prova, c) montagem na célula de cisalhamento e d) consolidação.

Figura 3.12 Ensaio cisalhamento direto inundado.



Fonte: autor

3.5.2 Compressão simples

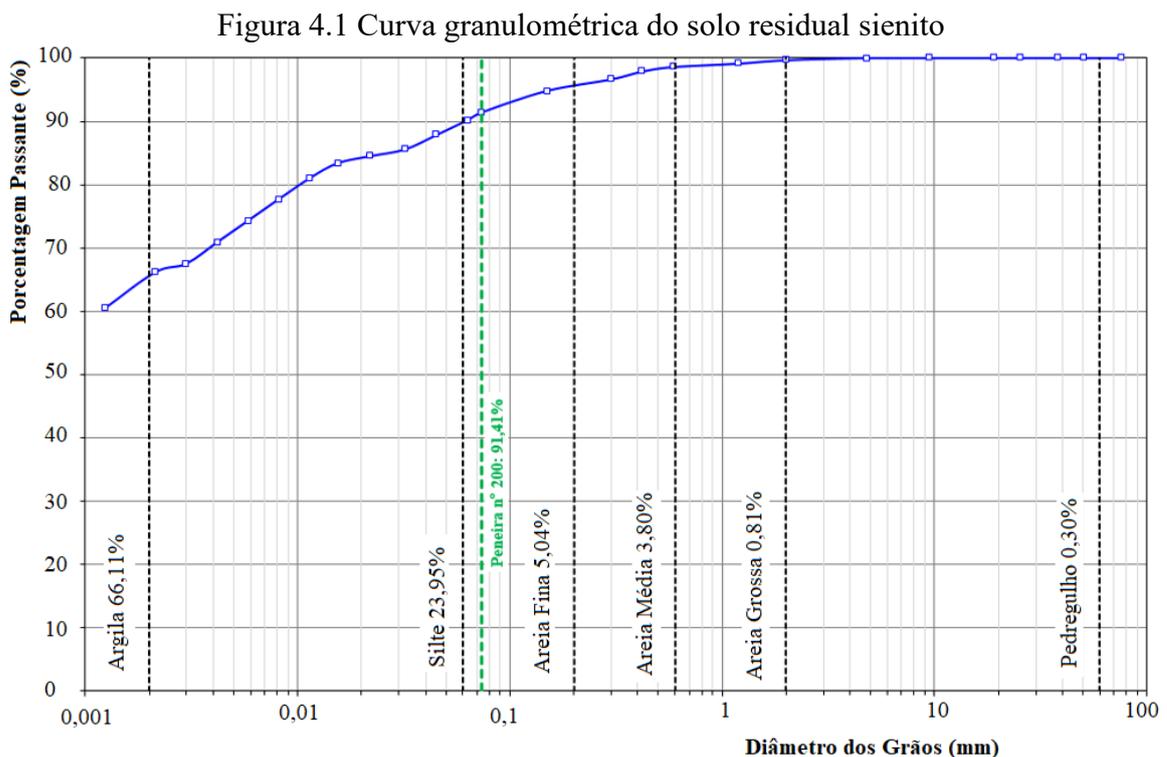
O ensaio de resistência à compressão simples permitiu a determinação do intercepto de coesão e variação do módulo de elasticidade em função da sucção. Para isso, foram moldados 15 corpos de prova em cada condição de moldagem, totalizando 45 corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados com dimensões 38mm de diâmetro e 79mm de altura, compactados estaticamente em 5 camadas, utilizando, para isso, o molde tripartido apresentado na Figura 3.11. Após moldagem, alguns corpos de prova foram umedecidos e outros foram secados de forma que apresentassem diferentes valores de sucção inicial. A sucção inicial foi determinada com o método do papel filtro sendo determinados dois valores de sucção para cada corpo de prova. Após a determinação da sucção inicial, os corpos de prova foram rompidos seguindo as recomendações da norma NBR 12770 (1992), destinada a determinação da resistência à compressão não confinada de solos coesivos.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de acordo com a metodologia descrita.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A curva granulométrica do solo obtida pelo ensaio é apresentada na Figura 4.1. Observa-se que grande parte da amostra é passante na peneira nº 200 (0,075mm) totalizando mais de 90% de representatividade, dos quais cerca de 66% correspondem à argila e 24% ao silte. Isso indica tratar-se de um solo predominantemente argiloso.



Fonte: autor

O resumo dos resultados dos ensaios de análise granulométrica, limites de consistência e massa específica dos grãos são apresentados na Tabela 4.1. Os ensaios para determinação dos limites de consistência resultaram em LL igual a 76,8% e LP igual a 49,97%. Estes valores resultaram no índice de plasticidade correspondente a 26,91%. Portanto, a amostra é considerada de alta plasticidade. Quanto à massa específica dos grãos, o valor obtido para a

amostra dos dois ensaios foi 2,65g/cm³. Observa-se na Figura 4.2 que a carta de plasticidade de Casagrande permite classificar o solo residual de sienito como argila orgânica de alta plasticidade.

Figura 4.2 Classificação do solo residual de sienito na carta de plasticidade de Casagrande.

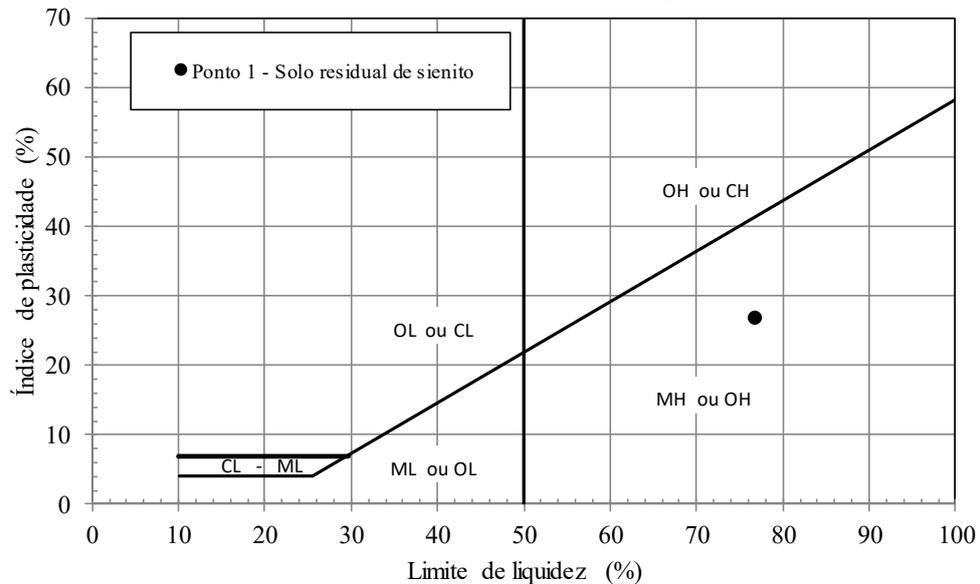


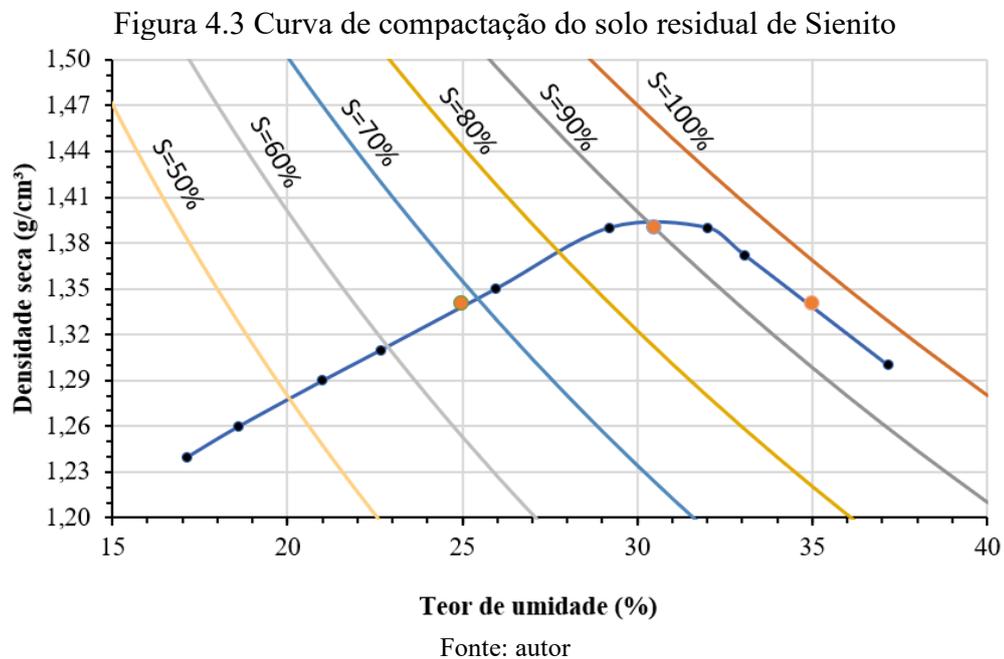
Tabela 4.1 Resumo dos ensaios de caracterização

Ensaio de Caracterização para o solo Residual de Sienito		
Análise granulométrica	Argila [%]	66,11
	Silte [%]	23,95
	Areia fina [%]	5,04
	Areia média [%]	3,8
	Areia grossa [%]	0,81
	Pedregulho [%]	0,30
Limites de consistência	LL [%]	76,80
	LP [%]	49,97
	IP [%]	26,91
Massa específica dos grãos	ρ_s [g/cm ³]	2,65

4.2 CURVA DE COMPACTAÇÃO

A Figura 4.3 apresenta a curva de compactação do solo. Com ela foi possível definir a umidade ótima resultante 30,5% com a correspondente massa específica seca máxima 1,392

g/cm^3 . Além da umidade ótima foram definidas duas umidades na curva, uma correspondente ao Ramo Seco e outro ao Ramo Úmido, como indicados com ponto em laranja no gráfico.



Na curva de compactação foram escolhidos os 3 pontos de estudo desta pesquisa, indicados na Figura 4.3, representando o ramo seco, umidade ótima e o ramo úmido. As condições de moldagem destes pontos de estudo estão apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Condições de moldagem dos 3 pontos de estudo desta pesquisa.

Condição de moldagem	Teor de Umidade W [%]	Massa específica seca ρ_d [g/cm^3]
Ramo seco	25,0	1,34
Umidade ótima	30,5	1,39
Ramo úmido	35,0	1,34

4.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Na determinação da curva de retenção de água do solo foram moldados corpos de prova para cada ponto de estudo (ramo seco, umidade ótima e ramo úmido), como definidos na Figura 4.3. Os dados referentes à compactação estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Dados de moldagem dos corpos de prova utilizados para determinação da curva de retenção

	W [%]	ρ_d[g/cm³]	W sat [%]
Ramo Seco	25,55	1,33	37,73
Ponto Ótimo	30,29	1,39	34,20
Ramo Úmido	35,11	1,34	36,68

Onde w é a umidade de compactação e ρ_d a massa específica seca

Na Tabela 4.4 são apresentados os pontos experimentais das medidas de sucção (ψ), índice de vazios (e), teores de umidade gravimétrico (w) e volumétrico (θ) e o grau de saturação (S), obtidos dos corpos de prova ao longo das etapas de secagem.

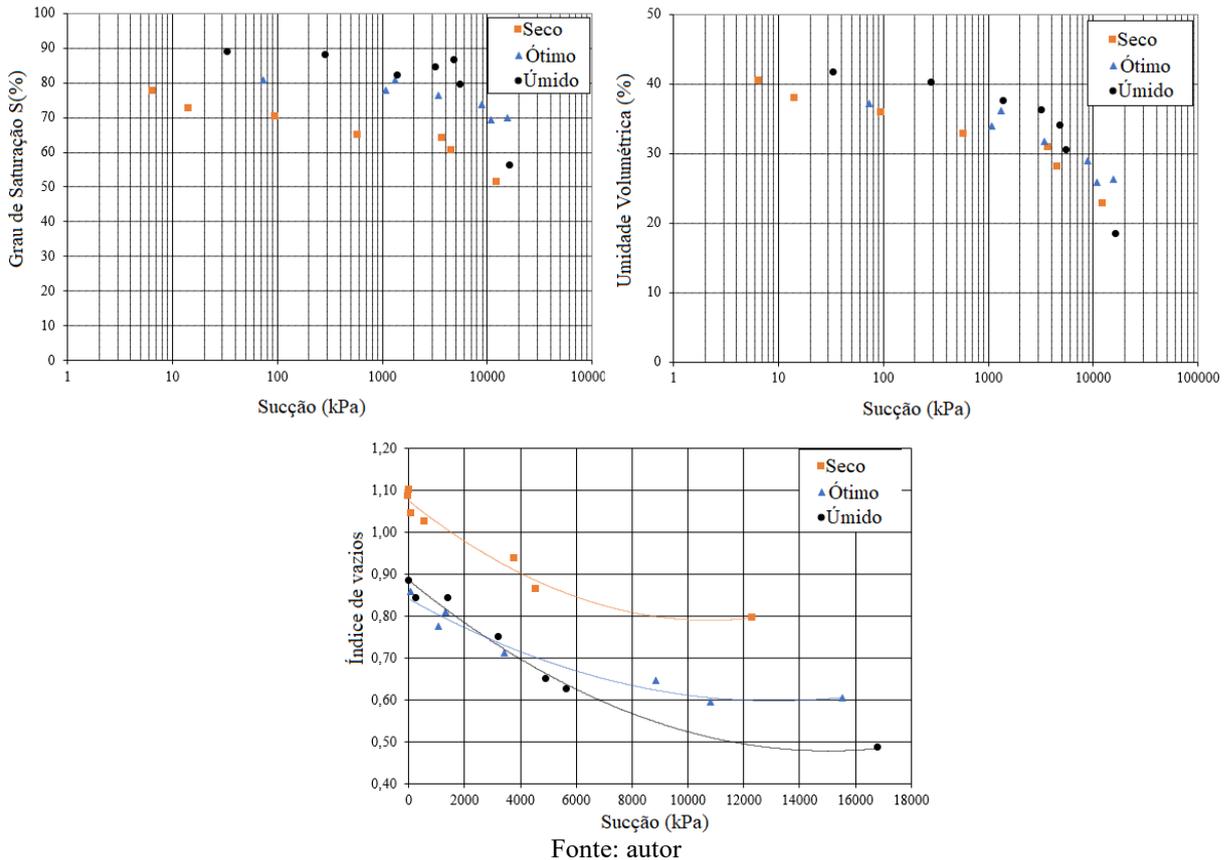
Tabela 4.4 Dados experimentais das curvas de retenção obtidas para os 3 pontos de estudo.

	ψ [kPa]	e	W[%]	S[%]	θ [%]
Ramo Seco	6,5	1,09	31,09	77,56	40,38
	14,3	1,10	29,41	72,42	37,95
	96,1	1,05	27,10	70,24	35,90
	581,8	1,02	24,52	64,82	32,81
	3787,7	0,94	22,12	63,92	30,94
	4567,1	0,86	19,28	60,47	28,03
	12310,0	0,80	15,10	51,39	22,78
Umidade Ótima	72,83	0,86	25,56	80,65	37,27
	1329,34	0,81	24,16	80,90	36,18
	1074,75	0,78	22,29	77,87	34,02
	3435,34	0,71	20,06	76,24	31,73
	8863,75	0,65	17,60	73,59	28,94
	10816,93	0,59	15,24	69,43	25,90
	15538,00	0,61	15,62	69,92	26,37
Ramo úmido	34,28	0,88	28,92	88,70	41,61
	293,20	0,84	27,32	87,86	40,18
	1414,92	0,84	25,45	81,96	37,46
	3253,83	0,75	23,32	84,21	36,11
	4940,62	0,65	20,71	86,27	34,01
	5662,20	0,63	18,28	79,21	20,48
	16806,29	0,49	10,04	55,97	18,31

A Figura 4.4 apresenta os gráficos de umidade volumétrica, grau de saturação e índices de vazios em função da sucção. Observa-se que a curva obtida para o corpo de prova moldado no ramo seco apresenta, para os mesmos valores de sucção, grau de saturação inferior às demais condições de moldagem. É possível verificar que o corpo de prova moldado no ramo seco apresentou maiores valores de índice de vazios. Este fato pode estar associado à estrutura floccular característica de um solo compactado nessa condição. De modo geral, há uma redução do índice de vazios, no entanto, se verifica uma tendência a estabilização dessa variação. Pode

ser observado que esta estabilização (comparando as figuras 4.5, 4.6 e 4.7) corresponde ao ponto de inflexão das curvas de retenção.

Figura 4.4 Pontos experimentais do Grau de Saturação x Sucção, Umidade Volumétrica x Sucção e Índice de vazios x Sucção para os corpos de prova nas 3 condições de moldagem.



Fonte: autor

Os pontos experimentais das curvas de retenção foram ajustados utilizando a proposta de Fredlund e Xing (1994) através de um ajuste visual partindo das propostas iniciais dos parâmetros “a”, “n” e “m” indicados por estes pesquisadores. A opção pelo ajuste visual foi feita em função dos valores discrepantes destes parâmetros obtidos com a aplicação de softwares, apesar dos ajustes serem semelhantes. Os dados dos parâmetros dos ajustes estão apresentados na Tabela 4.5.

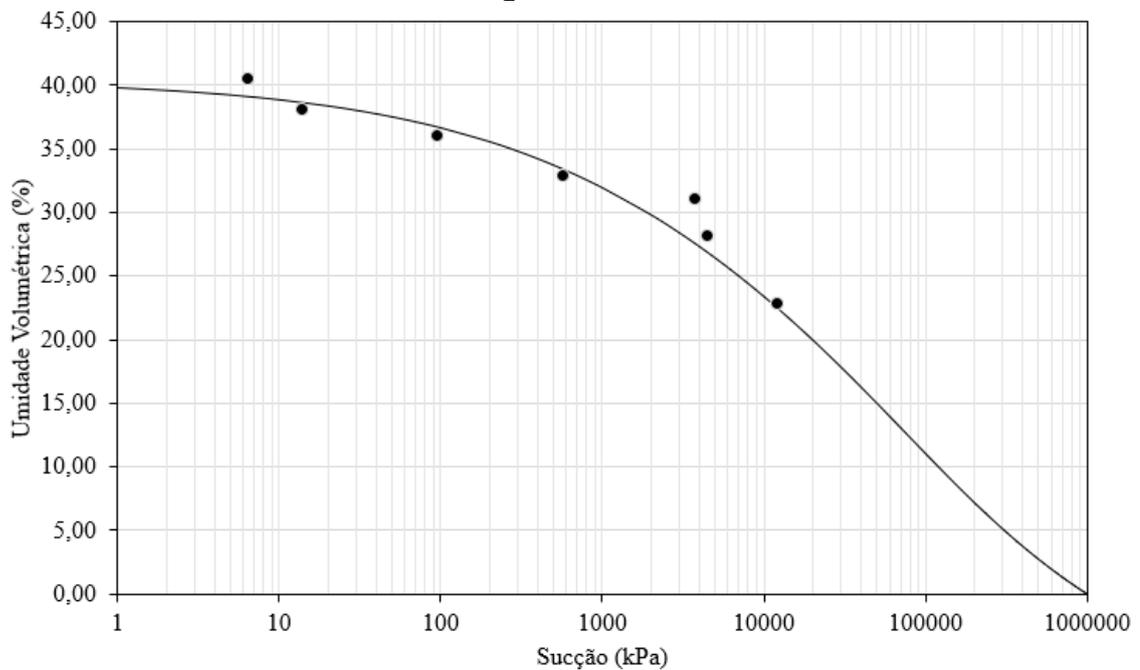
Tabela 4.5 Parâmetros característicos do ajuste da curva de retenção por Fredlund e Xing (1994)

Parâmetros	Ramo Seco	Umidade Ótima	Ramo Úmido
a[kPa]	35000	30000	39833
n	0,4	0,9	1,10
m	3,30	2,5	7,6
θ_s [%]	40,4	37,2	41,61
θ_r [%]	5	5	5

θ_s = Umidade volumétrica saturada, θ_r = Umidade volumétrica residual

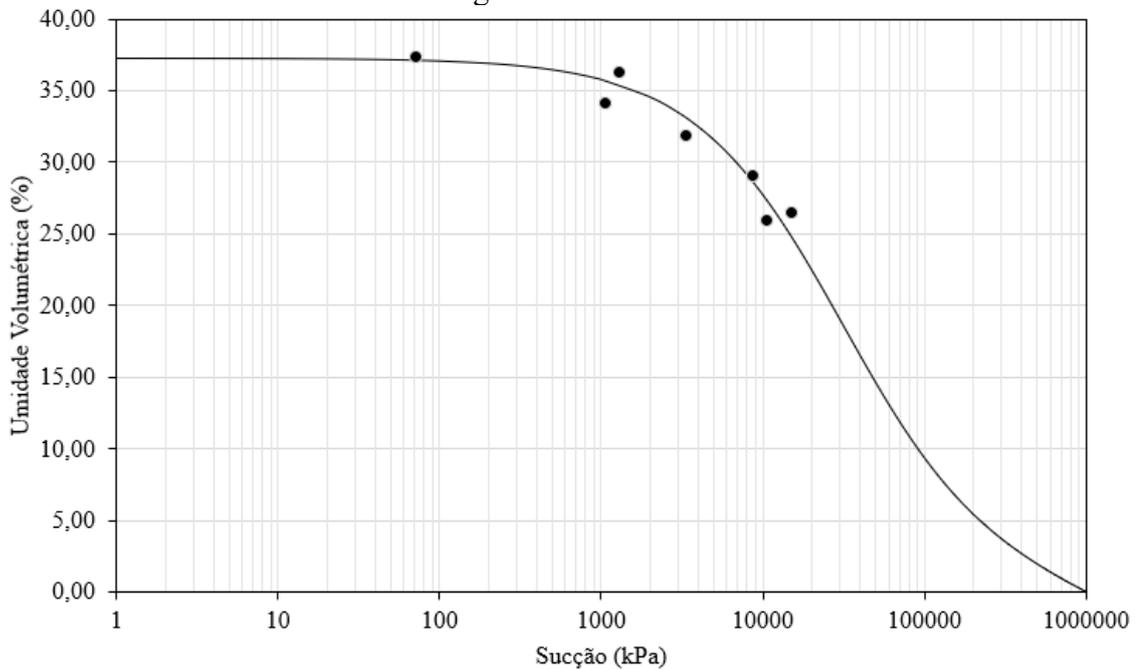
Os pontos experimentais das curvas de retenção e os ajustes obtidos ao se aplicar a equação proposta por Fredlund e Xing (1994), para as 3 condições de moldagem, estão apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, em termos de umidade volumétrica. Uma menor dispersão entre os pontos experimentais e os ajustes obtidos foi observado para as condições de moldagem no ramo úmido.

Figura 4.5 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para a curva de retenção na condição de moldagem Ramo Seco



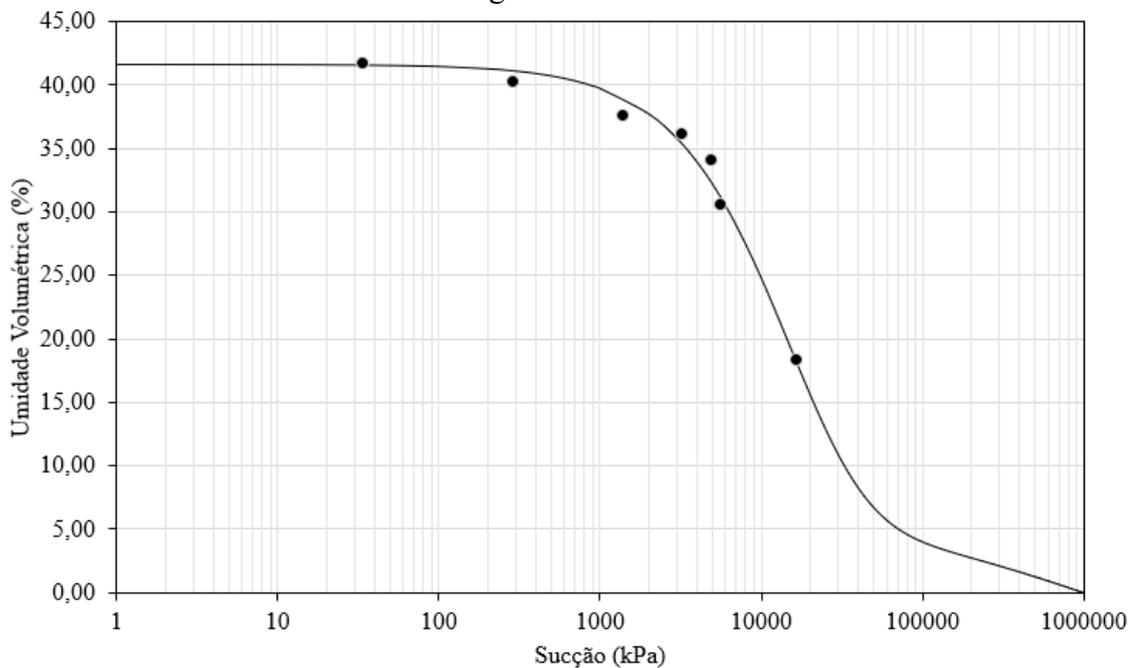
Fonte: autor

Figura 4.6 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para a curva de retenção na condição de moldagem Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.7 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para a curva de retenção na condição de moldagem Ramo Úmido



Fonte: autor

Na Tabela 4.6 estão apresentados os dados de sucção equivalentes ao início de entrada de ar e sucção de início de entrada de ar generalizada que correspondem a cada uma das CRAS.

Esses valores foram determinados graficamente segundo a curva de ajuste de Fredlund e Xing (1994), conforme descrito na Figura 2.4 no tópico 2.2.

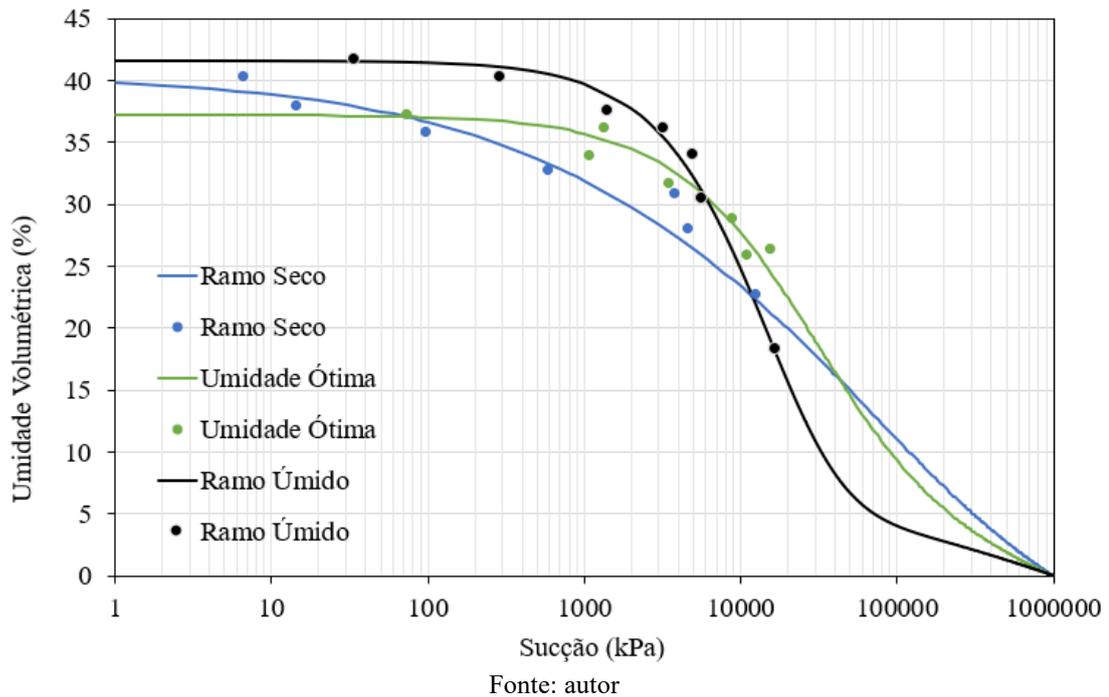
Tabela 4.6 Sucção do início de entrada de ar e sucção de entrada de ar generalizada das curvas de retenção dos 3 pontos de estudo.

Condição de moldagem	ψ_b [kPa]	$\psi_{início}$ [kPa]
Ramo Seco	450	4
Umidade Ótima	3000	100
Ramo Úmido	1500	100

ψ_b corresponde à sucção de entrada de ar generalizada; $\psi_{início}$ sucção de início de entrada de ar

Na Figura 4.8 é feito um comparativo entre as curvas de retenção ajustadas pela proposta de Fredlund e Xing (1994) nas três condições de moldagem. As curvas de retenção de água apresentam formato unimodal. Ao comparar as curvas obtidas nota-se que, apesar de terem sido obtidas com o mesmo solo, elas são diferentes devido às variações nas condições de moldagem. Este comportamento também foi observado por Oliveira (1994) e Pecapedra (2016). Para o solo residual de sienito como mostra a Figura 4.8, a curva característica do ramo Seco dessaturou de forma mais lenta e a entrada de ar ocorre para pequenos valores de sucção. A condição ramo úmido apresenta em relação às outras condições, uma maior capacidade de retenção de água.

Figura 4.8 Ajuste de Fredlund e Xing (1994) para as curvas de retenção nas condições de moldagem Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido



4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Neste item são apresentados os resultados e as interpretações para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto e resistência a compressão simples.

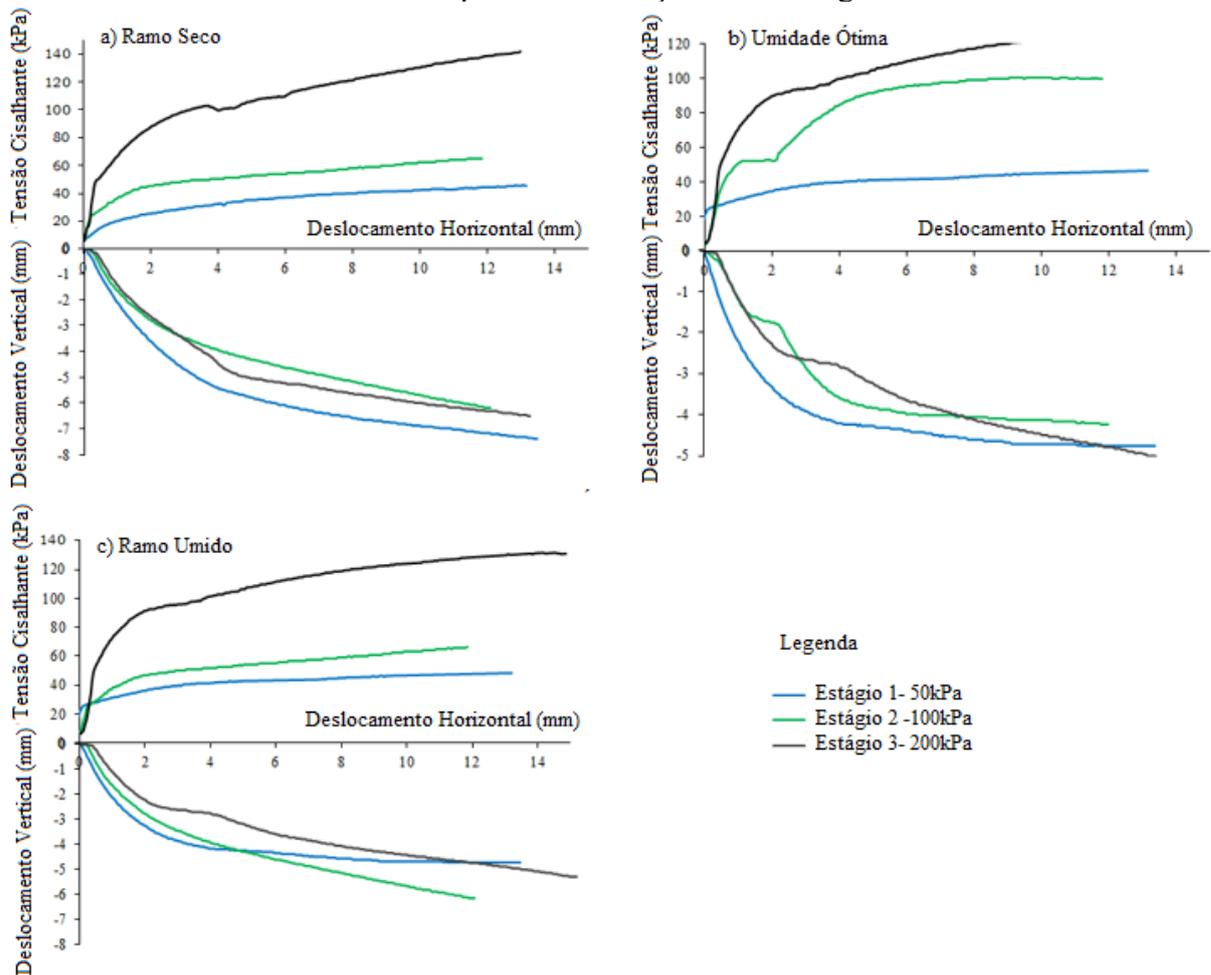
4.4.1 Resistência ao Cisalhamento Direto

Os parâmetros efetivos do solo, coesão e ângulo de atrito efetivos, foram obtidos para as três condições de moldagem indicadas na Tabela 4.2. Estes parâmetros foram determinados em ensaios de cisalhamento direto realizados na condição inundada. Para cada condição de moldagem, ramo seco, umidade ótima e ramo úmido, foram moldados três corpos de prova sendo os mesmos submetidos a tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

Os resultados destes ensaios, plotados em termos de deslocamento horizontal em função da tensão cisalhante, para os três níveis de tensões normais estão apresentados na Figura 4.9. Observa-se que para as três condições de moldagem ocorreu ruptura plástica condizente com argila de baixa consistência. Nota-se que o valor de resistência não é pronunciado, não há

pico, e que o resultado do estágio 2, realizado com tensão normal de 100 kPa, apresenta comportamento atípico para a condição de moldagem na umidade ótima. O deslocamento vertical durante a etapa de cisalhamento indica que ocorreu apenas redução de volume.

Figura 4.9 Curvas de tensão cisalhante e deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal para as 3 condições de moldagem



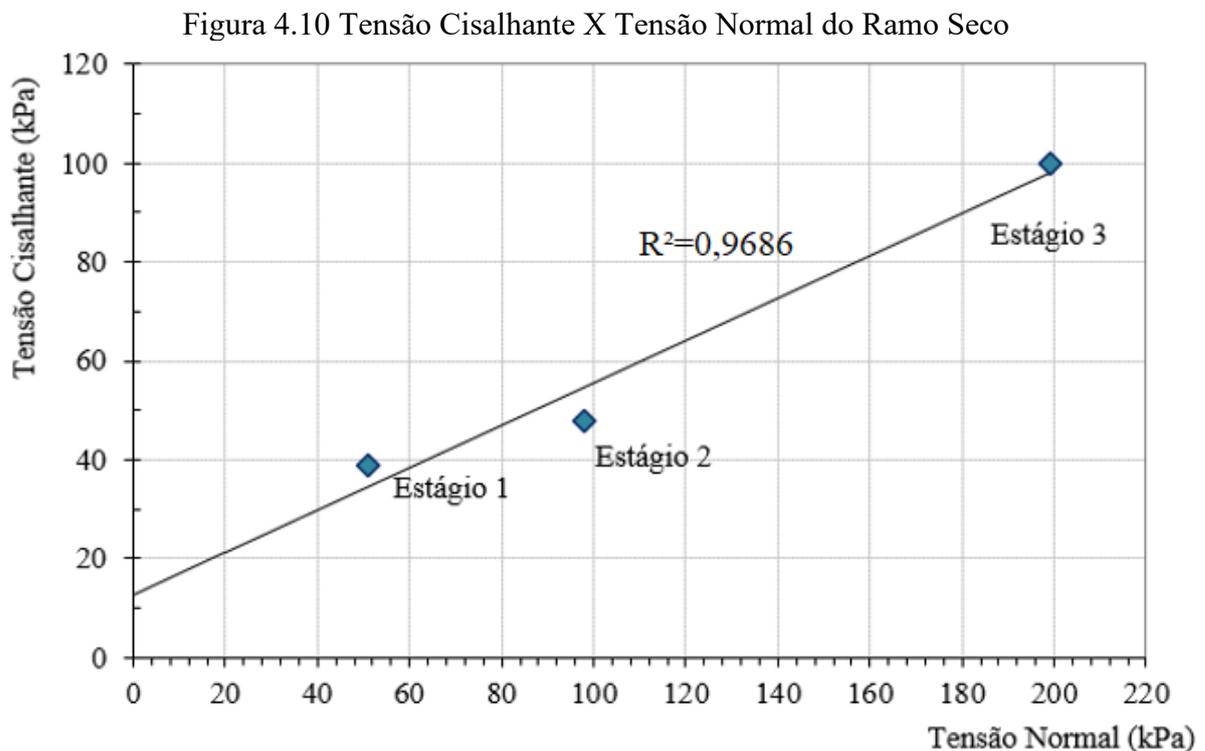
Fonte: autor

Como os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para cada estágio de confinamento, dados por tensão versus deslocamento horizontal, não definem um pico de resistência, foi necessário assumir um critério de ruptura. O critério de Campos e Carrillo (1995) se aplica a estes casos, em que a curva tensão-deformação apresenta inclinação praticamente constante. A Tabela 4.7 e a Figura 4.10 apresentam os dados obtidos para as condições de moldagem no ramo seco ao aplicar o critério de Campos e Carrillo (1995) em cada estágio de

confinamento. Para esta condição de moldagem, o valor de coesão efetiva foi 12,6 kPa e ângulo de atrito efetivo igual a 23,2°.

Tabela 4.7 Resultado cisalhamento direto para o Ramo Seco

	Tensão cisalhante [kPa]	Tensão Normal [kPa]	Coesão Efetiva [kPa]	Ângulo de atrito [°]
Estágio 1	39,00	51,00		
Estágio 2	48,00	97,88	12,6	23,2
Estágio 3	100,00	198,98		



Fonte: autor

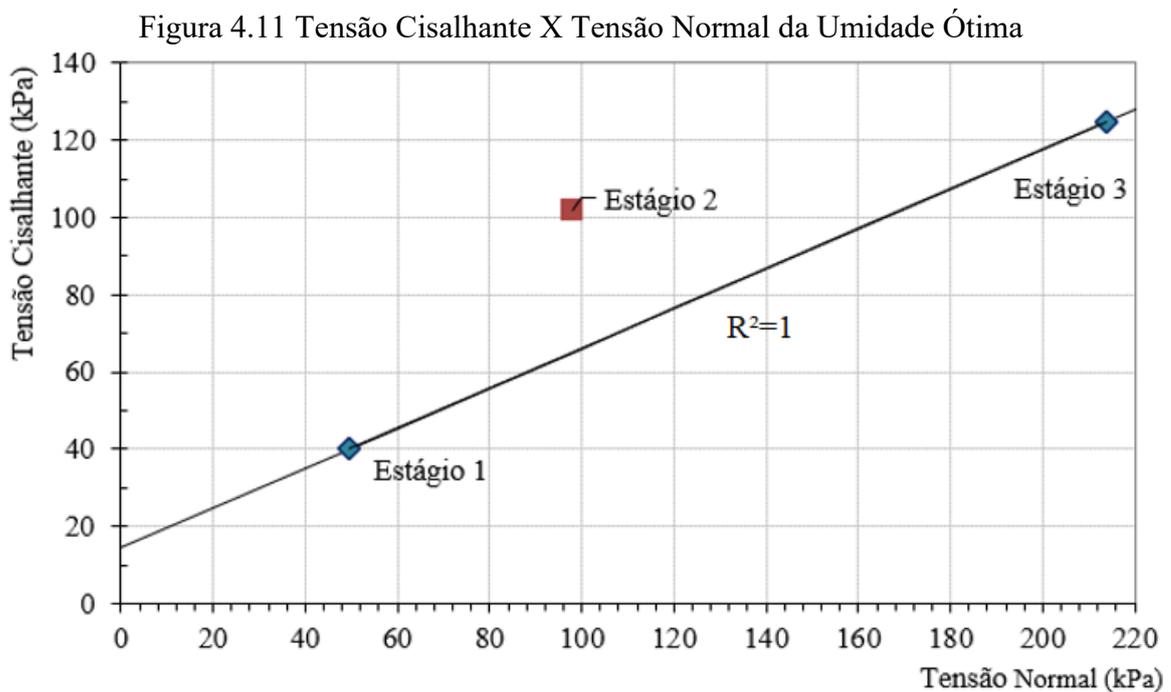
Ao aplicar o critério de ruptura para os corpos de prova compactados nas condições da umidade ótima, os valores obtidos para coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo foram respectivamente 29,6 kPa e 25,4°. Estes valores fornecem um ponto muito fora de tendência, pois o coeficiente de correlação entre os estágios foi baixo. Observando as características do corpo de prova submetido à tensão normal de 100 kPa (Estágio 2), verifica-se que seu índice de vazios ($e=0,89$) é menor do que os outros estágios (Estágio 1, $e=1,16$; Estágio 3, $e=1,13$), portanto, para o estágio 2, o corpo de prova apresenta densidade maior e resistência ao

cisalhamento maior do que o esperado, o ideal seria realizar outro ensaio para o estágio 2, mas algumas dificuldades experimentais impossibilitaram sua execução, assim, optou-se por se obter o valor de coesão e ângulo de atrito com apenas dois pontos. Com o resultado do corpo de prova do estágio 2 desprezado, o valor de coesão e ângulo de atrito são 14,4kPa e 27,3° respectivamente como apresentados na Tabela 4.8. Estes valores são mais coerentes com os valores apresentados para as outras condições de moldagem e será o considerado nesta pesquisa.

Figura 4.11 apresenta o gráfico Tensão cisalhante versus Tensão Normal utilizada para obtenção dos valores de coesão e ângulo de atrito.

Tabela 4.8 Resultado do ensaio de cisalhamento direto para as condições de moldagem na umidade ótima

	Tensão cisalhante [kPa]	Tensão Normal [kPa]	Coesão Efetiva [kPa]	Ângulo de atrito [°]
Estágio 1	40,00	49,53		
Estágio 2	98,00	102,77	14,4	27,3
Estágio 3	125,00	214,00		



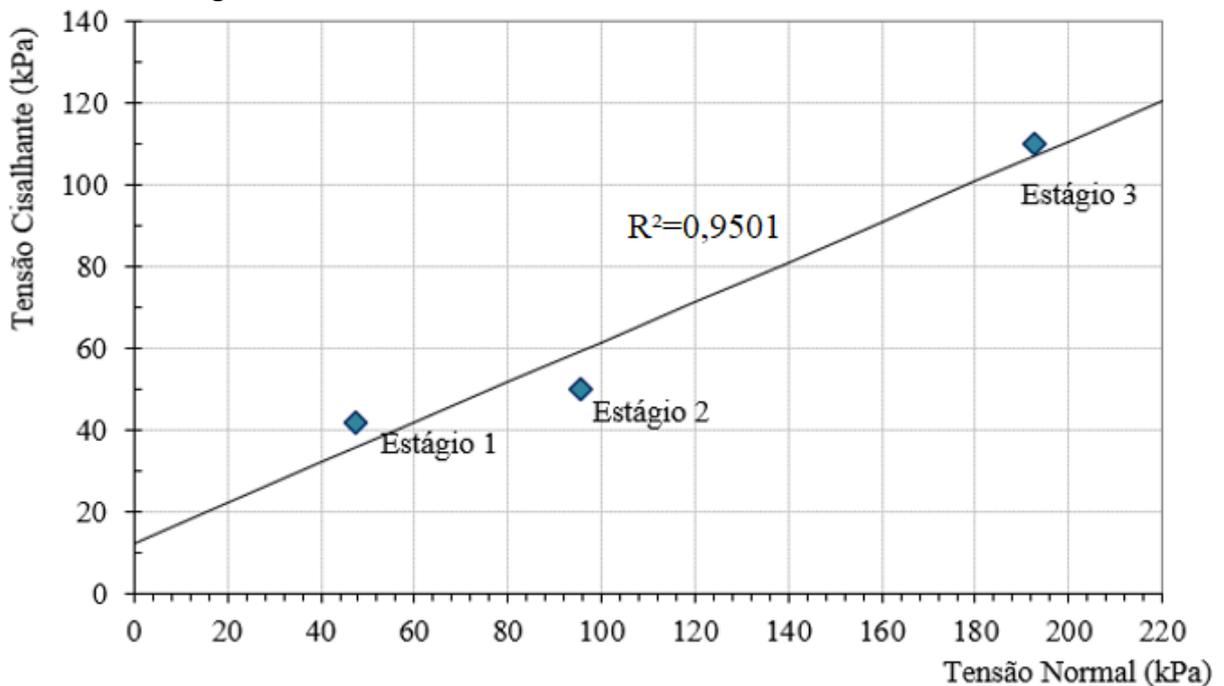
Fonte: autor

O resultado do cisalhamento direto para a condição de moldagem no Ramo Úmido está apresentado na Tabela 4.9 e na Figura 4.12. Os valores de coesão efetiva e ângulo de atrito foram respectivamente 12,6 kPa e 26,1 °.

Tabela 4.9 Resultado cisalhamento direto para o Ramo Úmido

	Tensão cisalhante [kPa]	Tensão Normal [kPa]	Coesão Efetiva [kPa]	Ângulo de atrito [°]
Estágio 1	42,00	47,30		
Estágio 2	50,00	95,70	12,6	26,1
Estágio 3	110,00	192,60		

Figura 4.12 Tensão Cisalhante X Tensão Normal do Ramo Úmido



Fonte: autor

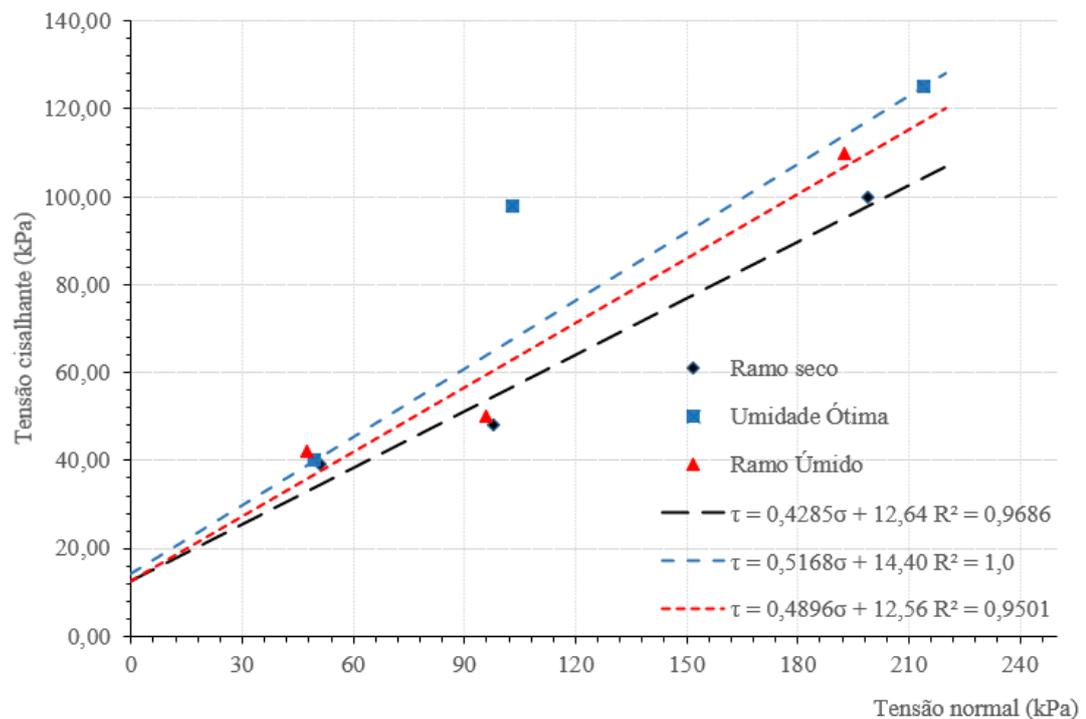
A Tabela 4.10 e a Figura 4.13 apresentam o resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Pode-se observar que os três conjuntos de ensaios apresentaram valores próximos de ângulo de atrito e coesão efetiva. A coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo das condições de moldagem na umidade ótima apresentaram valores maiores, indicando ser a

condições de moldagem que fornece a maior resistência ao cisalhamento para um valor qualquer de tensão normal.

Tabela 4.10 Resultado dos ensaios de cisalhamento direto

Condição de moldagem	Ângulo de atrito [°]	Coesão efetiva [kPa]
Ramo Seco	23,2	12,6
Ponto Ótimo	27,3	14,4
Ramo Úmido	26,1	12,6

Figura 4.13 Tensão cisalhante em função da tensão normal para as 3 condições de moldagem

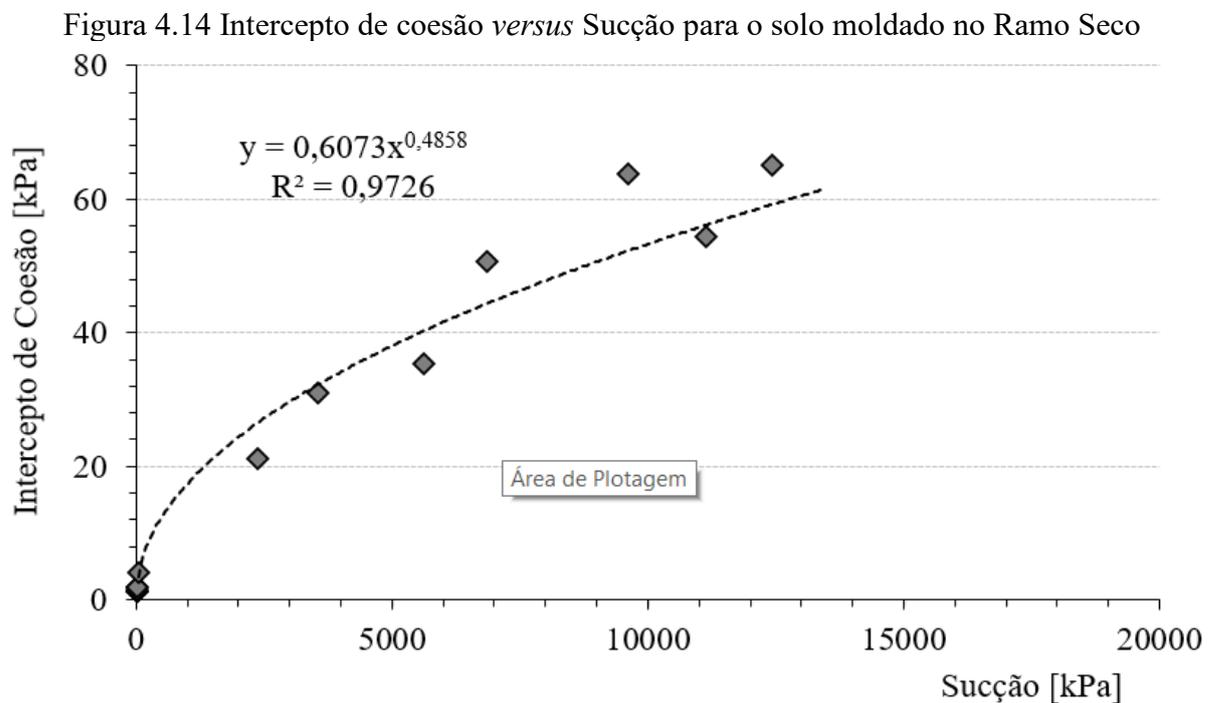


Fonte: autor

No estudo de Carvalho (2006), realizado em um solo residual Sienito, com o ensaio triaxial CIU em amostras indeformadas o ângulo de atrito e coesão efetiva obtidos foram, respectivamente $35,38^\circ$ e 9,2 kPa. A diferença entre os valores do autor e os obtidos neste trabalho está relacionada ao fato de que os solos foram ensaiados com diferentes condições de moldagem. O autor utilizou amostras indeformadas ao passo que neste estudo as amostras foram compactadas.

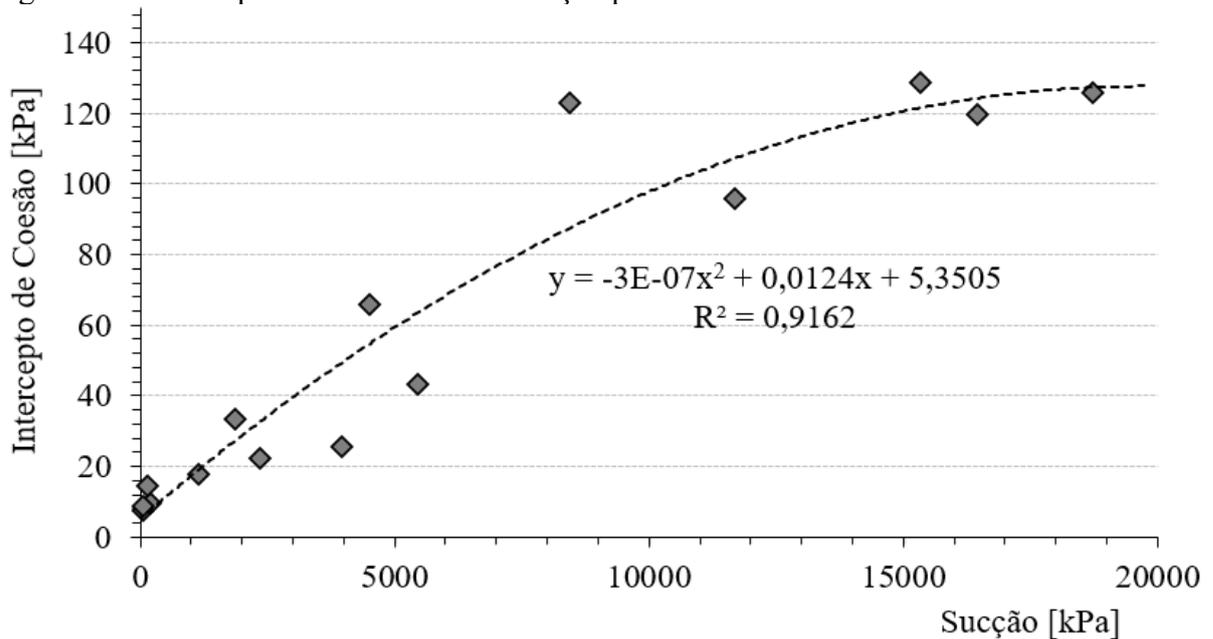
4.4.2 Intercepto de Coesão

Em solos não saturados, o intercepto de coesão é a parcela responsável pelo acréscimo de resistência. Para determinar o intercepto de coesão neste trabalho, admitiu-se o ângulo de atrito constante. A influência da parcela de sucção no intercepto de coesão pode ser verificada nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 através dos gráficos intercepto de coesão versus sucção para as três diferentes condições de moldagem.



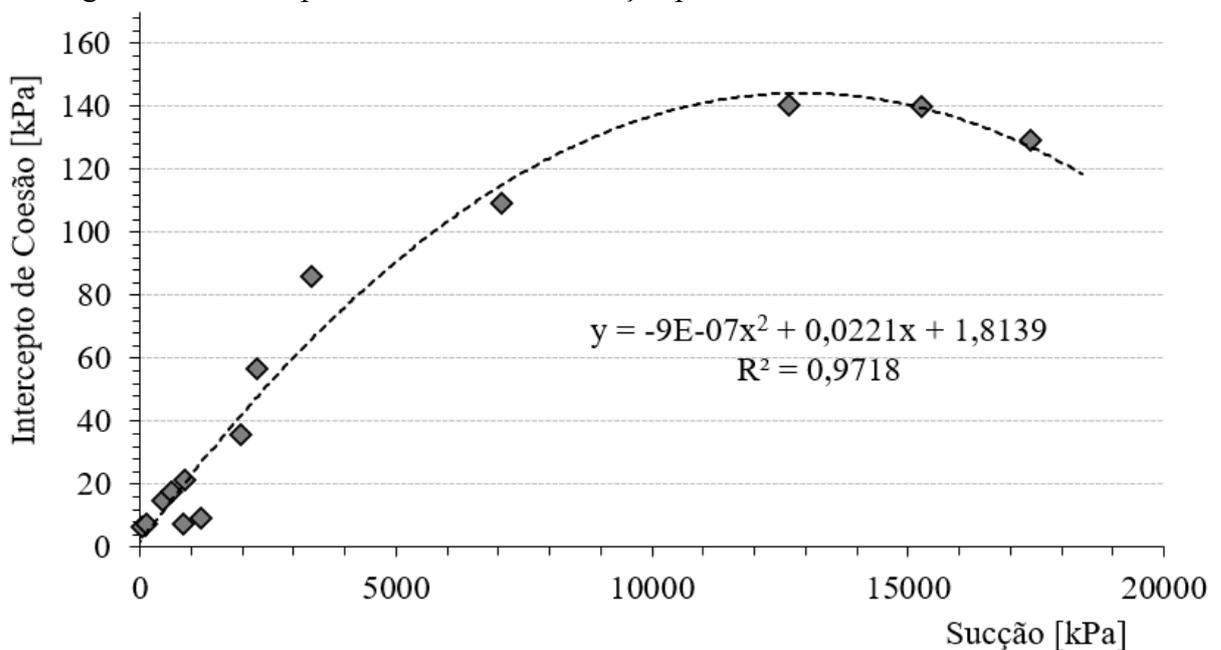
Fonte: autor

Figura 4.15 Intercepto de coesão *versus* Sucção para o solo moldado na Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.16 Intercepto de coesão *versus* Sucção para o solo moldado no Ramo Úmido



Fonte: autor

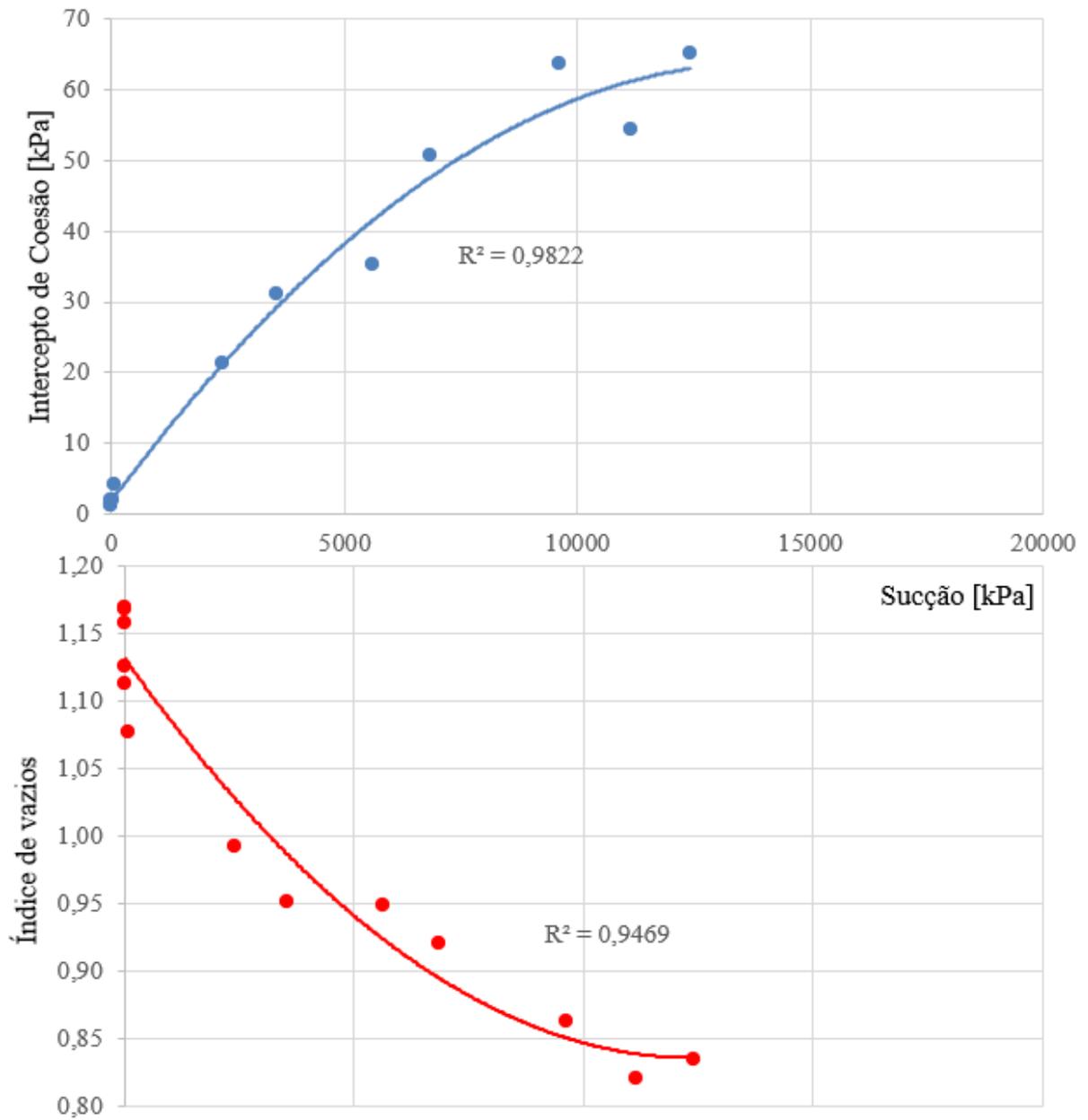
Pode-se verificar que após os valores de sucção de início de entrada de ar, a resistência cresce de forma não linear. A partir da análise dos gráficos, percebe-se que o acréscimo de resistência em função do aumento da sucção possui tendência a ocorrer em forma de potência. Os CPs moldados no Ramo Seco apresentaram menor acréscimo de resistência. Os valores da

coesão efetiva são superados quando os valores de sucção ultrapassam 64kPa no Ramo Seco, 150 kPa no Ponto ótimo e 445 kPa no Ramo úmido.

O incremento da resistência ocorreu a uma taxa elevada para baixos valores de sucção. Esse incremento foi reduzindo à medida que os valores de sucção foram aumentando. A queda na taxa de incremento da resistência ocorreu para elevados valores de sucção, chegando próximos a 10000 kPa. Neste ponto, a sucção passa a influenciar menos no ganho de resistência. Esse comportamento está de acordo com o que é indicado por Escário e Juca (1989) para solos com alta porcentagem de finos, como o solo em estudo. Nesse cenário, as condições de moldagem apresentaram um comportamento distinto. As condições Ramo Seco e Umidade Ótima apresentam tendência a estabilizar, enquanto o Ramo Úmido apresentou uma tendência maior a diminuir a resistência com o aumento da sucção.

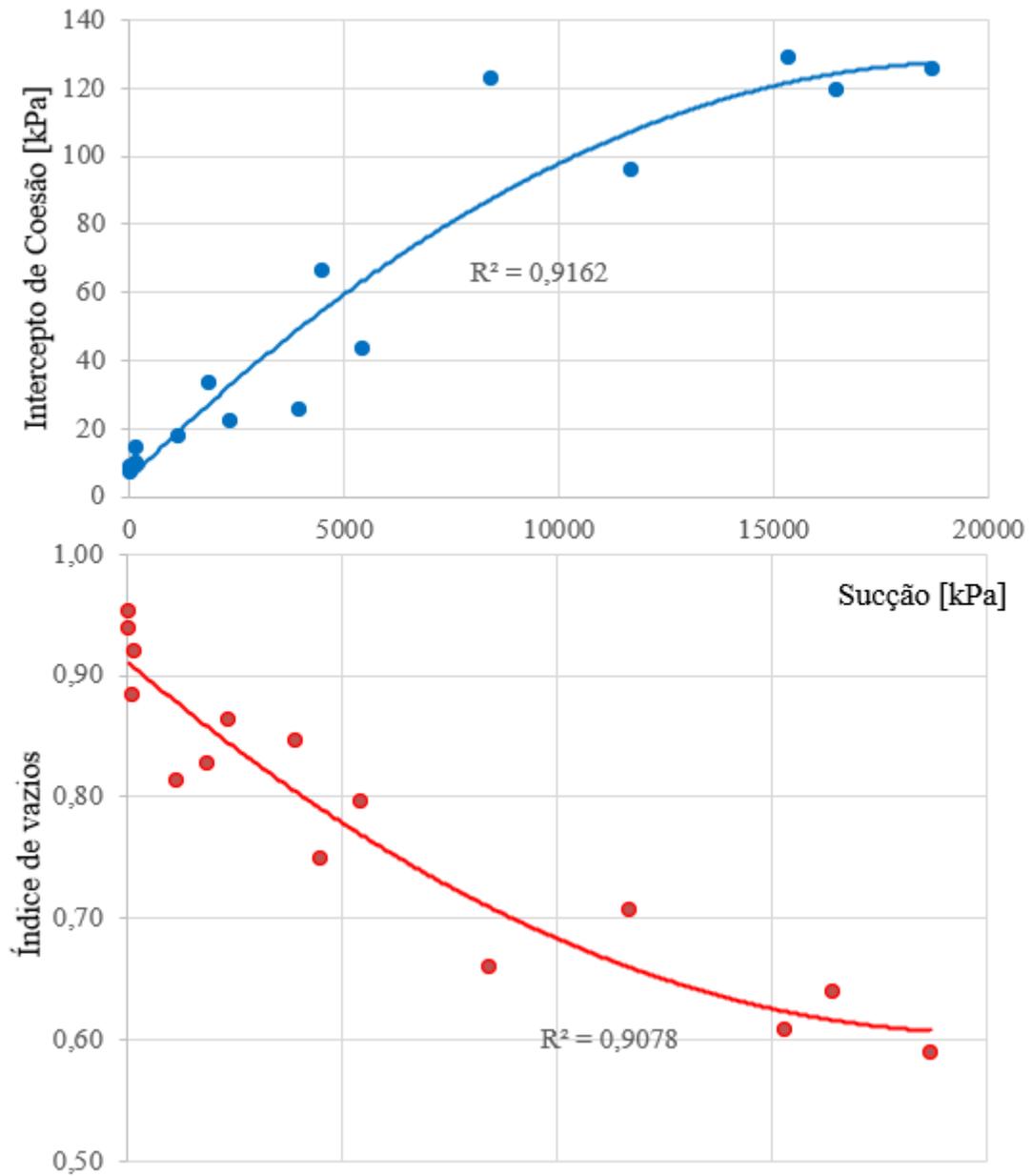
A variação volumétrica em função da sucção pode ser observada nos gráficos das Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 com base no índice de vazios. É possível perceber a tendência dos CPs a diminuir os índices de vazios à medida que são submetidos a sucções maiores. Essa tendência pode ser relacionada à variação do volume dos CPs após o procedimento de secagem/umedecimento a que foram submetidos durante a sua preparação.

Figura 4.17 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as condições de moldagem no Ramo Seco



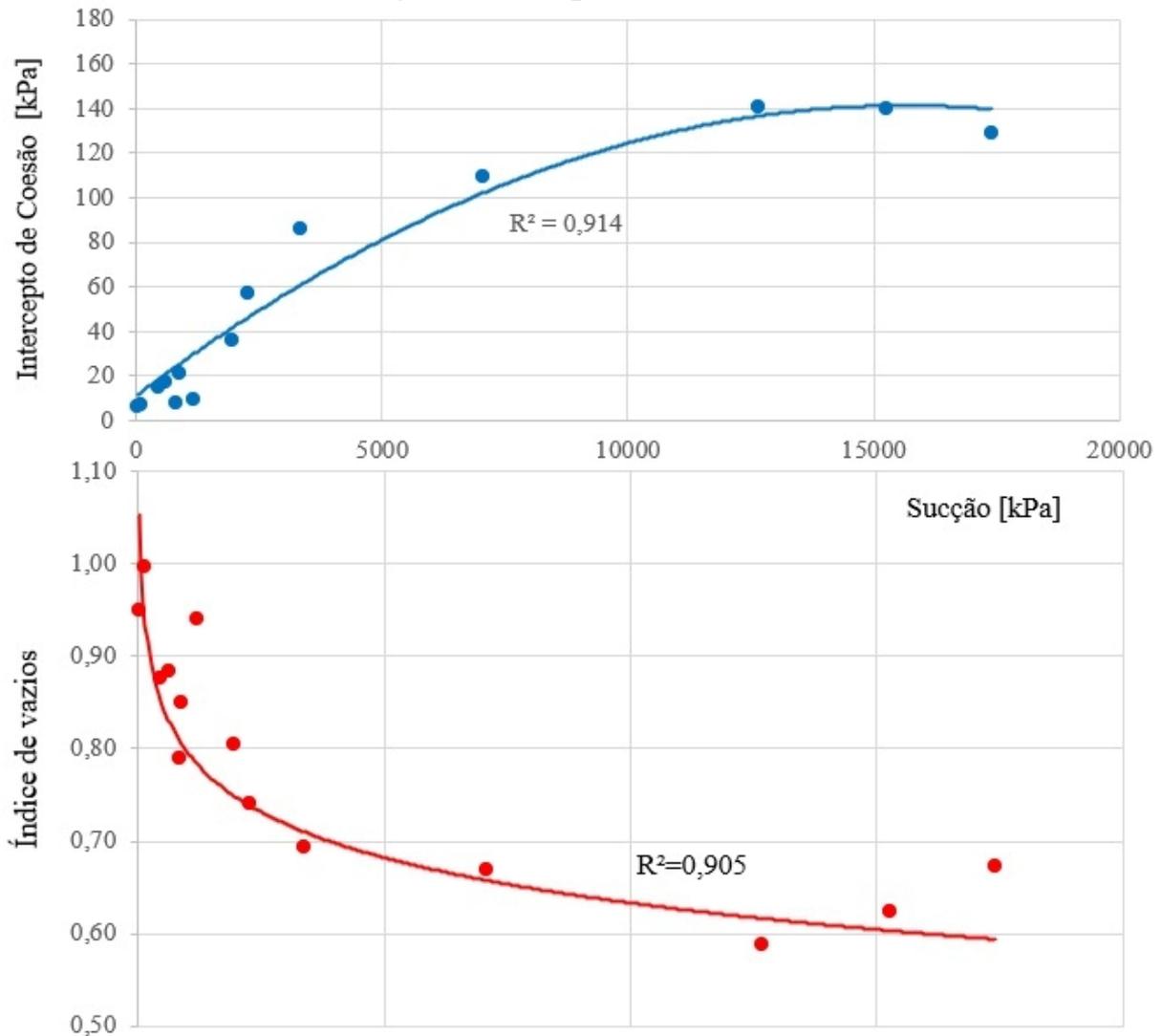
Fonte: autor

Figura 4.18 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as condições de moldagem na Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.19 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as condições de moldagem no Ramo Úmido



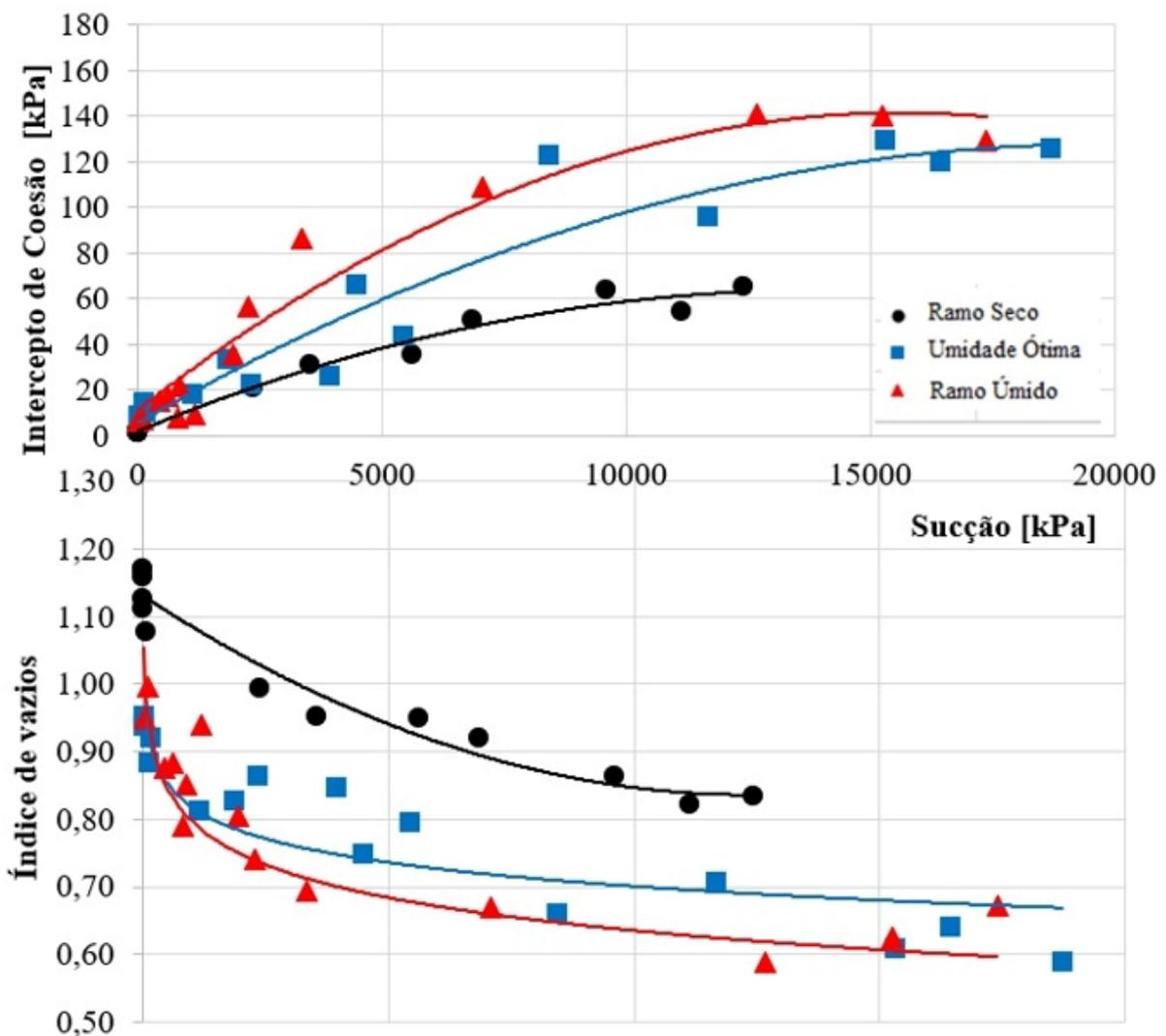
Fonte: autor

Na Figura 4.20, os resultados mostram valores superiores de resistência para a condição de moldagem no Ramo Úmido. Os solos moldados no Ramo Seco apresentaram comportamento inferior de resistência para os mesmos valores de sucção das outras condições de moldagem. Os valores de resistência alcançaram 64kPa, 128 k/Pa e 141kPa para as condições Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido respectivamente. Após estes valores, observa-se uma tendência a estabilização da resistência ao cisalhamento e da variação volumétrica. Ao comparar estes resultados com as CRAS (Figura 4.8), verifica-se que a sucção a qual ocorre a

tendência a estabilização da resistência e da variação volumétrica corresponde aproximadamente à sucção do ponto de inflexão das curvas de retenção.

Confrontando os gráficos do Intercepto de coesão e índice de vazios, observa-se que a partir do valor máximo de resistência, o índice de vazios passa a não reduzir com o aumento da sucção, ou seja, a sucção não exerce mais influência na resistência. Este fato pode melhor ser observado na condição Ramo Úmido, na qual o decréscimo na curva é mais acentuado. O mesmo comportamento foi observado por Oliveira e Marinho (2015) ao analisar o comportamento de um solo residual de gnaíse, em que a resistência ao cisalhamento tendeu a estabilizar em valores de sucção superiores a 1000kPa.

Figura 4.20 Intercepto de coesão e variação do índice de vazios em função da sucção para as três condições de moldagem em estudo



Fonte: autor

4.4.3 Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em corpos de prova moldados nas três condições de moldagem indicadas na Tabela 4.2. Para cada condição de moldagem foram rompidos 15 corpos de prova, totalizando assim, 45 CPs. Destes, 3 foram excluídos por apresentarem defeito. Nas Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 estão apresentados dados como: densidade seca (ρ_d), volume (V), índice de vazios (e), umidade (W), grau de saturação (S), umidade volumétrica (θ) e a indicação de qual trajetória de Secagem (S) ou Umedecimento (U). O corpo de prova foi submetido na preparação e moldagem dos CPs. Já os resultados do ensaio estão apresentados nas Tabelas 4.14, 4.15 e 4.16.

Tabela 4.11 Dados de moldagem e preparação dos CPs no Ramo Seco para ensaio de compressão Simples com Sucção.

Umidade	Corpo de prova	Dados Moldagem					Dados Preparação						
		ρ_d [g/cm ³]	V (cm ³)	S [%]	e	W [%]	Traj.	W [%]	ρ_d [g/cm ³]	S [%]	e	θ [%]	Sucção
Ramo Seco	CP1	1,34	89,02	69,15	0,98	25,55	S	23,41	1,36	65,18	0,95	31,79	3543,54
	CP2	1,32	90,61	66,76	1,01	25,55	U	35,89	1,22	81,32	1,17	43,84	4,44
	CP3	1,33	89,72	67,82	1,00	25,55	U	32,26	1,25	76,86	1,11	40,47	5,74
	CP4	1,32	90,58	66,70	1,02	25,55	U	36,74	1,22	83,37	1,17	44,91	3,17
	CP5	1,31	91,14	66,09	1,02	25,55	U	33,45	1,23	76,59	1,16	41,09	7,98
	CP6	1,31	90,98	66,11	1,02	25,55	U	30,05	1,25	70,74	1,13	37,46	16,34
	CP7	1,33	89,59	67,89	1,00	25,55	U	28,06	1,28	69,07	1,08	35,81	56,68
	CP9	1,33	89,99	68,24	0,99	25,55	U	24,28	1,33	64,81	0,99	32,29	2377,60
	CP10	1,33	89,74	67,93	1,00	25,55	S	22,11	1,36	61,77	0,95	30,07	5622,05
	CP11	1,31	90,92	66,56	1,02	25,55	S	20,55	1,38	59,17	0,92	28,36	6857,31
	CP12	1,31	90,79	66,59	1,02	25,55	S	18,15	1,42	55,75	0,86	25,82	9614,78
	CP13	1,31	90,73	66,63	1,02	25,55	S	16,68	1,44	52,94	0,84	24,09	12423,91
	CP14	1,32	90,48	67,37	1,00	25,55	S	13,61	1,46	43,93	0,82	19,80	11149,23

Onde ρ_d = densidade seca do CP, V = volume, e = índice de vazios, W = umidade, S = grau de saturação, θ = umidade volumétrica

Tabela 4.12 Dados de moldagem e preparação dos CPs na Umidade Ótima para ensaio de compressão Simples com Sucção.

Umidade	Corpo de prova	Dados Moldagem					Dados Preparação						
		ρ_d [g/cm ³]	V (cm ³)	S [%]	e	W [%]	Traj.	W [%]	ρ_d [g/cm ³]	S [%]	e	θ [%]	Sucção [kPa]
Umidade Ótima	CP1	1,38	90,47	86,96	0,92	30,29	U	30,45	1,37	86,04	0,94	41,64	37,44
	CP2	1,39	89,36	88,77	0,90	30,29	U	30,44	1,38	87,71	0,92	42,02	186,28
	CP3	1,38	89,80	87,83	0,91	30,29	U	32,60	1,36	90,64	0,95	44,23	48,27
	CP4	1,40	88,12	90,57	0,89	30,29	U	29,17	1,41	87,51	0,88	41,04	150,19
	CP5	1,39	89,62	88,34	0,91	30,29	S	22,93	1,46	74,79	0,81	33,53	1155,51
	CP6	1,39	89,64	88,41	0,91	30,29	S	26,93	1,42	82,67	0,86	38,30	2344,10
	CP7	1,38	90,36	87,01	0,92	30,29	S	26,54	1,43	83,05	0,85	38,08	3948,63
	CP8	1,39	89,80	88,18	0,91	30,29	S	26,06	1,45	83,45	0,83	37,79	1867,53
	CP9	1,39	89,72	88,13	0,91	30,29	S	24,54	1,48	81,71	0,80	36,21	5450,36
	CP10	1,38	90,12	87,21	0,92	30,29	S	22,79	1,52	80,62	0,75	34,52	4496,19
	CP11	1,37	90,70	86,17	0,93	30,29	S	20,53	1,55	76,94	0,71	31,87	11682,51
	CP12	1,38	90,35	86,73	0,93	30,29	S	17,90	1,60	71,93	0,66	28,58	8438,64
	CP13	1,39	89,80	87,98	0,91	30,29	S	16,07	1,62	66,53	0,64	25,96	16460,85
	CP14	1,39	89,59	88,26	0,91	30,29	S	14,48	1,67	65,18	0,59	24,16	18724,59
	CP15	1,40	90,19	89,46	0,90	30,29	S	12,00	1,65	52,32	0,61	19,78	15339,36

Onde ρ_d = densidade seca do CP, V= volume, e = índice de vazios, W= umidade, S= grau de saturação, θ = umidade volumétrica

Tabela 4.13 Dados de moldagem e preparação dos CPs no Ramo Úmido para ensaio de compressão Simples com Sucção

Umidade	Corpo de prova	Dados Moldagem					Dados Preparação						
		ρ_d [g/cm ³]	V (cm ³)	S [%]	e	W [%]	Traj.	W [%]	ρ_d [g/cm ³]	S [%]	e	θ [%]	Sucção [kPa]
Ramo Úmido	CP1	1,34	89,32	94,81	0,98	35,11	U	32,94	1,36	91,82	0,95	44,75	26,21
	CP2	1,33	89,80	93,46	1,00	35,11	S	32,46	1,33	86,27	1,00	43,07	114,62
	CP3	1,33	90,62	93,29	1,00	35,11	S	21,74	1,48	73,04	0,79	32,21	833,89
	CP4	1,33	89,40	93,99	0,99	35,11	S	52,07	1,18	110,41	1,25	61,33	1182,33
	CP5	1,34	89,80	94,58	0,98	35,11	S	29,20	1,41	88,30	0,88	41,24	445,03
	CP6	1,33	90,09	93,35	1,00	35,11	S	28,31	1,41	84,91	0,88	39,83	614,03
	CP7	1,33	90,03	93,40	1,00	35,11	S	27,49	1,43	85,63	0,85	39,36	874,89
	CP8	1,33	90,60	93,50	1,00	35,11	S	25,99	1,47	85,67	0,80	38,18	1953,81
	CP9	1,36	90,48	97,43	0,96	35,11	S	24,14	1,52	86,36	0,74	36,75	2278,20
	CP10	1,34	89,57	95,56	0,97	35,11	S	22,07	1,56	84,30	0,69	34,53	3355,08
	CP11	1,33	89,35	94,39	0,99	35,11	S	19,64	1,59	77,83	0,67	31,19	7071,38
	CP12	1,34	90,11	94,64	0,98	35,11	S	18,74	1,63	79,56	0,62	30,57	15252,12
	CP14	1,34	89,78	94,59	0,98	35,11	S	13,79	1,67	62,16	0,59	23,01	12680,25
	CP15	1,34	89,84	93,84	0,99	35,11	S	12,12	1,67	47,80	0,67	19,21	17391,05

Onde ρ_d = densidade seca do CP, V= volume, e = índice de vazios, W= umidade, S= grau de saturação, θ = umidade volumétrica

Tabela 4.14 Resultado do ensaio de compressão Simples dos CPs no Ramo Seco

CP	Sucção [kPa]	Deformação específica ϵ_r [%]	Tensão axial σ_1 [kPa]	Intercepto de Coesão [kPa]	Módulo E [MPa]	Índice de vazios e
01	3.543,54	2,18	94,03	31,00	5,556	0,952
02	4,44	0,85	3,92	1,29	0,817	1,170
03	5,74	0,93	5,84	1,93	0,939	1,112
04	3,17	0,85	3,43	1,13	0,432	1,168
05	7,98	0,91	4,29	1,42	0,817	1,157
06	16,34	0,49	5,90	1,94	1,515	1,126
07	56,68	1,24	12,56	4,14	1,258	1,077
09	2.377,60	1,83	64,28	21,19	4,805	0,993
10	5.622,05	2,17	107,27	35,37	5,557	0,949
11	6.857,31	2,78	153,59	50,64	6,412	0,920
12	9.614,78	3,32	193,45	63,78	6,402	0,863
13	12.423,91	1,54	197,38	65,07	14,967	0,835
14	11.149,23	2,71	165,19	54,46	6,689	0,821

Tabela 4.15 Resultado do ensaio de compressão Simples dos CPs moldados nas condições da Umidade Ótima

CP	Sucção [kPa]	Deformação específica ϵ_r [%]	Tensão axial σ_1 [kPa]	Intercepto de Coesão [kPa]	Módulo E [MPa]	Índice de vazios (e)
01	37,44	1,37	24,04	7,32	2,432	0,938
02	186,28	1,83	32,00	9,75	3,228	0,920
03	48,27	1,51	28,29	8,62	3,436	0,953
04	150,19	1,87	47,09	14,34	4,465	0,883
05	1155,51	2,48	58,89	17,94	5,080	0,813
06	2344,10	2,80	73,40	22,36	5,109	0,863
07	3948,63	2,54	84,07	25,61	5,684	0,847
08	1867,53	3,33	110,21	33,57	5,864	0,828
09	5450,36	3,40	141,92	43,23	6,324	0,796
10	4496,19	4,33	216,76	66,03	6,681	0,749
11	11682,51	5,55	314,68	95,85	6,886	0,707
12	8438,64	6,18	402,99	122,75	8,838	0,659
13	16460,85	4,91	392,21	119,47	10,841	0,640
14	18724,59	5,70	412,46	125,64	8,829	0,589
15	15339,36	5,24	423,15	128,89	9,561	0,608

Tabela 4.16 Resultado do ensaio de compressão Simples dos CPs no Ramo Úmido

CP	Sucção [kPa]	Deformação específica ε_r [%]	Tensão axial σ_1 [kPa]	Intercepto de Coesão [kPa]	Módulo E [MPa]	Índice de vazios e
01	26,21	2,79	20,64	6,44	2,416	0,951
02	114,62	2,55	23,12	7,21	3,103	0,997
03	833,89	2,40	24,19	7,54	3,288	0,789
04	1182,33	2,80	30,29	9,45	3,242	0,940
05	445,03	3,32	47,54	14,82	3,462	0,876
06	614,03	3,58	55,98	17,46	3,883	0,884
07	874,89	3,06	68,66	21,41	4,874	0,851
08	1953,81	4,31	114,22	35,62	5,268	0,804
09	2278,20	5,68	182,14	56,80	5,592	0,741
10	3355,08	6,48	275,92	86,04	6,198	0,694
11	7071,38	6,12	349,78	109,07	6,404	0,669
12	15252,12	7,35	448,61	139,89	7,922	0,624
14	12680,25	6,03	450,77	140,56	8,383	0,588
15	17391,05	5,10	413,91	129,07	9,575	0,672

O aumento da rigidez da amostra influenciado pela sucção é observado na Figura 4.21, quando o módulo de elasticidade aumenta com o incremento da sucção. Quando comparado com as outras condições de moldagem, o Ramo Seco apresenta para o mesmo valor de sucção menor deformação específica axial antes da ruptura. O mesmo comportamento foi observado por Pecapedra (2016), ao realizar o ensaio de compressão simples em diferentes condições de moldagem dos solos residuais de diabásio e granito.

Figura 4.21 Módulo de elasticidade e deformação específica em função da sucção dos corpos de prova moldados no Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido

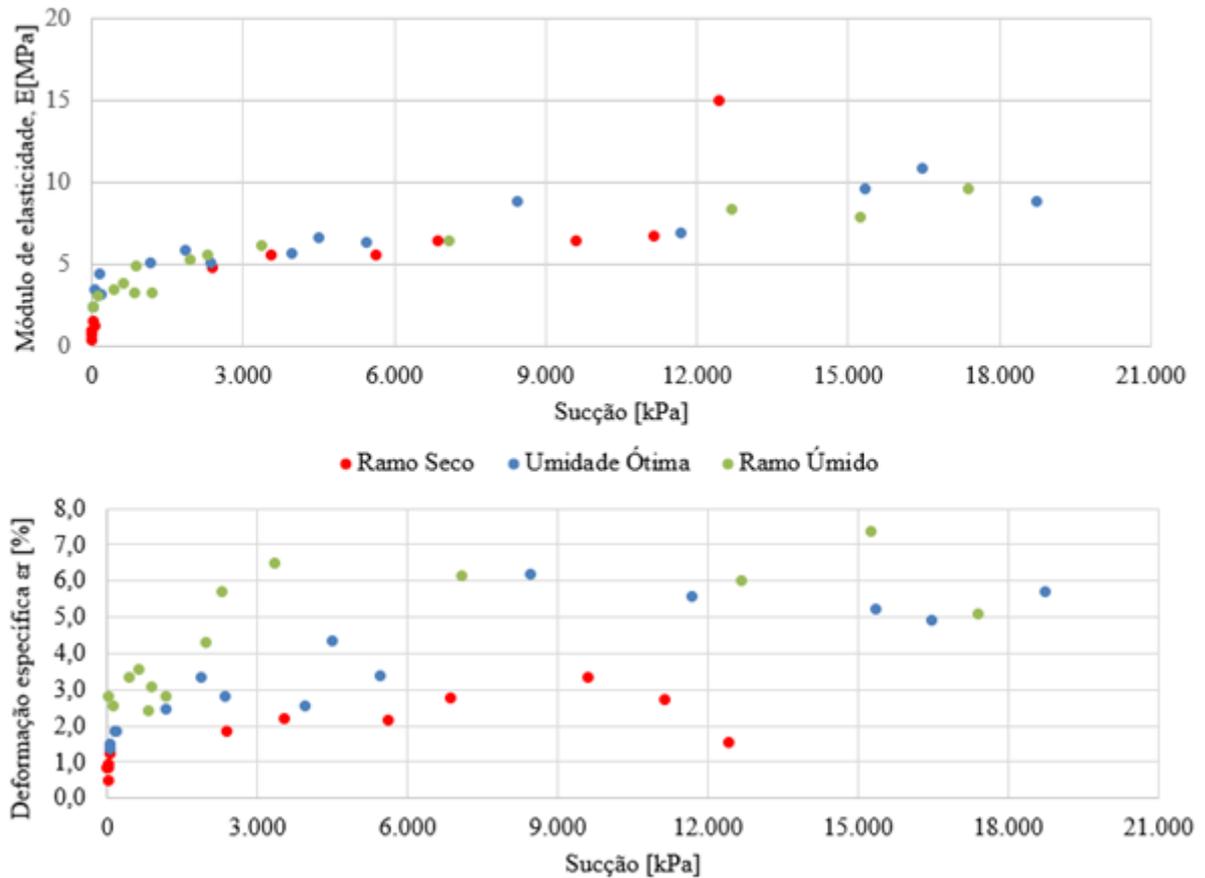
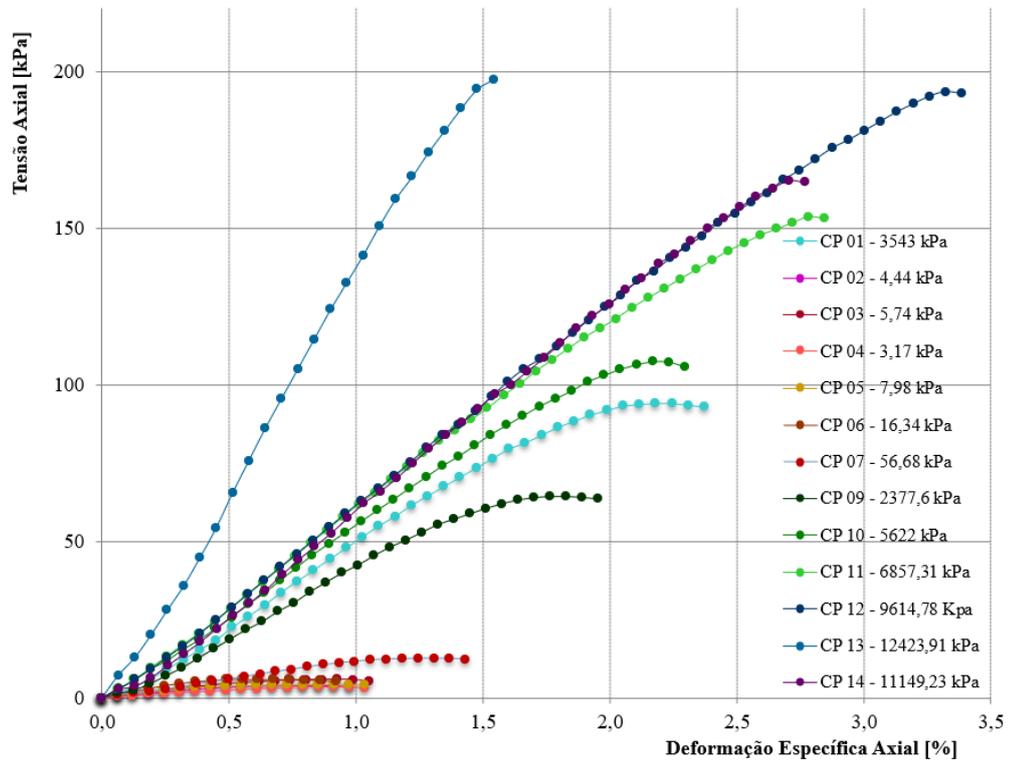
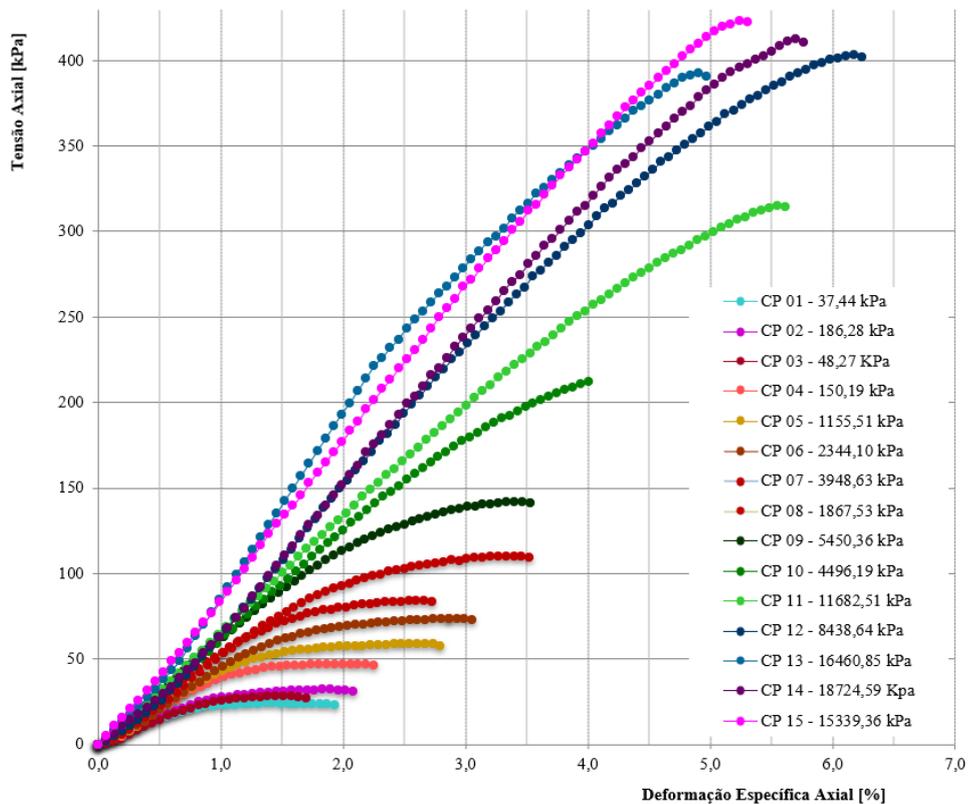


Figura 4.22 Tensão axial versus deformação específica para o solo moldado no Ramo seco.



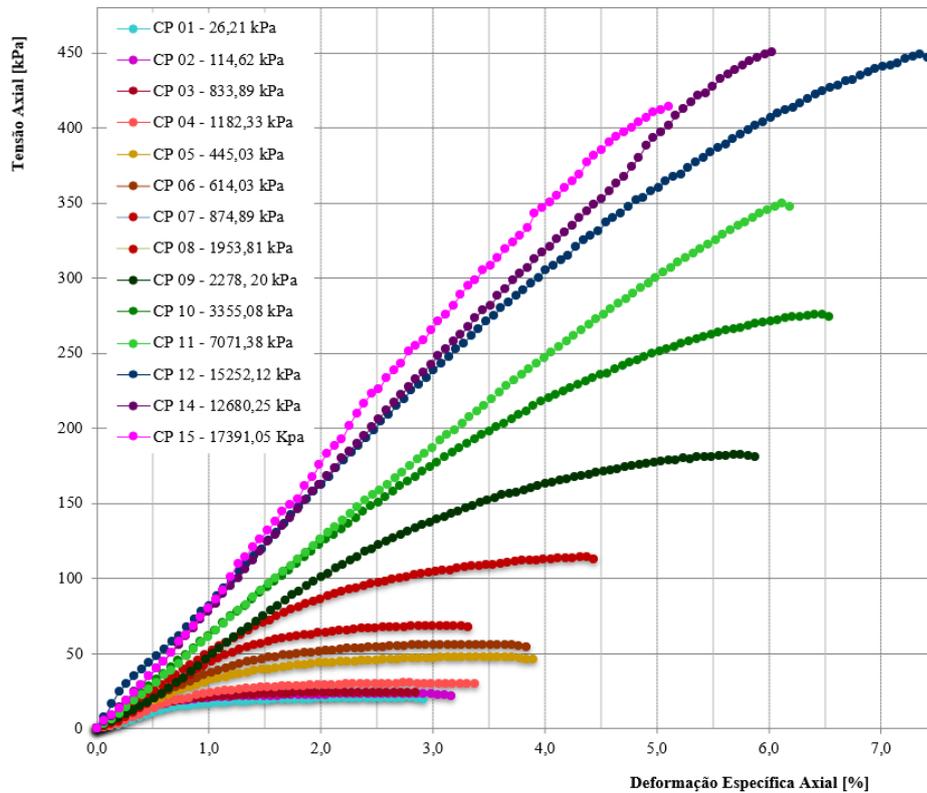
Fonte: autor

Figura 4.23 Tensão axial versus deformação específica para o solo moldado na Umidade Ótima.



Fonte: autor

Figura 4.24 Tensão axial versus deformação específica para o solo moldado no Ramo Úmido.



Fonte: autor

Para a mesma umidade de compactação e para o mesmo material, é interessante acompanhar os efeitos da variação no estado de tensões sobre o modo como as amostras se deformam. Durante os ensaios foram feitos registros fotográficos que permitiram avaliar o comportamento do solo conforme a trajetória estabelecida de acordo com os perfis de ruptura.

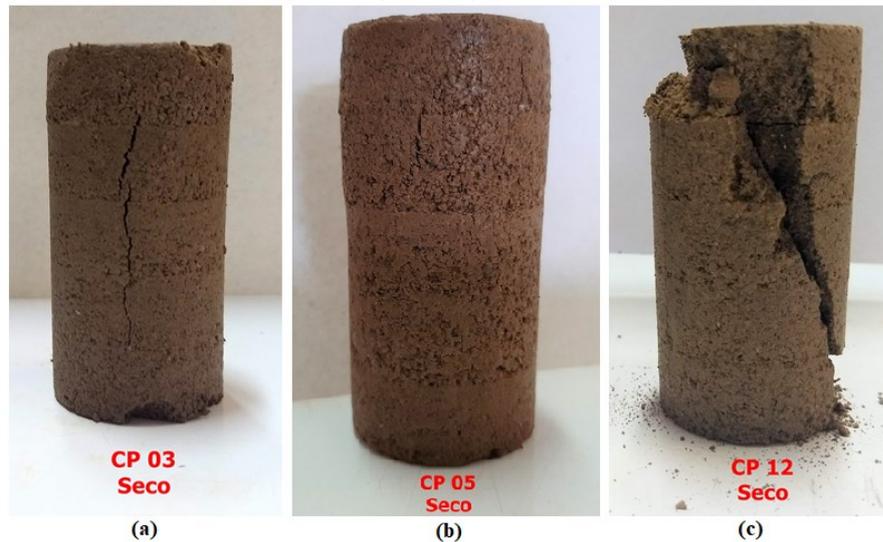
4.4.3.1 Modos de Ruptura dos Corpos de Prova

Após o ensaio de compressão simples, observou-se nos corpos de prova basicamente três modos de ruptura: Ruptura longitudinal, Ruptura de cisalhamento simples e transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas.

Nota-se, para cada condição de moldagem, que os modos de ruptura dos espécimes variam com a trajetória de secagem/umedecimento. No Ramo úmido, a trajetória foi basicamente de secagem, portanto, diferente dos outros esta condição apresentou apenas dois modos de ruptura: a transição rúptil-dúctil e a ruptura com o plano bem definido como mostra a Figura 4.27. Conforme as amostras foram ensaiadas na trajetória de secagem, observa-se o

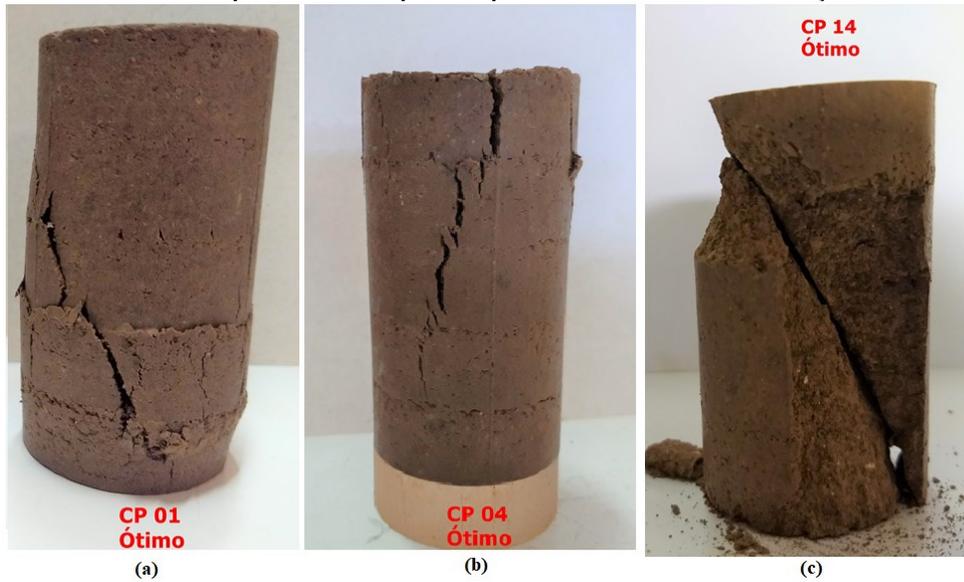
plano de ruptura bem definido. Comportou-se similar a dois blocos rígidos deslizando um sobre o outro, como é visto nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27. Na trajetória de Umedecimento, não se observou ruptura com planos definidos, apresentando fissuras verticais e aumento do volume lateral. A Figura 4.25 apresenta: (a) Ruptura longitudinal, (b) Transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas, (c) Ruptura de cisalhamento Simples. Na Figura 4.26 se observa: (a) Transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas, (b) Ruptura longitudinal, (c) Ruptura de cisalhamento Simples. Na Figura 4.27 está apresentado: (a) Transição rúptil-dúctil com fraturas conjugadas, (b) Ruptura de cisalhamento Simples.

Figura 4.25 Formas de ruptura dos corpos de prova moldados na condição do ramo seco



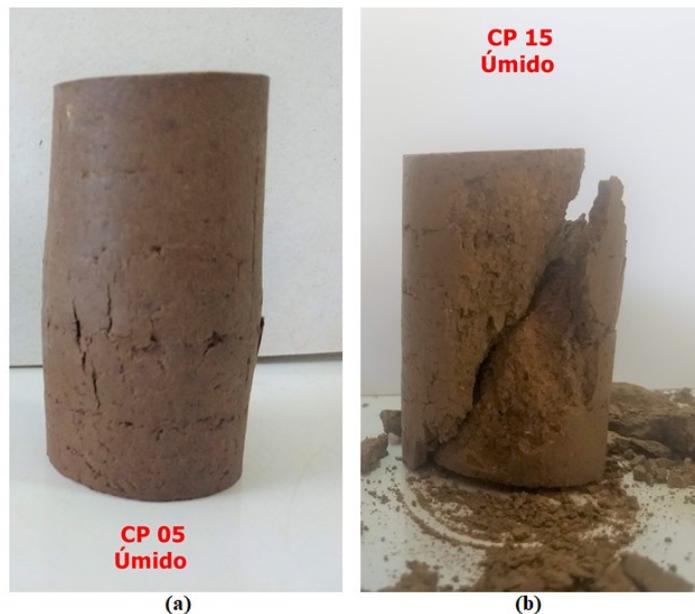
Fonte: autor

Figura 4.26 Formas de ruptura dos corpos de prova moldados na condição Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.27 Formas de ruptura dos corpos de prova moldados na condição Ramo Úmido



Fonte: autor

As formas de ruptura observadas sugerem que a estrutura do solo quando submetido ao acréscimo de sucção, apresenta formações de meniscos que facilitam a transmissão apenas de forças normais entre os grãos, portanto, aumenta a estabilidade relativa da estrutura, ao passo que a presença da água favorece ao solo o comportamento colapsível.

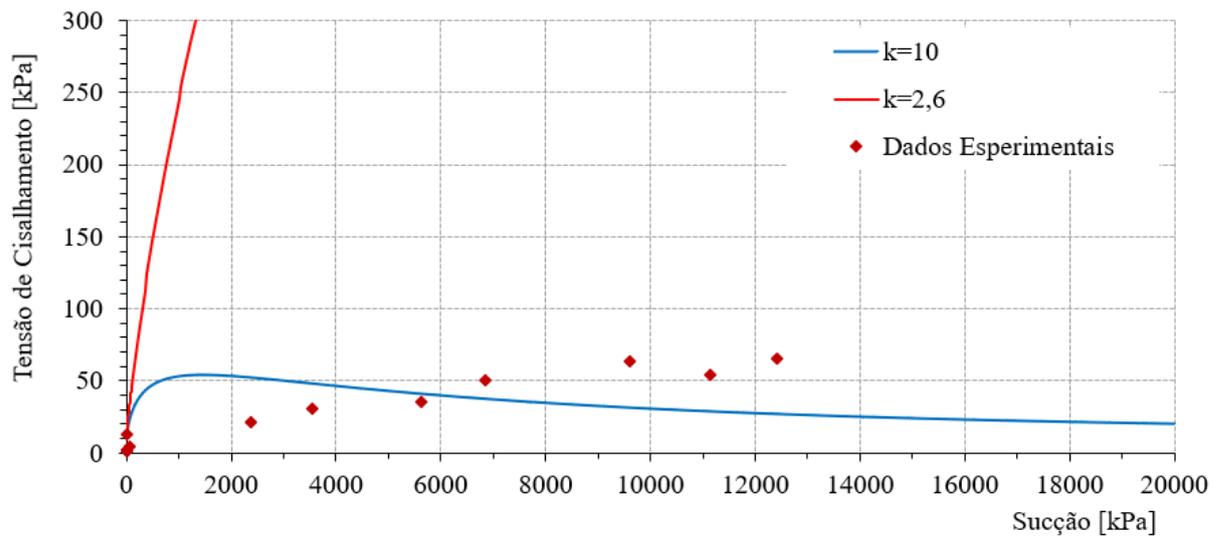
4.5 MODELOS DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Neste trabalho foram avaliados três modelos de previsão da resistência: Vanapalli et al (1996), Khalili e Khabbaz (1998) e Vilar (2006). Para aplicação destes modelos foram utilizados os interceptos de coesão obtidos no item 4.4.2 para as 3 condições de moldagem definidas na Tabela 4.2.

4.5.1 Método de Vanapalli et al (1996)

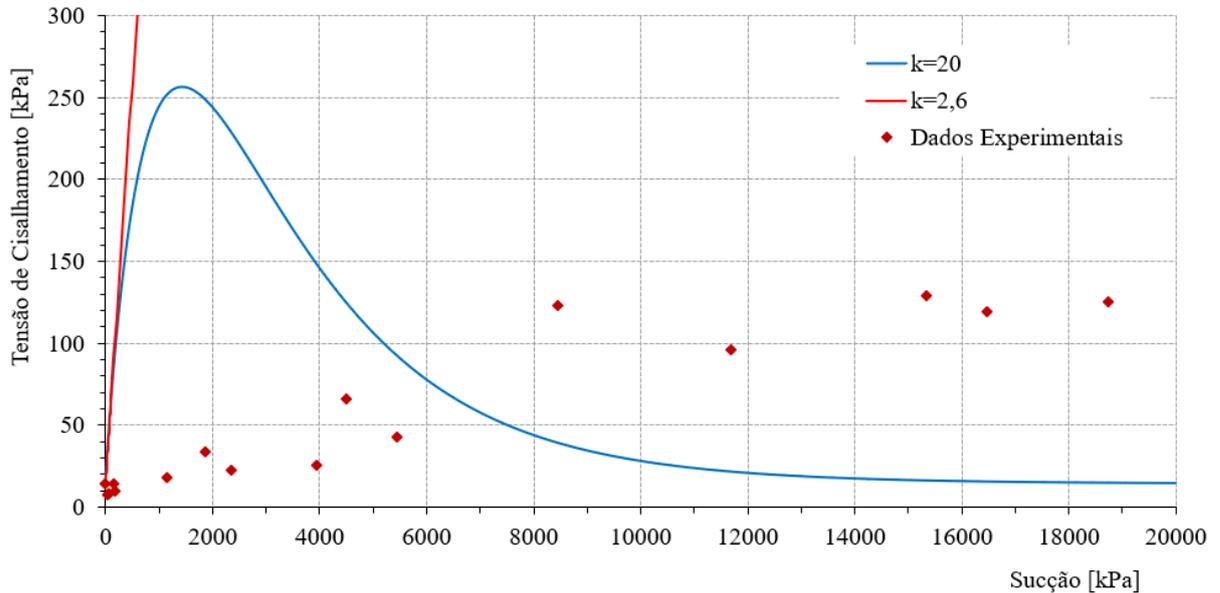
O emprego do modelo de previsão da resistência ao cisalhamento em função da sucção proposto por Vanapalli et al (1996) para os interceptos de coesão das três condições de moldagem (Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido) estão apresentados nas Figuras 4.28, 4.29 e 4.30.

Figura 4.28 Aplicação do modelo de Vanapalli et al (1996) para o solo moldado no Ramo Seco



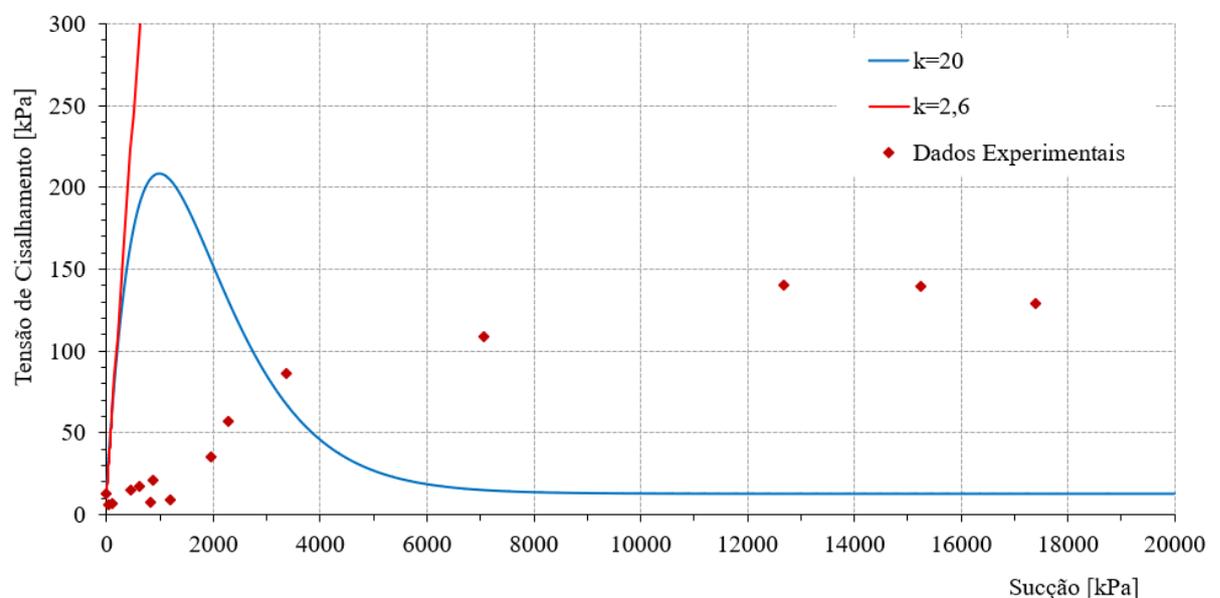
Fonte: autor

Figura 4.29 Aplicação do modelo de Vanapalli et al (1996) para o solo moldado na Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.30 Aplicação do modelo de Vanapalli et al (1996) para o solo moldado no Ramo Úmido



Fonte: autor

Vanapalli et al (1996) estimam que o valor do parâmetro de correlação κ é adotado em função do Índice de Plasticidade. Em contrapartida, alguns autores consideram que o valor de κ pode ser ajustável à melhor representação dos dados experimentais. Foram adotados os dois

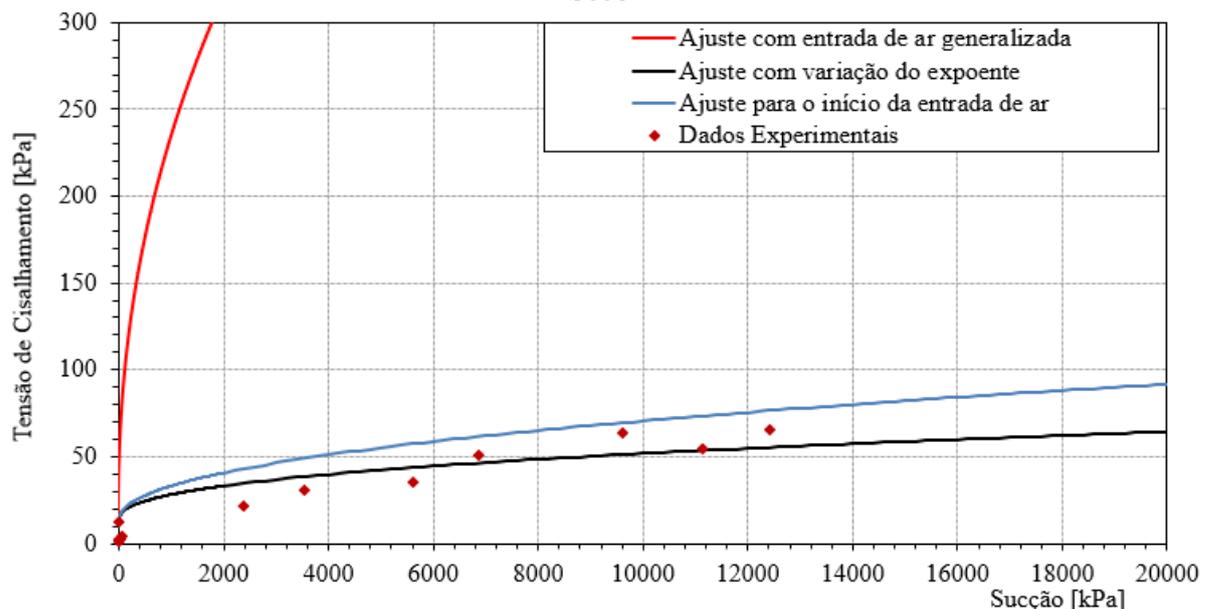
métodos para a determinação do κ . Pelo critério do índice de plasticidade, o valor do parâmetro corresponde a $\kappa = 2,6$. Ao ajustar o parâmetro κ aos dados experimentais, os valores foram equivalentes a $\kappa = 10$ para o solo moldado no Ramo Seco e $\kappa = 20$ para o solo moldado na umidade ótima e no Ramo Úmido.

A partir dos resultados, mesmo com o ajuste do parâmetro κ para a melhor representação da previsão da resistência ao cisalhamento, o modelo apresentado por Vanapalli et al (1996) não resultou em uma boa estimativa de previsão da resistência independentemente da condição de moldagem.

4.5.2 Método de Khalili e Khabbaz (1998)

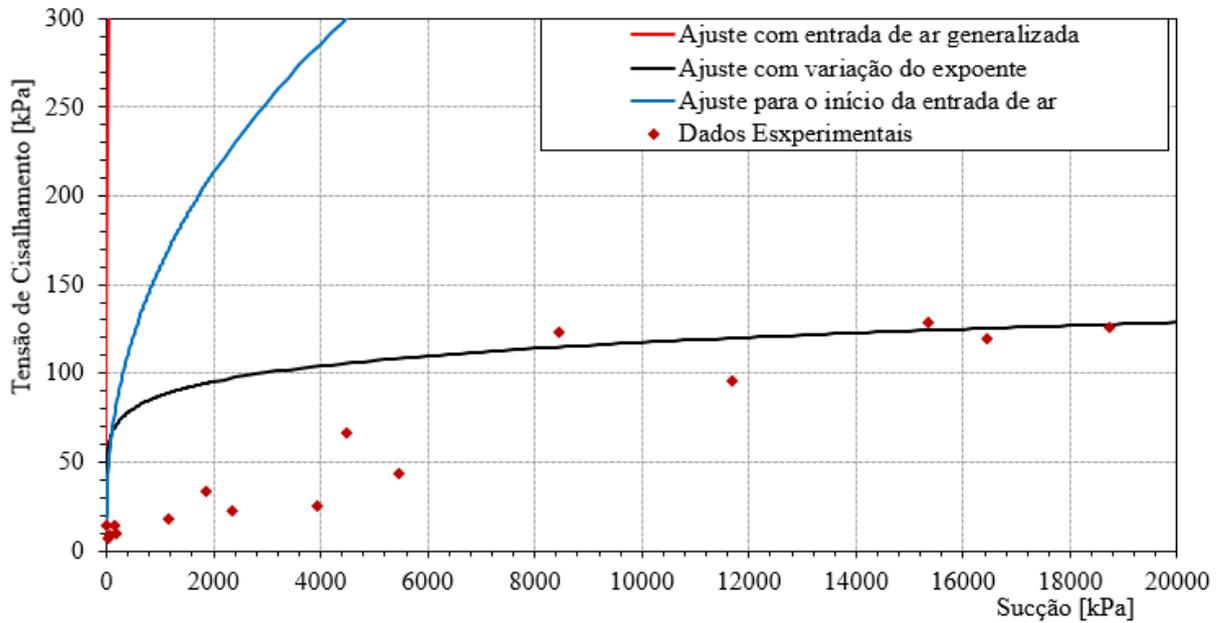
Visando apresentar melhor ajuste aos pontos experimentais, Oliveira (2004) recomenda que a previsão realizada pelo método de Khalili e Khabbaz (1998) seja feita segundo a entrada de ar generalizada e indica que a potência $-0,55$ não representa bem o solo que analisou. Deste modo, foram feitos três ajustes: o primeiro utilizando a entrada de ar generalizada, o segundo utilizando o início da entrada de ar e o terceiro variando a potência para a qual melhor se ajusta aos dados experimentais. A aplicação do método de Khalili e Khabbaz (1998) ao solo residual de sienito moldado no Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido estão apresentados nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33.

Figura 4.31 Aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para o solo moldado no Ramo Seco



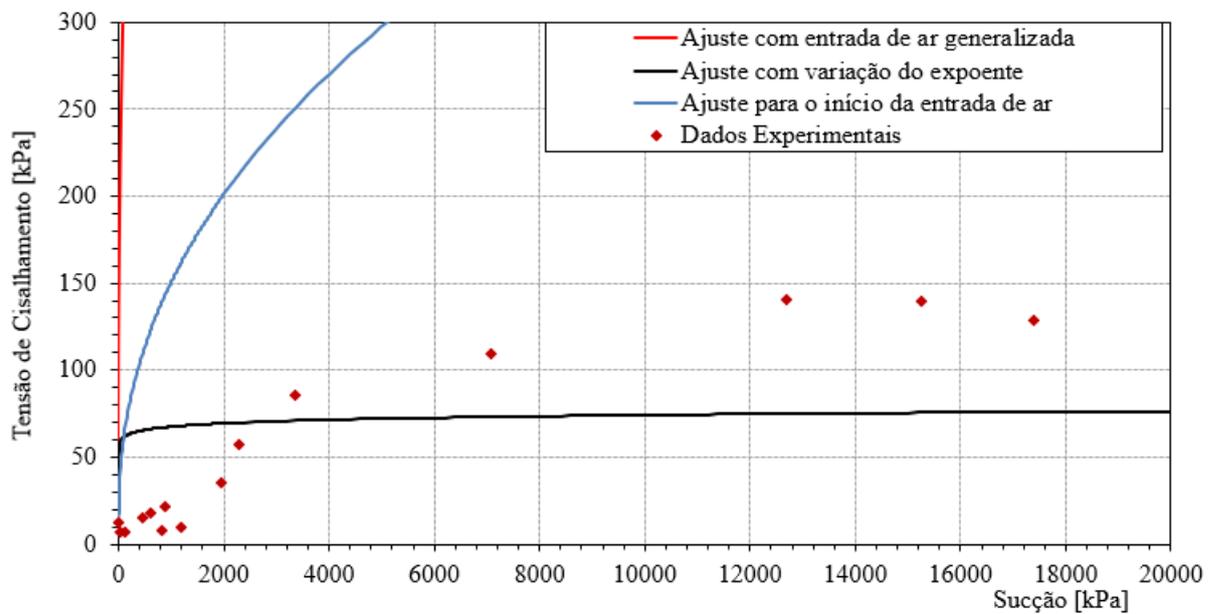
Fonte: autor

Figura 4.32 Aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para o solo moldado na Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.33 Aplicação do modelo de Khalili e Khabbaz (1998) para o solo moldado no Ramo Úmido



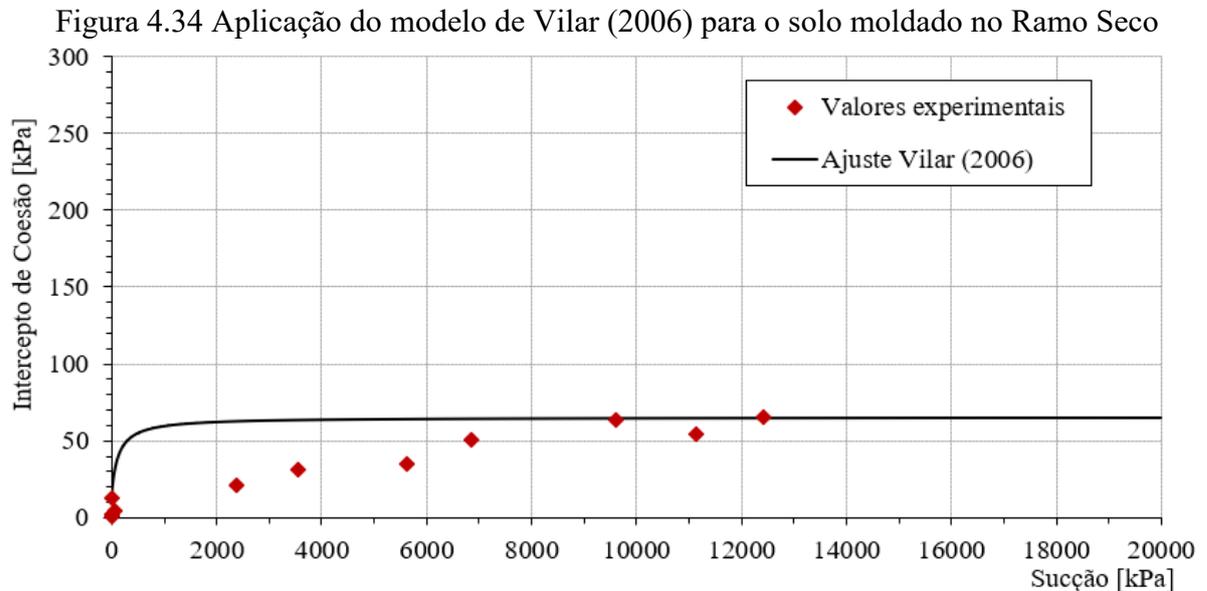
Fonte: autor

Apenas no Ramo Seco, a curva do ajuste com variação do expoente e ajuste para o início da entrada de ar apresentou-se convergindo aos dados experimentais para os valores

elevados de sucção, mas não o suficiente para ser considerado expressivo. De modo geral, o método de Khalili e Khabbaz (1998) não representou bem a previsão da resistência ao cisalhamento do solo Sienito, independente se o ajuste foi feito utilizando o valor de entrada de ar generalizada, o início da entrada de ar ou ajustando o valor da potência, seja para o solo moldado no Ramo Seco, umidade Ótima ou no Ramo Úmido.

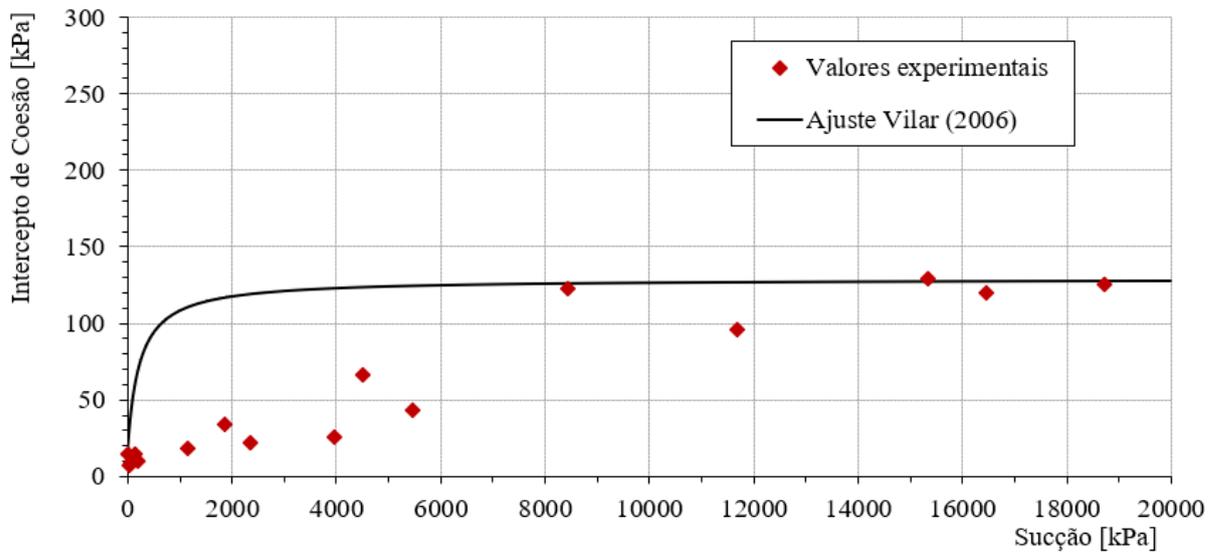
4.5.3 Método de Vilar (2006)

A aplicação do modelo de Vilar (2006) ao solo Sienito moldado no Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido está apresentada nos gráficos das Figuras 4.34, 4.35 e 4.36.



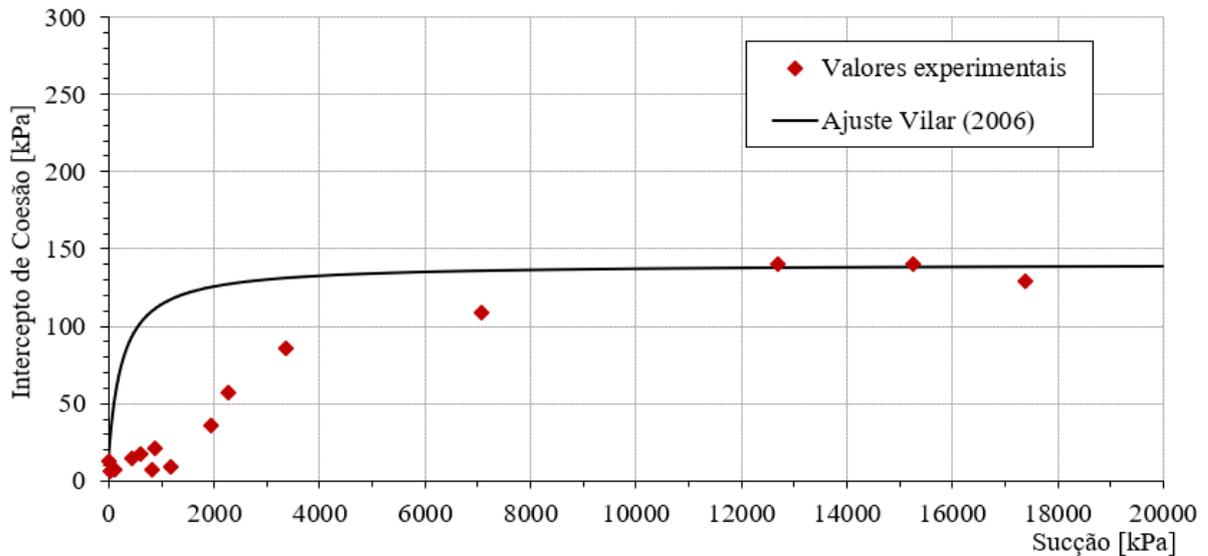
Fonte: autor

Figura 4.35 Aplicação do modelo de Vilar (2006) para o solo moldado na Umidade Ótima



Fonte: autor

Figura 4.36 Aplicação do modelo de Vilar (2006) para o solo moldado no Ramo Úmido



Fonte: autor

Nota-se que o ajuste é incompatível aos dados experimentais, independente da condição de moldagem, portanto, o método de Vilar (2006) não apresentou boa representatividade para aplicação ao solo residual de sienito.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual de sienito não saturado situado no Domo de Lages, localizado na bacia do Paraná no estado de Santa Catarina. O trabalho de pesquisa teve enfoque dividido em duas partes: (1) obtenção direta da resistência ao cisalhamento em diferentes condições de moldagem e (2) previsão indireta dessas propriedades a partir da determinação da curva de retenção de água e os parâmetros saturados do solo, através da aplicação de modelos disponíveis da literatura.

A partir da análise dos resultados experimentais e dos modelos de previsão aplicados, pode-se inferir os seguintes apontamentos:

- Curva de Retenção

As curvas de retenção de água do solo estudado foram determinadas através da técnica do papel filtro por trajetória de secagem. O papel filtro forneceu resultados coerentes na determinação do comportamento do solo e mostrou-se eficiente. A equação proposta por Fredlund e Xing (1994) forneceu um ajuste adequado para os dados experimentais da curva de retenção. Portanto, utilizar este modelo permitiu melhor visualização do formato das curvas.

As curvas de retenção determinadas para três condições de moldagem apresentaram formato unimodal com apenas um valor de entrada de ar e uma dessaturação. Para a condição moldada no Ramo Seco, a entrada de ar ocorre para pequenos valores de sucção e a dessaturação ocorre de forma mais lenta. A curva de retenção na condição Ramo Úmido apresenta, em relação às outras condições, maior capacidade de retenção de água e dessatura mais rapidamente. Na condição Umidade Ótima, o formato da curva foi intermediário entre as outras duas condições. O valor de entrada de ar coincide com o valor da condição Ramo Úmido, mas a dessaturação ocorreu de forma mais gradativa.

Os valores de índice de vazios para o mesmo valor de sucção foram maiores para a condição do Ramo Seco, diferente do Ramo Úmido e Umidade ótima que apresentaram valores semelhantes. A influência do teor de umidade no formato da curva de retenção foi evidenciada. Aparentemente, a estrutura dos poros pode ter sido modificada pela compactação com teores de umidade diferentes.

A sucção onde ocorre a tendência a estabilização da resistência e da variação volumétrica corresponde aproximadamente à sucção do ponto de inflexão das curvas de retenção.

- Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto permitiram determinar os valores de ângulo de atrito e coesão efetivos. Esses ensaios foram realizados para corpos de prova moldados com teor de umidade no Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido. Os valores obtidos para cada condição de moldagem foram próximos, o que demonstra que estes parâmetros de resistência não sofrem significativas mudanças ao alterar a umidade da compactação.

- Ensaio Compressão Simples

Com a finalidade de verificar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento foram realizados ensaios de compressão simples impostos a diferentes trajetórias de secagem e umedecimento para os três teores de umidade definidos no Ramo Seco, Umidade Ótima e Ramo Úmido. Foi possível observar que a influência da sucção no ganho de resistência é bem expressiva para baixos valores de sucção. Esta influência vai perdendo força até chegar à sucção na ordem de 10^4 , em que se observa tendência à estabilização da resistência e paralelamente os valores de sucção coincidem aproximadamente ao ponto de inflexão da curva de retenção.

Os interceptos de coesão permitiram visualizar o acréscimo de resistência em forma de potência. O Ramo Seco apresentou menor ganho de resistência, após alcançar o pico no ganho de resistência. O Ramo úmido apresentou tendência a diminuir a resistência com o aumento da sucção. Pode-se inferir que a partir do ponto de máxima resistência, a sucção não exerce mais influência na resistência.

A análise da variação no índice de vazios mostra a tendência dos CPs, quando submetidos a sucções maiores, a diminuir os vazios. Esta tendência pode estar relacionada ao processo de secagem/umedecimento que provoca a variação do volume.

Foi possível verificar que a sucção de fato influencia no aumento da rigidez da amostra através da análise do módulo de deformabilidade. O ponto de moldagem Ramo Seco foi o que apresentou para o mesmo valor de sucção, menor deformação específica axial antes da ruptura. Em todos os três pontos de moldagem, verifica-se a influência da sucção no comportamento mecânico do solo, em que houve ganho de resistência com o incremento da sucção.

Os modos de ruptura apresentados nos corpos de prova submetidos à compressão simples, seguiram um padrão para as trajetórias de secagem e umedecimento. Os CPs da trajetória de umedecimento, de modo geral, apresentaram ruptura rúptil-dúctil ou fissuras verticais com aumento do volume lateral, em contrapartida, os CPs da trajetória de secagem apresentaram ruptura com planos bem definidos de cisalhamento simples.

De modo geral, o solo compactado no Ramo Seco foi o que apresentou maior diferenciação comparado aos outros pontos de umidade (Umidade Ótima e Ramo Úmido). Destaca-se que o Ramo Seco atinge menor ganho de resistência e menor deformação específica axial. Nota-se também que a curva de retenção de água dessaturou mais lentamente e a entrada de ar que ocorre para pequenos valores de sucção apresentou para o mesmo valor de sucção, menor grau de saturação e maiores valores de índice de vazios, possivelmente por sua estrutura ser mais flokulada.

- Modelos de previsão de resistência ao cisalhamento

Em linhas gerais, destaca-se que nenhum modelo analisado foi capaz de descrever com eficiência o comportamento de resistência do solo, portanto, não foi possível fazer a previsão indireta da resistência a partir da determinação da curva de retenção de água e os parâmetros saturados do solo.

No modelo Vanapalli et al (1996), o valor do parâmetro κ foi ajustado para $\kappa=10$ na análise do Ramo Seco e $\kappa= 20$ para as análises Umidade Ótima e Ramo Úmido. Apesar do ajuste do parâmetro κ , o método não representa bem a previsão da resistência ao cisalhamento do solo estudado.

Na metodologia proposta por Khalili e Khabbaz (1994) foram feitos ajustes no valor de entrada de ar generalizada, no início de entrada de ar e ajuste no valor da potência. Em todos os ajustes, o método não refletiu bem a previsão da resistência ao cisalhamento das três condições de moldagem.

O modelo Vilar (2006) foi aplicado às três condições de moldagem. Apesar de não utilizar a curva de retenção e ser de fácil aplicação, o modelo não configura boa representação dos dados experimentais de resistência ao cisalhamento do solo em estudo.

Como sugestões de trabalhos futuros, indica-se utilizar a placa de sucção para definir a curva de retenção para baixos valores de sucção. O método da placa de sucção baseia-se no princípio dos vasos comunicantes. Este permite definir o trecho que inicia a curva de retenção que em muitos casos é fundamental na interpretação da curva. Adicionalmente, sugere-se testar outros métodos de previsão da resistência ao cisalhamento ao solo residual de sienito ou desenvolver novo método que melhor se aplique a este tipo de solo.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016, 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016, 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458.** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 10, 2016. Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016, 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016, 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016, 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770:** Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992, 4 p.

ASTM **D3080.** Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained. American Society for Testing and Materials, p. 1–6, 1998.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 5298-03:** Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. Philadelphia, 2003. 6 p.

ADAMS, B.A., WULSOHN, D., FREDLUND, D.G.1996. **Application of unsaturated soil mechanics for agricultural conditions**, Canadian Agricultural Engineering, Vol. 38, No. 3, pp. 171-131.

ALMEIDA, M. S. S., Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado quando percolado por fluidos de diferentes constantes dielétricas (2016). Tese Doutorado. Universidade Federal da Bahia, UFBA, Bahia.

BARBOUR, S. L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: **The Soil- Water Characteristic Curve: A Historical Perspective**. Canadian Geotechnical Journal, 1998, v. 35, p. 873-894.

BERNARDI, C. **Estudo da utilização do ensaio de dilatômetro de Marchetti em um solo residual compactado com Avaliação da influência da sucção**, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

BISHOP, A. W. **The principle of effective stress**. Teknik Ukeblad, v. 39, p. 859–863, 1959.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous Media**. Hydrology Papers, 1964, n. 3, 27 p.

CAMPOS, T.M.P.; CARRILHO, C.W. (1995). Direct shear testing on na unsaturated soil from Rio de Janeiro. In: ISSM (Org.). *Unsaturated Soils*. 1 ed Paris, França. A.A. Balkema Publishers, v.1.

CARVALHO, T. M. O. **Efeitos de um Licor Cáustico na Resistência ao Cisalhamento de um solo Residual de Sienito e um Coluvionar**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro- PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006, 170p

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

ESCARIO, V.; JUCA, J. **Strength and deformation of partly saturated soils**. In: International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering, 12. 1989, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro, 1989, v. 3, p. 43-46.

FEUERHAMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. **The use of filter-paper and suction plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluviums soils**. Geotechnical Testing Journal, 2005, v. 29. p. 419-425.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Tipos de Rochas ornamentais e características Tecnológicas**. Capítulo do Livro Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento. Vidal, F.V.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N. F. Rio de Janeiro, 2014: CETEM/MCTI. ISBN: 987-85– 8261-005-3. p 43 – 97

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, n.3, p. 521–532, 1994.

FREDLUND, D. G. **The Scope of Unsaturated Soil Mechanics: An Overview**. In: First International Conference On Unsaturated Soils, 1. 1995, France. Proceedings... France, 1995, v. 3, p. 1155-1177.

FURMAN, J. FARO, V. P. **Resistência ao cisalhamento de solos tropicais brasileiros não saturados da serra do mar - Trecho PR-SP**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXXI, Nº. 000204, 14/01/2021.

GARDNER, R – **A method of measuring the capilar tension of soil moisture over a wide moisture range** – 1937. Soil Science, vol 43 january- june pp 277-283.

GEHLING, W. Y. Y. **Ensaio de laboratório e de campo**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, 2004 (NSAT'04) Vol 2, São Paulo.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. 2010, 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GOOGLE. Google Earth website. <http://earth.google.com/>, 2019

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

MACHADO, R.; ROLDAN, L. F.; JACQUES, P. D.; FASSBINDER, E.; NUMMER, A. R.. **Tectônica transcorrente Mesozoica-Cenozoica no Domo de Lages – Santa Catarina**. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 42, dezembro de 2012 pp. 799-811.

MANFREDI, T. R. **A mineralização de parisita- (Ce) associada ao carbonitito fazenda Varela (Correia Pinto, SC)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Instituto de ciências – IGEO. Porto Alegre, 2013.

MARINHO F.A.M; PEREIRA J.H.F (1998) **Mini-Curso de Solos Não Saturados** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, (1998). Apostila. Brasília :ABMS p 1-67.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage Behaviour of Some Plastic Clays**. PhD thesis. Imperial College, University of London, 1994.

MARINHO, F. A. M., **Medição de Sucção em Solos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS (ÑSAT'97), 3. Rio de Janeiro, 1997.

MASSOCCO, N. S. **Determinação dos parâmetros geotécnicos de solos residuais com ênfase na mecânica dos solos não saturados**, 2017. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

MOTTIN, T. E.. **Evolução estratigráfica e paleogeográfica da sequência da deglaciação Eopermiana do Grupo Itararé, nordeste da Bacia do Paraná.** 2017. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-graduação em Geologia) - Universidade Federal do Paraná.

MOURA, A. S.; SILVA FILHO, F. C.; DANTAS NETO, S. A. **Previsão de curvas de retenção por correlações com propriedades dos solos.** Ciência e engenharia, Jan – Jun 2017 pag. 51-57

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado** (2004). Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.

OLIVEIRA, O.M. e MARINHO, F.A.M. (2004) **Aspectos da curva de retenção de água de um solo residual compactado.** (2004) V Simpósio Brasileiro de Solos não saturados, São Carlos-SP.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. **The influence of suction on the unconfined shear strength of a Compacted Residual Soil.** In: Panamerican Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, XV, 2015, Buenos Aires. Proceedings... Buenos Aires, 2015.

PECAPEDRA, L. L. **Estudo da Resistência ao Cisalhamento Não Saturada de Solos Residuais de Granito e Diabásio de Florianópolis/SC,** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

PECAPEDRA, L. L. ; OLIVEIRA, O. M. . **Aplicação do modelo proposto por Khalili Khabbaz (1998) na previsão da resistência ao cisalhamento em função da sucção de solos tropicais do Brasil.** In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016.

PECAPEDRA, L. L.; OLIVEIRA, O. M.; HIGASHI, R. A. R. . **Análise dos interceptos de coesão de um solo residual de diabásio compactado em três diferentes condições de moldagem.** In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 2018, Salvador. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 2018.

SHEIBE, L.F. **Geologia e Petrologia do Distrito Alcalino de Lages, SC.** Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1986.

SUSS, J. F. ; VESELY, F. F. ; CATHARINA, A. S. ; ASSINE, M. L. ; PAIM, P. S. G. **O Grupo Itararé (Neocarbonífero-Eopermiano) entre Porto Amazonas (PR) e Mafra (SC): sedimentação gravitacional em contexto marinho deltaico sob influência glacial.** Geociências (São Paulo. Online) , v. 33, p. 701-719, 2014.

TEIXEIRA, Wilson. FAIRCHILD, Thomas Rich. TOLEDO, M. Cristina Motta de. TAIOLI, Fabio. **Decifrando a Terra – 2a edição.** Companhia Editora Nacional. São Paulo. 2009.

VANAPALLI, S. K. **Simple test procedures and their interpretation in evaluating the shear strength of an unsaturated soil,** 1994. University of Saskatchewan, Canada.

VANAPALLI, S. K., FREDLUND, D. G., PUFAHL, D. E., CLIFTON, A. W.(1996). **Model for Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, pp. 379-392.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. **The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till.** Géotechnique, 1999, v. 49, n. 2, p. 143-159.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G. **Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength.** Advances in Unsaturated Geotechnics, 2000, p. 195-209.

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. 893–898, 1980.

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

VILLAR, L. F. S. **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC – Rio), Rio de Janeiro, 2002. 511p.

WOODBURN, J. A. & LUCAS, B. – **New approaches to the laboratory and field measurement of soil suction.** In FST INT. CONF. UNSATURATED SOILS. Paris, 1995, 667-671.