

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

ESTUDO DE DOIS PERFIS DE SOLO TROPICAL COM ADIÇÃO DE CAL

DANIELLI MIRANDA MARINO

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: Nº 371/2022

BRASÍLIA/DF: JUNHO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DE DOIS PERFIS DE SOLO TROPICAL COM ADIÇÃO DE CAL

DANIELLI MIRANDA MARINO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA.

APROVADA POR:

JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)

RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, D.Sc. (UFCG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (UnB)
(SUPLENTE)

BRASÍLIA/DF, 29 de JUNHO de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

MARINO, DANIELLI MIRANDA

Estudo de dois Perfis de Solo Tropical com Adição de Cal. [Distrito Federal] 2022.

93 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestra, Geotecnia, 2022).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Perfil de intemperismo

2. Estabilização dos solos

3. Solo-cal

4. Agregação/floculação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARINO, D.M. (2022). Estudo de dois Perfis de Solo Tropical com Adição de Cal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-371/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Danielli Miranda Marino

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo de dois Perfis de Solo Tropical com Adição de Cal.

GRAU / ANO: Mestra / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Danielli Miranda Marino

marino.geologia@gmail.com

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Lourdes e Rubens.

“Pois Deus não nos deu espírito de covardia, mas de poder, de amor e de equilíbrio”

2 Timóteo 1:7

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por ter me proporcionado saúde e pelo dom da perseverança.

Aos meus pais, Lourdes e Rubens, pelo melhor apoio que os é possível nos instantes de angústia e nos momentos de felicidade.

Ao meu orientador Prof. José Camapum de Carvalho, exemplo de dedicação e paixão pela pesquisa científica, pelo qual tenho imensa admiração e respeito, não apenas por ser um excelente orientador, mas também por ter-se mostrado um ser humano incrível durante esta jornada.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, pela dedicação no ensino. Considero-os fundamentais na ampliação da minha percepção sobre nosso planeta, para além dos aspectos geológicos, mas agora também do ponto de vista da Engenharia Geotécnica.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF) pelo apoio na coleta das amostras de solo.

Aos colegas e amigos que fiz durante o mestrado: Arthur, Andrea, Dan, Débora, Gisandra, Julliany, Leilanny, Márcio, Michael, Moisés, Narayana, Rocio, Ronaldo, Talita e Weber.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio a pesquisa.

RESUMO

Os solos tropicais ocupam 65% do território brasileiro. Assim, estudos que objetivam o entendimento de suas propriedades considerando o contexto peculiar de sua gênese, são de grande valia no âmbito geotécnico. Uma vez que, o intemperismo químico, predominante na formação dos solos brasileiros, não atua de maneira similar ao longo do perfil de solo, os horizontes resultantes podem apresentar diferenças tanto em termos de composição químico-mineralógica, como de propriedades físicas e comportamento hidromecânico. Estas características dos solos, podem ou não, estarem de acordo com os requisitos técnicos exigidos para a execução de obras de engenharia e quando não estão surge a necessidade de adequá-lo por meio de intervenções de ordem física, e/ou biológica, e/ou química. Neste último caso, o emprego de meios químicos, podem corresponder a uma alternativa vantajosa, já que eles possibilitam a adequação dos solos permitindo a sua utilização. Entretanto, estudos anteriores demonstraram que o uso de aditivos químicos, como a cal, pode nem sempre levar a resultados benéficos quanto ao comportamento mecânico, quando adicionada ao solo. Esta dissertação buscou contribuir para o entendimento destes procedimentos de melhoria do comportamento mecânico dos solos tropicais por meio da avaliação do efeito da adição da Cal Hidratada (CH-I) em pó, mais especificamente, a incorporação de 2%, 5% e 8% (em relação ao peso do solo seco) deste aditivo, em dois perfis de solos tropicais, denominados como Perfil 1 e Perfil 2, com 7,02 e 8,24 metros de profundidade, respectivamente, ambos localizados em Sobradinho, no Distrito Federal. Foram estabelecidos períodos de cura de 1, 28 e 90 dias e realizados ensaios de caracterização, compactação, tração por compressão diametral com determinação da sucção e compressão simples. A partir dos resultados obtidos, observou-se que a mineralogia identificada é típica de perfis de solo com intemperização avançada; já a adição da cal: elevou, como esperado, o potencial hidrogeniônico dos solos, entretanto houve queda nos valores com o avanço do tempo de cura; promoveu agregações, mas também algumas tendências de desagregações; proporcionou ganhos de resistência, que se mostraram mais efetivos quando relacionados a influência do grau de saturação e da sucção atuante. Concluiu-se que o nível de intemperização dos solos estudados influenciou a estabilização química com a cal, gerando variação nas propriedades físico-químicas e no comportamento mecânico ao longo da profundidade e entre os perfis de solo. Portanto, está Dissertação aponta para a necessidade de se aprofundar os estudos voltados para a estabilização química dos solos tropicais, em especial atentando-se para as ações químicas de médio e longo prazo, pois as mesmas poderão ocasionar instabilizações texturais e estruturais dos solos.

ABSTRACT

Tropical soils occupy 65% of the Brazilian territory. Thus, studies that aim to understand their properties considering the particular context of their genesis are of great value in the geotechnical field. Since chemical weathering, predominant in the formation of Brazilian soils, does not act similarly along the soil profile, the resulting horizons may present differences in chemical-mineral composition, physical properties, and hydro-mechanical behavior. These soil characteristics may or may not be by the technical requirements demanded the execution of engineering works. When they are not, the need arises to adapt them through physical, and/or biological, and/or chemical interventions arise. In the latter case, using chemical means can be an advantageous alternative since they make it possible to adapt the soil, allowing its use. However, previous studies have shown that using chemical additives, such as lime, may not always lead to beneficial results regarding the mechanical behavior when added to the soil. This dissertation sought to contribute to the understanding of these procedures for improving the mechanical behavior of tropical soils by evaluating the effect of adding powdered hydrated lime (CH-I), more specifically, the incorporation of 2%, 5%, and 8% (about dry soil weight) of this additive, in two tropical soil profiles, named Profile 1 and Profile 2, with 7.02 and 8.24 meters depth, respectively, both located in Sobradinho, Federal District. Curing periods of 1, 28, and 90 days were established, and tests of characterization, compaction, and tensile by diametrical compression with the determination of the suction and simple compression were performed. From the results obtained, it was observed that the mineralogy identified is typical of soil profiles with advanced weathering; the addition of lime: raised, as expected, the hydrogen potential of soils, however, there was a drop in values with the advancement of curing time; promoted aggregations, but also some tendencies of disaggregation; provided strength gains, which proved to be more effective when related to the influence of the degree of saturation and the acting suction. It was concluded that the level of weathering of the studied soils influenced the chemical stabilization with lime, generating variation in the physical-chemical properties and the mechanical behavior along the depth and among soil profiles. Therefore, this dissertation points to the need to deepen the studies related to the chemical stabilization of tropical soils, especially paying attention to medium and long-term chemical actions because they can cause textural and structural instability of soils.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVAÇÃO	2
1.2 - OBJETIVOS.....	3
1.2.1 - Objetivo geral	3
1.2.2 - Objetivos específicos	3
1.3 - ÁREAS DE ESTUDO.....	4
1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 - GEOLOGIA	6
2.1.1 - Unidade Metarritmito Argiloso	6
2.1.2 - Unidade Quartzitos Médios	7
2.2 - SOLOS	7
2.2.1 - Processos formadores dos solos	7
2.2.1.1 - Hidrólise.....	8
2.2.1.2 - Queluviação	10
2.2.2 - Perfil de intemperismo.....	10
2.2.3 - Solos tropicais.....	13
2.2.3.1 - Solos lateríticos	13
2.2.3.2 - Solos saprolíticos	14
2.3 - ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS.....	14
2.3.1 - Estabilização dos solos com cal.....	15
2.3.1.1 - Reações solo-cal.....	15
2.3.1.2 - Alterações provocadas pela adição de cal.....	17
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 - MATERIAIS	22
3.1.1 - Solos estudados.....	22

3.1.2 - Cal hidratada - CH-I	23
3.2 - MÉTODOS.....	24
3.2.1 - Preparação das amostras	24
3.2.2 - Adição de cal aos solos.....	25
3.2.3 - Caracterização física.....	26
3.2.4 - Caracterização química.....	27
3.2.4.1 - Composição química.....	27
3.2.4.2 - Potencial hidrogeniônico (pH).....	28
3.2.5 - Caracterização mineralógica.....	29
3.2.6 - Classificação MCT	30
3.2.7 - Curvas de compactação mini-Proctor	30
3.2.8 - Resistência à compressão simples (RCS).....	30
3.2.9 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD).....	32
3.2.10 - Determinação da sucção	33
3.2.11 - Tempos de cura.....	35
3.2.12 - Panorama dos ensaios realizados.....	35
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 - SOLOS <i>IN NATURA</i>	37
4.2 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	40
4.2.1 - Potencial hidrogeniônico (pH).....	40
4.2.2 - Composição química	44
4.3 - GRANULOMETRIA	45
4.4 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR.....	54
4.5 - SUCCÕES ATUANTES NO SOLO.....	61
4.6 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD).....	65
4.7 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	71
4.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	74

5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	78
5.1 - CONCLUSÃO	78
5.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÊNDICE A - CLASSIFICAÇÃO MCT	86
APÊNDICE B - DIFRATOGRAMAS.....	87
APÊNDICE C - RCS E DEFORMAÇÃO AXIAL.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Processos químicos e físicos na formação dos solos. (Macedo & Lemos, 1961; Pedro, 1966; Salomão & Antunes, 1998).....	7
Tabela 2.2 - Horizontes e sub-horizontes do perfil de alteração dos solos tropicais. (Cardoso, 2002).....	11
Tabela 3.1 - Divisão dos Intervalos dos Perfis 1 e 2.....	22
Tabela 3.2 - Características da Cal Hidratada CH-I fornecidas pelo fabricante.	24
Tabela 3.3 - Classificação dos solos de acordo com o pH. (Bigarella <i>et al.</i> , 1996).	28
Tabela 3.4 - Classificação dos solos de acordo com o Δ pH. (Lima, 2003).	29
Tabela 4.1 - Caracterização dos solos <i>in natura</i> dos Intervalos dos Perfis 1 e 2.	37
Tabela 4.2 - Minerais presentes no Perfil 1.....	38
Tabela 4.3 - Análise semi-quantitativa do Perfil 2. (Senaha, 2019).	39
Tabela 4.4 - Resultados de pH em água destilada (H ₂ O), pH em cloreto de potássio (KCl), ponto de carga zero (PCZ) e Δ pH dos solos <i>in natura</i>	40
Tabela 4.5 - Variação de Δ pH com o teor de cal e tempo de cura do Perfil 1.	43
Tabela 4.6 - Variação de Δ pH com o teor de cal e tempo de cura do Perfil 2.	43
Tabela 4.7. Composição química do Perfil 1 (Intervalos 2 e 3) e do Perfil 2.....	45
Tabela 4.8 - Resultados de umidade ótima (w_{ot}), peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), índice de vazios ótimo (e_{ot}) e grau de saturação (Sr) do Perfil 1.....	59
Tabela 4.9 - Resultados de umidade ótima (w_{ot}), peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), índice de vazios ótimo (e_{ot}) e grau de saturação (Sr) do Perfil 2.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização das áreas de estudo.	4
Figura 2.1 - Solubilidade da sílica (SiO ₂) e do alumínio (Al) em relação ao pH. (Toledo <i>et al.</i> , 2009).....	8
Figura 2.2 - Microestrutura de um solo laterítico. (Guimarães, 2002).....	13
Figura 2.3 - Microestrutura de um solo saprolítico. (Guimarães, 2002).....	14
Figura 2.4 - Trocas catiônicas. (Modificado - Prusinski & Bhattacharja 1999).	16
Figura 3.1 – Perfil de elevação entre os locais das sondagens.	22
Figura 3.2 – Aspecto físico natural dos solos dos Intervalos dos Perfis 1 e 2.	23
Figura 3.3 – Estimativa do teor mínimo de cal: a) Perfil 1; b) Perfil 2.....	26
Figura 3.4 - Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão simples. .	31
Figura 3.5 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: a) Antes da ruptura; b) Após a ruptura.	32
Figura 3.6 - Montagem dos ensaios de sucção mátrica (parte inferior do corpo de prova) e total (parte superior do corpo de prova).	34
Figura 3.7 - Fluxograma dos ensaios laboratoriais realizados neste trabalho.	36
Figura 4.1 – Teores de caulinita, gibbsita, quartzo e goethia mais hematita ao longo do Perfil 2.....	39
Figura 4.2 - pH em água destilada (H ₂ O) e cloreto de potássio (KCl) das misturas solo-cal do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3.....	42
Figura 4.3 - Curvas granulométricas do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3. g) Legenda das curvas granulométricas dos solos <i>in natura</i> com e sem defloculante e das misturas solo-cal.	47
Figura 4.4 - Curvas granulométricas dos solos <i>in natura</i> com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) e com adição de 2% de cal no Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3; g) Legenda das curvas granulométricas.	49
Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos solos <i>in natura</i> com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) e com adição de 5% de cal no Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3; g) Legenda das curvas granulométricas.	51

Figura 4.6 - Curvas granulométricas dos solos <i>in natura</i> com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) e com adição de 8% de cal no Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3; g) Legenda das curvas granulométricas.	53
Figura 4.7 - Curvas de compactação do solo <i>in natura</i> e das misturas solo-cal do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3.	56
Figura 4.8 - a) Valores de umidade ótima (w_{ot}) dos Perfis 1 e 2. b) Valores de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{\delta_{max}}$) dos Perfis 1 e 2.	58
Figura 4.9 - a) Índice de vazios (e) corrigido <i>versus</i> índice de vazios (e) obtido com o peso específico (γ_s) dos solos <i>in natura</i> ; b) Grau de saturação (S_r) obtido com o peso específico dos grãos (γ_s) corrigido <i>versus</i> Grau de saturação (S_r) obtido com o peso específico (γ_s) dos solos <i>in natura</i>	61
Figura 4.10 - a) Sucções mátricas em função do grau de saturação; b; c; d) Sucções osmóticas em função da umidade volumétrica.	63
Figura 4.11 - Valores de sucção mátrica em pF e índice de vazios (e) em função do grau de saturação.	64
Figura 4.12 - Valores de sucção osmótica em pF normalizado pela umidade volumétrica (θ) em função do grau de saturação.	65
Figura 4.13 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de umidade do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3.	66
Figura 4.14 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) do Perfil 1 em função do: a) Índice de vazios; b) Teor de umidade; c) Grau de saturação; d) Sucção mátrica.	67
Figura 4.15 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de umidade do Perfil 2: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3.	68
Figura 4.16 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) do Perfil 2 em função do: a) Índice de vazios; b) Teor de umidade; c) Grau de saturação; d) Sucção mátrica.	69
Figura 4.17 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de cal.	70
Figura 4.18 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função da: a) Sucção mátrica em pF normalizada pelo índice de vazios (e); b) pF da sucção osmótica multiplicado pela umidade volumétrica (θ).	70

Figura 4.19 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do pF da sucção mátrica dividido pelo índice de vazios (e) e pF da sucção osmótica multiplicado pela unidade volumétrica (θ).	71
Figura 4.20 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do Perfil 1, em função do Teor de umidade e Grau de saturação do: a) e b) Intervalo 1; c) e d) Intervalo 2; e) e f) Intervalo 3...	72
Figura 4.21 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do Perfil 2, em função do Teor de umidade e Grau de saturação do: a) e b) Intervalo 1; c) e d) Intervalo 2; e) e f) Intervalo 3...	73
Figura 4.22 - Resistência à compressão simples (RCS) em função da sucção mátrica do: a) Perfil 1; b) Perfil 2.	74
Figura A.1 - Ábaco para Classificação MCT.	86
Figura B.1 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 1 m de profundidade do Perfil 1.	87
Figura B.2 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 2 m de profundidade do Perfil 1.	87
Figura B.3 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 3 m de profundidade do Perfil 1.	88
Figura B.4 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 4 m de profundidade do Perfil 1.	88
Figura B.5 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 5 m de profundidade do Perfil 1.	89
Figura B.6 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 6 m de profundidade do Perfil 1.	89
Figura B.7 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 7 m de profundidade do Perfil 1.	90
Figura C.1 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 1 do Perfil 1.	91
Figura C.2 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 2 do Perfil 1.	91
Figura C.3 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 3 do Perfil 1.	92
Figura C.4 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 1 do Perfil 2.	92
Figura C.5 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 2 do Perfil 2.	93
Figura C.6 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 3 do Perfil 2.	93

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ai - Área da seção transversal média inicial

Al - Alumínio

Al(OH)₃ - Gibbsita

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

°C - Celsius

Ca - Cálcio

CBR - California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)

CaFeSi₂O₆ - Piroxênio

CH-I - Cal Hidratada I

CH-III - Cal Hidratada III

D - Diâmetro do corpo de prova

DF - Distrito Federal

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNER-CLA - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-Classificação

DNER-ME - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem-Método de Ensaio

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DR-X - Difração de Raios-X

e - Índice de vazios

e_{ot} - Índice de vazios ótimo

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

F - Carga máxima obtida no ensaio

Fe - Ferro

FeO(OH) - Goethita

g - Grama

g/cm² - Grama por centímetro quadrado

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

H - Hidrogênio

H - Altura inicial do corpo de prova

H - Altura do corpo de prova

H₂O - Água

Int – Intervalo do perfil de solo

IP - Índice de Plasticidade
INFRALAB - Laboratório de Infraestrutura Rodoviária
ISSMFE - International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
K - Potássio
 KAlSi_3O_8 - Feldspato potássico
KCl – Cloreto de potássio
K-feldspato - Feldspato potássico
km - Quilômetro
kN - Quilonewton
kPa – Kilopascal
L - Solos com comportamento laterítico
LA - Areias com pouca argila
LA' - Areias argilosas e argilas arenosas
LG' - Argilas e argilas arenosas
Li - Lítio
m - Metro
M - Sucção mátrica
MCT - Miniatura, Compactado, Tropical
mL - Mililitro
mm - Milímetro
mm/min - Milímetro por minuto
Mg - Magnésio
 mol/L^{-1} – Mol por litro
N – Solos com comportamento não-laterítico
nº - Número
Na - Sódio
NA - Areias, areias siltosas e siltes
NA' - Areias siltosas e areias argilosas
NBR - Norma Brasileira
NG' - Argilas, argilas arenosas e argilas siltosas.
 NH_4^+ - Amônio
NS' - Siltes, siltes arenosos e argilosos
P - Carga aplicada
P1 – Perfil 1

P2 – Perfil 2
PCZ – Ponto de Carga Zero
pF – Logaritmo da coluna d'água em centímetros
pH – Potencial Hidrogeniônico
pH_{KCl} - Valor do pH encontrado em KCl
pH_{H₂O} - Valor do pH encontrado em água destilada
RCS - Resistência à Compressão Simples
RTCD - Resistência à Tração por Compressão Diametral
Sr – Grau de Saturação
Si - Silício
SiO₂ - Sílica
S-1 - Solo 1
S-2 - Solo 2
T - Sucção total
UnB - Universidade de Brasília
 u_a - Poropressão da fase ar
 u_w : Poropressão da água
w_L - Limite de Liquidez
W_{ot} - Umidade Ótima
w_p - Limite de Plasticidade
 Δ pH - Delta pH
 θ – Umidade volumétrica
 ε - Deformação Axial Específica
 γ_{dmax} - Peso Específico Aparente Seco Máximo
 γ_s - Peso Específico dos Grãos
 π - Sucção Osmótica
% - Porcentagem
 ψ - Sucção Total
($u_a - u_w$) - Sucção Mática
 \emptyset H - Variação da Altura do Corpo de Prova
 $\frac{1}{2}$ Al₂SiO₅(OH)₄ - Caulinita
 $\frac{1}{3}$ KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂ - Ilita

1 - INTRODUÇÃO

Os solos lateríticos e os solos subtropicais ocupam aproximadamente 28 milhões de metros quadrados, o que corresponde a 19% da superfície da Terra (Mélo, 2011). Sendo que no Brasil, os solos lateríticos estendem-se por 65% do território nacional (Villibor & Alves, 2019). Dentre os solos pertencentes a esta classe, os solos argilosos podem apresentar grande sensibilidade às variações de umidade, além de contração, expansão e plasticidade elevadas. O que confere a estes solos variabilidade tanto na trabalhabilidade, quanto nas propriedades e no comportamento, levando-os a classificação como materiais problemáticos (Delgado, 2007).

Somam-se a estas particularidades o árduo trabalho de encontrar materiais, que atendam as especificações geotécnicas requeridas e, devido à uma questão de custo, que possuam localização próxima à obra. Diante das dificuldades citadas, a estabilização de solos para emprego do material local apresenta-se como alternativa que pode ser vantajosa, pois evita custos excessivos com transporte, restrições de licenciamento ambiental e os estudos voltados para análise do comportamento mecânico e hidráulico concentram-se na área do empreendimento. Ao proporcionar diminuição de tempo e gastos necessários para realização de estudos preliminares e para a própria execução, impacta diretamente no custo final da obra. No entanto, faz-se necessário atentar para o fato de que os perfis de intemperismo tropical podem apresentar alterações químico-mineralógicas substanciais ao longo da profundidade.

A utilização de técnicas de estabilização objetiva permitir a adequação das propriedades e comportamento do solo às necessidades de projeto, em especial a resistência, deformabilidade e durabilidade. A estabilização do solo pode se dar por meio do emprego de meios físicos, biológicos, químicos e mecânicos, como, por exemplo, ajuste na textura, adequação da condição e energia de compactação, adição de fibras, cal, cimento e materiais betuminosos, assim como por meio da alimentação de bactérias nativas para que gerem cimentações no solo (Guimarães, 1997; Muñetón, 2009; Muñetón, 2013).

Os benefícios da adição de cal ao solo são reconhecidos a mais de 2000 anos, mas é atribuído aos romanos o desenvolvimento dessa técnica para aplicação em geotecnia, na secagem de terrenos e fixação de lajes de rocha nas estradas (Coelho *et al.*, 2009). No Brasil ela tem sido utilizada na melhoria do comportamento mecânico dos solos em especial dos solos finos. Os estudos necessitam, no entanto, de maior aprofundamento devido à natureza agregada dos solos tropicais e às peculiaridades climáticas.

Rezende (2003) e Ayala (2020), mostraram que a cal ao invés de exercer função estabilizadora, pode promover a instabilização dos agregados que compõem os solos

profundamente intemperizados, levando à sua desagregação. Deste modo, além da participação mais ou menos significativa da fração argila que varia entre 15 % e 80%, na constituição dos latossolos que correspondem a classe dominante de solos no Distrito Federal, deve-se considerar também a formação desta classe, caracterizada por solos de maior grau evolutivo da pedosfera, para o estabelecimento da eficiência da estabilização com cal (EMBRAPA, 1978; Rodrigues, 2017).

Voltando-se, portanto, para a necessidade de maior entendimento das propriedades e do comportamento dos solos tropicais frente à estabilização química, a presente pesquisa busca avaliar a interação solo-cal em dois perfis de solo tropical com variação no grau de intemperismo. O estudo se fundamenta em ensaios laboratoriais de caracterização física, químico-mineralógica e de avaliação do comportamento mecânico.

1.1 - MOTIVAÇÃO

Os solos tropicais apresentam diferenças quanto as propriedades físico-químicas e comportamento hidromecânico, se comparados aos de regiões de clima frio e temperado. Tais peculiaridades são atribuídas as condições de formação dos solos tropicais que relacionam clima, temperatura, precipitação, geomorfologia e direção dos ventos, promovendo perfis de intemperismo diferenciados (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Como o avanço do intemperismo promove a zonalidade vertical dos solos tropicais, a diferenciação das camadas passa a ser local, assim, a variedade de horizontes requer o entendimento das propriedades e do comportamento destes solos, o que contribui para ampliar o seu uso com menores riscos de insucesso. Cabendo destacar que quando se trata de estabilização química, as propriedades químico-mineralógicas do solo que geralmente variam ao longo do perfil de intemperismo, assumem grande relevância.

Tratando-se da estabilização química de solos tropicais, Camapum de Carvalho & Gitirana Jr. (2021), destacam a importância da realização de análises detalhadas quanto a influência dos compostos químicos adicionados ao solo em suas propriedades e comportamento. Apesar da estabilização dos solos com cal, geralmente auxiliar na viabilização econômica da obra ao promover melhorias nas propriedades geotécnicas dos solos locais e possuir ampla utilização na construção de estradas e aeroportos, mas também em barragens e solo suporte de fundações (Jacintho, 2005). É necessário considerar que a efetividade da estabilização química depende de diferentes fatores como a mineralogia, o nível de intemperismo do solo, as condições de ocorrência do intemperismo e o nível de agregação

(Rezende, 2003; Pessoa, 2004; Aguiar, 2014). Também não se pode desprezar a sua dinâmica temporal e espacial (Camapum de Carvalho & Gitirana Jr. 2021).

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

O objetivo geral desta Dissertação consiste na verificação de como o nível de intemperização do solo pode afetar a sua estabilização química com cal gerando, por exemplo, efeito agregador ou desagregador. Para atender a tal objetivo foram usados no estudo dois perfis de intemperismo tropical, cal hidratada em três porcentagens (2%, 5% e 8%) e tempos de cura em laboratório de 1, 28 e 90 dias.

1.2.2 - Objetivos específicos

A fim de promover o cumprimento do objetivo geral estabelecido, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar se a utilização de teores distintos de cal provoca mudanças nas propriedades físico-químicas e no comportamento mecânico dos solos;
- Verificar a importância da submissão das amostras solo-cal a tempos de cura variados e se esse tempo depende do solo;
- Estudar as possíveis variações texturais em decorrência da adição de cal ao solo, sem utilização de aparelho dispersor ou defloculante;
- Analisar os valores de potencial hidrogeniônico (pH) obtidos tanto em solução de cloreto de potássio (KCl), quanto em água destilada;
- Determinar a resistência dos solos por meio de ensaios de compressão simples e compressão diametral;
- Avaliar as variações de sucção a partir do método do papel filtro;
- Analisar a influência de solos coletados em diferentes perfis de intemperismo e profundidades nos resultados dos ensaios realizados.

1.3 - ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo correspondem a dois locais em Sobradinho, no Distrito Federal, Figura 1.1. Nomeou-se os locais das sondagens como Perfil 1, com coordenadas $15^{\circ}41'32.32''\text{S}/47^{\circ}47'29''\text{W}$ e Perfil 2, com coordenadas $15^{\circ}42'36.38''\text{S}/47^{\circ}48'30.85''\text{W}$, próximo a DF-001, distantes um do outro em aproximadamente 2,5 km e apresentando respectivamente altitudes de 1045 e 1200 metros.

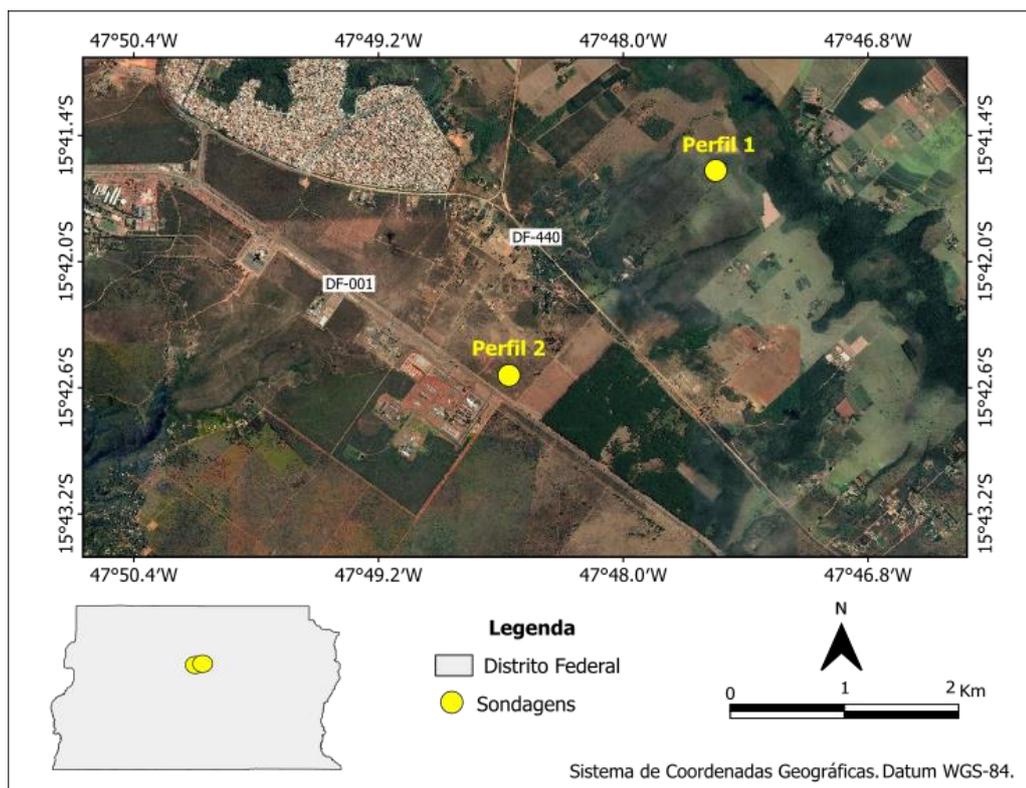


Figura 1.1 - Mapa de localização das áreas de estudo.

1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos. No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução sobre a relevância dos solos tropicais e o emprego da cal como agente estabilizador do solo, como também, os objetivos que regem a pesquisa e os locais de coleta das amostras de solo utilizadas.

O Capítulo 2 corresponde a revisão bibliográfica dos temas mais pertinentes, abrangendo desde a definição dos conceitos à citação de diferentes trabalhos que contribuem para a melhor compreensão dos assuntos abordados.

No Capítulo 3, identifica-se os materiais utilizados e os ensaios laboratoriais realizados.

O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos com a execução dos ensaios laboratoriais e às suas respectivas análises.

No Capítulo 5, têm-se as conclusões obtidas pelo desenvolvimento da dissertação e as recomendações para futuras pesquisas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - GEOLOGIA

Segundo Gusmão Filho (2008), a geologia corresponde a um fator que influencia a formação dos perfis de intemperismo desenvolvidos em regiões tropicais, além do que, o estado do material rochoso afeta o planejamento das obras de engenharia. Quanto ao contexto geológico do Distrito Federal, o mesmo está inserido na porção central da Faixa Brasília, que corresponde às Sequências sedimentares e metassedimentares, mais especificamente na transição entre regiões de maior grau metamórfico (zona interna) e de menor grau metamórfico (zona externa) (Dardenne, 2000; Campos, 2004).

Para Freitas-Silva & Campos (1998) o arcabouço litológico do Distrito Federal é representado pelos Grupos Paranoá e Canastra, com idade Meso-Neoproterozóica e Araxá e Bambuí, de idade Neoproterozóica. O Grupo Paranoá abrange 65% da área total do Distrito Federal e é constituído por calcário, quartzitos, metassiltitos, ardósias, metarritmito argiloso, metarritmito arenoso e unidade psamo-pelito carbonatada (Campos, 2004).

Dentre as unidades que compõem o Grupo Paranoá, destacam-se a Unidade Metarritmito Argiloso e a Unidade Quartzitos Médios, pois nelas localizam-se respectivamente os Perfis 1 e 2, onde realizou-se a coleta das amostras para o desenvolvimento do presente trabalho (Freitas-Silva & Campos, 1998). Campos *et al.* (2013), apresentam as seguintes descrições para essas unidades:

2.1.1 - Unidade Metarritmito Argiloso

Limita-se de maneira gradacional com a Unidade Quartzitos Médios e é constituída por metarritmitos com intercalações centimétricas de metalamitos, metassiltitos e quartzitos finos, de cor cinza, amarela, rosa ou vermelha devido a alteração intempérica. A alternância das camadas rítmicas centimétricas é interrompida pela presença de bancos com 0,5 a 1 m de espessura de metassiltitos maciços amarelos ou rosados, devido a presença de óxidos e hidróxidos de ferro proveniente da alteração de argilominerais e filossilicatos e de quartzitos finos, feldspáticos, de cor rosa, mal selecionados e com material pelítico preenchendo os interstícios entre os grãos de quartzo. As estruturas sedimentares mais frequentes são estratificação plano-paralela, *climbing ripples* e *hummockys*.

2.1.2 - Unidade Quartzitos Médios

É representada por quartzitos finos a médios, predominantemente maciços devido a intensa silicificação e fraturamento, sendo o acamamento plano-paralelo observado nas porções mais alteradas pelo intemperismo. Apesar do quartzo representar mais de 95% da mineralogia dos quartzitos, são observados feldspatos muito alterados, muscovita, turmalina, zircão e minerais opacos. Outras estruturas sedimentares presentes são estratificações cruzadas tabulares, acanaladas tangenciais de pequeno a médio porte e estratificação do tipo espinha de peixe.

2.2 - SOLOS

2.2.1 - Processos formadores dos solos

Salomão & Antunes (1998), consideram que o desenvolvimento inicial do solo está atrelado aos processos químicos e físicos atuantes sobre as rochas e que constituem o intemperismo, Tabela. 2.1. Logo, a composição química do solo é influenciada pela interação do substrato rochoso com fatores como clima, topografia, biota e tempo (Freire, 2006). Em solos brasileiros, dentre as reações responsáveis pelas alterações químicas na superfície terrestre, são identificadas principalmente a hidrólise e a queluviação (Pedro, 1966).

Tabela 2.1 – Processos químicos e físicos na formação dos solos. (Macedo & Lemos, 1961; Pedro, 1966; Salomão & Antunes, 1998).

Processos Químicos	Processos Físicos
Hidratação-desidratação	Expansão e contração térmica
Oxidação-redução	Alívio de pressão
Dissolução-precipitação	Congelamento
Carbonatação-descarbonatação	Cristalização de sais
Hidrólise	Ação radicular de espécies vegetais
Queluviação	-

2.2.1.1 - Hidrólise

Quando os silicatos, que representam a classe mineral predominante na crosta (mais de 90% do seu volume) entram em contato com a água, ocorre o processo de hidrólise, que se dá no intervalo de pH de 5 a 9. Onde o íon de hidrogênio (H^+) adentra as estruturas dos minerais, o que provoca o deslocamento especialmente de cátions alcalinos de potássio e sódio (K^+ e Na^+ , respectivamente) e alcalinos-terrosos de cálcio e magnésio (Ca^+ e Mg^+ , respectivamente) e resulta na liberação dos mesmos para a solução.

Portanto, na interface sólido/solução de alteração ocorre o rompimento da estrutura do mineral e consequente liberação de silício (Si) e alumínio (Al), podendo ocorrer recombinação desses elementos e neoformação de minerais secundários. Assim, a depender do grau de eliminação dos elementos/substâncias dissolvidos, é definida a intensidade da hidrólise, sendo denominada como hidrólise total ou hidrólise parcial (Andrade *et al.*, 2009; Toledo *et al.*, 2009).

a) Hidrólise total

Segundo Toledo *et al.* (2009), na hidrólise total, toda a sílica e o potássio são eliminados do perfil de solo. Apesar da baixa solubilidade da sílica na faixa de pH da hidrólise, sob alta pluviosidade e condições de drenagem eficientes, as soluções de alteração permanecem diluídas e promovem a eliminação da mesma, Figura 2.1.

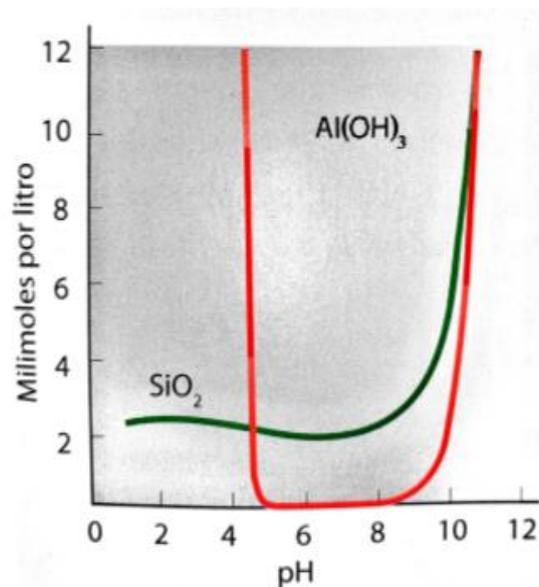
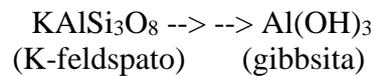
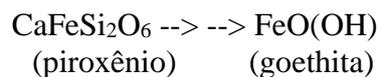


Figura 2.1 - Solubilidade da sílica (SiO_2) e do alumínio (Al) em relação ao pH. (Toledo *et al.*, 2009).

Em feldspatos potássicos (K-feldspato), a ocorrência da hidrólise total resulta em hidróxido de alumínio (gibbsita):



Enquanto em um silicato com ferro, como por exemplo o piroxênio, o resíduo após a hidrólise total consistirá em um oxi-hidróxido de ferro, como a goethita:



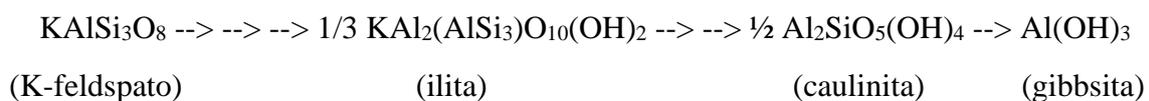
A permanência do alumínio e por consequência também do ferro no perfil, já que ambos os elementos possuem similaridade no comportamento geoquímico em relação ao domínio hidrolítico, é atribuída a característica quase insolúvel do alumínio na faixa de pH de 5 a 9. Esse processo de eliminação total da sílica e geração de oxi-hidróxidos de alumínio e de ferro, é nomeado como alitização ou ferralitização.

b) Hidrólise parcial

A hidrólise parcial ou sialitização, corresponde na eliminação de parte da sílica, podendo o potássio ser parcialmente ou totalmente eliminado do perfil, devido a drenagem menos eficiente que na hidrólise total. A sílica e o potássio reagem com o alumínio, e como resultado são formados aluminossilicatos hidratados (argilominerais).

Como exemplos de hidrólise parcial temos a formação da caulinita, onde ocorre a eliminação de todo o potássio e 66% da sílica em solução, enquanto há permanência de 100% do alumínio e a esmectita, com eliminação de 87% do potássio e 46% da sílica, com conservação de todo o alumínio Toledo *et al.* (2009).

A hidrólise parcial pode ser verificada nos estágios intermediários da alteração do K-feldspato para gibbsita, com a formação da ilita e da caulinita, apresentada por Cardoso (2002):



Assim, para argilominerais como a caulinita, onde átomos de silício e alumínio possuem mesma proporção, ou seja, Si:Al é 1:1, o processo é chamado de monossilicização. Enquanto

a formação de argilominerais como a esmectita, que possuem dois átomos de silício para um de alumínio, Si:Al é 2:1, denomina-se de bissialitização (Toledo *et al.*, 2009).

2.2.1.2 - Queluviação

A queluviação corresponde a incorporação de íons metálicos (principalmente alumínio e ferro-férrico) às moléculas de compostos orgânicos. Essa captura ocorre pela retirada de íons metálicos dos minerais, por meio de compostos orgânicos que percolam o substrato, como por exemplo, os produzidos pelas raízes de uma planta e que levam a decomposição química da rocha (Syers & Iskandar, 1973; Barbosa, 2014).

De acordo com Cardoso *et al.* (1998), a queluviação pode ser classificada em queluviação total e queluviação parcial:

a) Queluviação total

A queluviação total é caracterizada pela retirada total do alumínio e de bases dos minerais, resultando em produto residual silicoso.

b) Queluviação parcial

Já na queluviação parcial ou aluminossilitização, além da presença de sílica, há parte do alumínio e de algumas bases, que foram retirados de maneira incompleta. Os quais redistribuíram-se no perfil de intemperismo, resultando em argilominerais 2:1.

2.2.2 - Perfil de intemperismo

A atuação dos processos de decomposição e desintegração das rochas citados anteriormente, resulta em perfil de intemperismo com diferenciação vertical em camadas, que são denominadas de horizontes (Salomão & Antunes, 1998). A partir da análise de diferentes horizontes nos solos do Distrito Federal e tendo como base os estudos de Martins (2000), Pastore (1995) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), Cardoso (2002), elaborou uma nova proposta para a descrição dos horizontes em solos tropicais, Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Horizontes e sub-horizontes do perfil de alteração dos solos tropicais. (Cardoso, 2002).

Horizontes	Sub-horizontes
Horizonte O Horizonte A Horizonte B	-
Horizonte ferruginoso	Cascalho laterítico
	Couraça ferruginosa
	Carapaça
	Zona mosqueada
Horizonte saprolítico	Saprólito fino ou argiloso
	Saprólito ou saprólito grosso
	Rocha muito alterada
Rocha alterada	-
Rocha sã	-

Apesar da nova classificação possuir horizontes e sub-horizontes, devido o intemperismo local, a presença de todas essas divisões ao longo do perfil não é obrigatória e ocorre variação em suas espessuras (Jacintho *et al.*, 2012).

De acordo com Salomão & Antunes (1998) os horizontes O, A e B podem ser definidos como:

- Horizonte O: horizonte superficial, orgânico (mínimo de 20% de matéria orgânica), formado pelo acúmulo de substâncias húmicas e detritos vegetais, em locais de drenagem livre. Possui ocorrência relacionada a áreas florestais e pode ser distinguido do Horizonte A, devido a coloração mais escura e maior quantidade de matéria orgânica.
- Horizonte A: horizonte composto por matéria orgânica mineralizada, está localizado abaixo do horizonte O, mas ainda é considerado superficial. A variedade de tipos de Horizonte A está associada aos ambientes de sua formação, alguns com maiores teores de matéria orgânica, outros com menores. E dentre os horizontes que compõem o perfil de solo, apresenta a maior atividade biológica.
- Horizonte B: horizonte subsuperficial e subjacente ao Horizonte A. É formado pela alteração relativamente intensa do material original e/ou ganho de minerais e/ou constituintes orgânicos de outros horizontes.

Pastore (1995) e Martins (2000) descreveram os horizontes ferruginoso, saprolítico, rocha alterada e sã, bem como seus sub-horizontes:

- Horizonte ferruginoso: possui um ou mais sub-horizontes, que se distinguem pelo grau de endurecimento de feições pedológicas provenientes principalmente do enriquecimento de oxi-hidróxidos de ferro (Fe) e de maneira suplementar do alumínio (Al). Os sub-horizontes correspondem a:
 - Cascalho laterítico: é resultante da degradação de outros horizontes ferruginosos, que continham feições pedológicas endurecidas e soltas.
 - Couraça ferruginosa: é definido como sub-horizonte de acumulação absoluta ou relativa de Fe e Al. A mobilização de Fe de outros horizontes e sua concentração nesse sub-horizonte resulta na acumulação absoluta, enquanto a ocorrência de lixiviação seletiva da sílica e bases provoca a acumulação relativa. Em relação as feições pedológicas endurecidas, elas apresentam-se como nódulos, concreções, incrustações, entre outras.
 - Carapaça: trata-se de um sub-horizonte transicional entre a couraça e a zona mosqueada, o que se reflete em suas características físicas e químicas, que são consideradas intermediárias quando comparadas as dos dois sub-horizontes. Os nódulos encontrados nesse sub-horizonte possuem diferentes graus de endurecimento.
 - Zona mosqueada: sub-horizonte intermediário entre o saprolítico e os horizontes superiores. Apresenta concentração de oxi-hidróxidos de Fe, na forma de colóides avermelhados floculados. É mal drenado e pode ocorrer endurecimento irreversível, se exposto a condições secas.
- Horizonte saprolítico: o aspecto pálido desse horizonte é resultante do empobrecimento de Fe, por meio da translocação desse elemento para outros horizontes ou até mesmo retirado do perfil. Há formação de argilominerais devido a hidrólise parcial de silicatos. Este horizonte pode ser dividido três sub-horizontes, são eles:
 - Saprólito fino ou argiloso: é caracterizado pela presença de estrutura reliquiar da rocha de origem.
 - Saprólito ou saprólito grosso: constitui o sub-horizonte de transição entre o maciço de solo e o maciço rochoso. Podem ser identificadas rochas com diferentes estágios de alteração envolvidas por solo.
 - Rocha muito alterada: corresponde ao topo do maciço rochoso, possui menor resistência que a rocha sã e os minerais constituintes apresentam estágio de alteração avançado. Sendo comum, a ocorrência de alteração mais intensa ao longo de juntas e fraturas do maciço.

- Rocha Alterada: horizonte que apresenta o processo de alteração em estágio inicial, o que resulta em maior resistência que o sub-horizonte de rocha muito alterada.
- Rocha sã: há o predomínio de rocha sã, ou seja, não aparenta sinais evidentes de alteração.

2.2.3 - Solos tropicais

Os solos tropicais apresentam particularidades tanto nas propriedades físico-químicas, como no comportamento hidromecânico, em decorrência dos processos geológicos e/ou pedológicos em regiões tropicais úmidas (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985). Segundo Mio (2005), o entendimento tanto do comportamento, quanto a identificação da variabilidade de solos tropicais está relacionada a sua gênese e estrutura. Sendo assim, Villibor *et al.* (2009), dividiram os solos tropicais em duas grandes classes: solos lateríticos e solos saprolíticos.

2.2.3.1 - Solos lateríticos

São solos profundamente intemperizados, com ocorrência superficial e são característicos de regiões tropicais úmidas com boa drenagem (Villibor *et al.*, 2009). Possuem alta porosidade, distribuição bimodal dos poros, com predomínio de macroporos (entre os agregados) e microporos (interior dos agregados) e agregações metaestáveis, diante da variação de umidade ou estado de tensão (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015), Figura. 2.2.

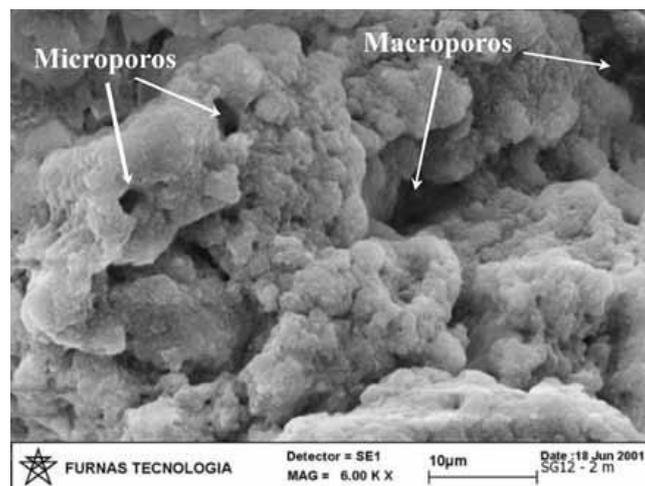


Figura 2.2 - Microestrutura de um solo laterítico. (Guimarães, 2002).

Segundo Cardoso (2002), a alitização (eliminação total da sílica e geração de oxihidróxidos de ferro e alumínio) corresponde a um processo típico que leva a formação dos solos profundamente intemperizados no Cerrado Brasileiro. Logo, a mineralogia dos solos lateríticos é composta principalmente por caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio e quartzo, esse último geralmente mineral primário devido à alta resistência ao intemperismo, mas também neoformado como sugerido por Senaha (2019). Devido à presença desses óxidos, Villibor & Alves (2019), atribuem a estes solos comumente colorações de vermelho, amarelo, alaranjado e marrom.

2.2.3.2 - Solos saprolíticos

São considerados solos residuais jovens e se desenvolvem devido a decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha matriz, preservando suas estruturas. Localizam-se de maneira subjacente aos solos superficiais e são constituídos principalmente por minerais primários, sendo comum a presença de argilominerais expansivos. Quanto a sua microestrutura, as partículas apresentam-se de maneira individualizada, Figura. 2.3 (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015; Villibor & Alves, 2019).

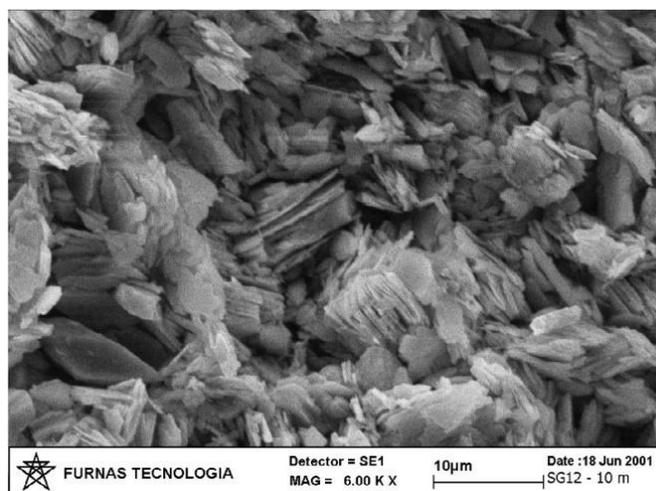


Figura 2.3 - Microestrutura de um solo saprolítico. (Guimarães, 2002).

2.3 - ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

A ocorrência de solos locais com características físicas, comportamento mecânico e/ou hidráulico que diferem parcial ou integralmente daqueles exigidos em projeto para a execução de obras de engenharia, leva muitas vezes à remoção do solo e substituição por um de melhor

qualidade, à modificação do projeto para adequação ao solo existente ou à estabilização do mesmo para adequá-lo ao projeto (Medina, 1987).

Dentre as soluções apresentadas, a estabilização do solo corresponde a melhoria de propriedades tais como resistência, permeabilidade e deformabilidade por meio da incorporação de outra substância/material (Huss, 2018). Os métodos empregados para a estabilização dos solos são classificados como mecânicos, físicos, químicos e biológicos. A escolha do método mais adequado resulta da avaliação dos custos, finalidade da obra, propriedades do solo que serão modificadas e as características dos estabilizantes que serão adicionados (Guimarães, 1997).

Na estabilização química, a adição de uma substância química altera as propriedades do solo através de reações químicas entre os grãos de solo e o aditivo. Os aditivos empregados para a estabilização dos solos podem ser cal, cimento, asfaltos ou betumes, entre outros (Oliveira, 2011).

2.3.1 - Estabilização dos solos com cal

A adição de cal ao solo constitui uma das técnicas para melhoria ou estabilização mais antigas empregadas pelo homem. A construção pelos romanos em 312 a.C. da Via Ápia, no sul da Itália, destaca-se no âmbito rodoviário como uma das primeiras vias a utilizar esta técnica (Guimarães, 1997). Entretanto, ainda que a cal tenha alta aplicabilidade para estabilização dos solos, é importante o conhecimento tanto dos mecanismos que atuam na mistura solo-cal, como das consequências das reações com a cal para o material estabilizado.

2.3.1.1 - Reações solo-cal

Após a adição de cal a um solo fino que contém água, verifica-se aumento do pH e uma série de reações químicas que dependem do tempo de interação solo-aditivo e por isso são divididas em uma etapa rápida, com duração de horas e dias e outra etapa mais lenta, com período de meses a anos. A fase rápida é caracterizada pelas trocas catiônicas, floculação e/ou defloculação e carbonatação. Já na fase lenta destacam-se as reações pozolânicas, responsáveis pelo aumento da resistência, por meio da geração de produtos cimentantes (Castro, 1995).

Nas trocas catiônicas, o cálcio constituinte da cal substitui cátions trocáveis na superfície dos argilominerais (Queiroz de Carvalho, 1988). Este fenômeno é explicado pela divalência dos cátions de cálcio, desse modo, cátions com maior valência substituem os de menor, como

exemplificado pela série de adsorção preferencial dos principais cátions presentes no solo: $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+}$. Portanto, é possível notar a facilidade de substituição dos cátions comuns nas argilas pelo Ca^{2+} (Little, 1995).

Como resultado da troca catiônica, ocorre redução do tamanho da camada de água intersticial, promovendo a aproximação das partículas de argila, denominada de floculação, Figura 2.4. Portanto, a ocorrência de floculação é proporcionada pela concentração eletrolítica da água intersticial e diminuição na espessura da camada de água, mas também pelo aumento do pH e distanciamento do Ponto de Carga Zero (PCZ) (Little, 1995; Rezende, 2003).

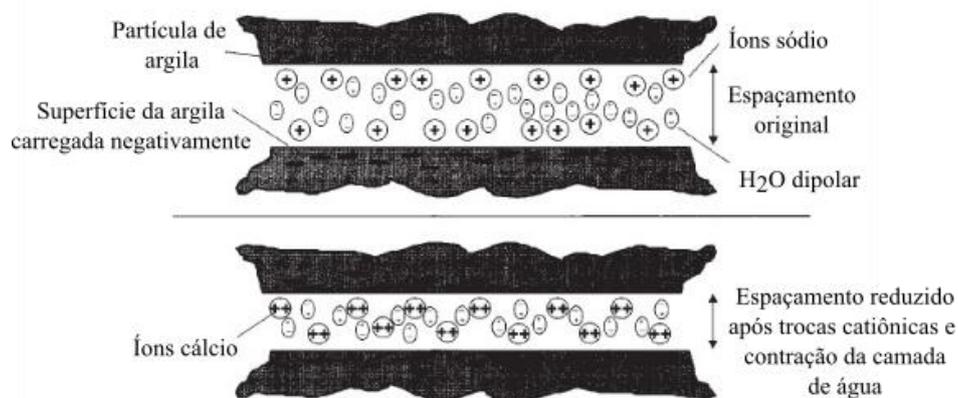


Figura 2.4 - Trocas catiônicas. (Modificado - Prusinski & Bhattacharja 1999).

Nóbrega (1991) estabelece que para um material apresentar características pozolânicas, ou seja, propriedades ligantes, é necessário que haja adição de cal e presença de água, sendo submetido a temperatura ambiente. Campello (*et al.*, 2000), atribui o aumento da resistência mecânica verificada nas misturas solo-cal as reações pozolânicas, em razão da geração de produtos cimentantes devido as reações entre sílica, alumina e ferro presentes no solo, com a cal e a água. Para Prusinski & Bhattacharja (1999), as reações pozolânicas podem resultar ainda na redução da plasticidade e melhora da graduação do solo.

Já a carbonatação é considerada uma reação não benéfica para a estabilização solo-cal, pois resulta em uma cimentação relativamente fraca. O óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio, da cal e o dióxido de carbono presente no ar, reagem e formam cimento de carbonato de cálcio e magnésio, através da retirada de cátions de cálcio nas superfícies de argilas floculadas. Desse modo, o composto resultante possui menor resistência que aqueles originados por cimentação nas reações pozolânicas, como compostos de silicatos e aluminatos (Guimarães, 1971; Azevedo, 2010).

2.3.1.2 - Alterações provocadas pela adição de cal

Para Ayala *et al.* (2018), a eficiência da mistura solo-cal está relacionada com as propriedades da cal e com a composição químico-mineralógica do solo. Segundo Pessoa (2004), no geral, a cal promove alterações favoráveis em algumas propriedades dos solos que contém argilas. Enquanto Barbosa (2013), ressalta que a melhoria na resistência e na durabilidade dos solos, proporcionada pela adição da cal, não ocorre em todos os solos e que depende de fatores como: o tipo de solo, a escolha da cal a ser utilizada e a quantidade de cal empregada, o tempo e as condições de cura e a temperatura. Assim, serão detalhadas algumas modificações no comportamento dos solos quando adicionada a cal, como:

a) Granulometria

A agregação ou floculação do solo, é o principal efeito relacionado a adição de cal ao solo. Resultando em solo mais grosseiro, friável e com maior permeabilidade (Pessoa, 2004). Leite *et al.* (2016) em análises sobre a influência da cal em um solo expansivo de Sergipe, constataram que a adição de 3%, 6% e 9% de cal hidratada CH-I promoveu a redução da fração argila e aumento das frações silte e areia do solo em tempo de cura de 7 dias.

Entretanto, é possível que as mudanças texturais provocadas pela cal também levem a desagregação dos solos. Ayala (2020), ao avaliar a incorporação de 4%, 6% e 10% de cal hidratada CH-I e CH-III em um solo altamente intemperizado, coletado entre 2 e 3 metros de profundidade, no Distrito Federal, verificou aumento no teor de finos em misturas solo-cal, sendo os maiores teores de finos observados após 1 ano de cura em campo. A autora ainda concluiu que a estabilidade estrutural dos agregados e microagregados, foi comprometida pela ação da cal.

Aguiar (2014), analisou três solos de comportamentos distintos: argila arenosa altamente intemperizada proveniente de Goiânia, areia siltosa com baixo grau de intemperização da Usina Hidrelétrica (UHE) de Corumbá, ambos locais situados no estado de Goiás e areia argilosa do Aproveitamento Hidrelétrico de Peixe Angical, no estado do Tocantins. Com a adição de 2%, 4%, 6% e 8% de cal hidratada CH-I, foi observada agregação do solo da UHE de Corumbá, independente do teor de cal incorporado. Enquanto para o solo de Goiânia, a cal não afetou de maneira significativa o comportamento da curva granulométrica, mas ao verificar a curva de compactação, concluiu-se que a incorporação de 2% de cal resultou em desagregação. Já o solo do Aproveitamento Hidrelétrico de Peixe Angical, assemelha-se ao

solo de Goiânia por apresentar desagregação com o acréscimo de 2% de cal, mas a adição dos demais teores de cal, resulta em processo de agregação.

b) Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) ou acidez do solo corresponde a concentração de íons de hidrogênio (H^+) existentes na solução do solo. Nas regiões de clima úmido e quente, comumente ocorre a substituição dos cátions presentes no solo pelo íon H^+ disponível no ácido carbônico, proveniente da dissolução do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, realizada através das águas pluviais e as que circulam em superfície. Situação inversa é constatada pela incorporação da cal, pois os íons H^+ são substituídos pelos cátions Ca^{2+} e/ou Mg^{2+} da cal, resultando no aumento de pH, em direção a condições de alcalinidade (Guimarães, 1971).

Aguiar (2014) relaciona a destruição da microestrutura do solo com a adição de produtos químicos, que pode ocorrer em quatro situações: quando o solo possui pH menor que o Ponto de Carga Zero (PCZ) e após a adição do produto químico, ocorre a elevação do pH para valores acima do PCZ; quando o solo apresenta pH maior que o PCZ e a incorporação de produto químico provoca diminuição do pH para valores menores que o PCZ; quando as ligações cementícias que unem as partículas, são desfeitas pelo produto químico e a geração do aumento das forças de repulsão, que promovem a instabilização da interação entre as partículas, devido a presença do produto químico.

Rezende (2003), a partir de análises de solos lateríticos de dois trechos experimentais executados no Distrito Federal, com mineralogia semelhante e acrescidos de diferentes teores de cal hidratada CH-I (2%, 3% e 6%), reconheceu a ocorrência de desagregação no Trecho 1, para o solo com 2% de cal, onde o pH se aproximou do PCZ, enquanto houve agregação no Trecho 2, do solo quando incorporado 3% e 6% de cal e onde o pH apresentou afastamento do PCZ.

c) Peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e umidade ótima (w_{ot})

Geralmente, ao adicionar cal ao solo ocorre redução do peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e aumento do teor de umidade ótima (w_{ot}), em relação ao solo *in natura* (Aguiar, 2014). Isso se deve a floculação provocada pela cal, que leva a acréscimos tanto na quantidade como no tamanho de vazios no solo. A estrutura floculada é capaz de resistir a compactação e apresentar um índice de vazios mais alto, levando a redução do peso específico aparente seco

máximo. Assim, com a maior quantidade de vazios, também é necessária mais água para preenchê-los, acarretando em umidade ótima maior e achatamento da curva de compactação (Sivapullaiah *et al.*, 1998).

Keybondory & Abdi (2021) e Mohamed *et al.* (2021) observaram tal situação ao avaliar um solo argiloso próximo de uma estrada florestal no norte do Irã, com a incorporação de 5%, 7% e 9% de cal e cinco amostras de solos lateríticos do Sudão, com adição de 5%, 7%, 9% e 11% de cal hidratada, respectivamente.

Keybondory & Abdi (2021), encontraram aumentos na umidade ótima de 9% (misturas de solo com 5% e 7% de cal) e de 5% (solo com adição de 9% de cal), enquanto houve redução no peso específico aparente seco máximo, de 5% (solo com 9% de cal) e 4% (misturas solo-cal com 5% e 7% de cal). Mohamed *et al.*, (2021), identificaram aumentos sucessivos na umidade ótima com o acréscimo do teor de adicionado, com valores de w_{ot} entre 10% e 11% mais elevados, já no peso específico aparente seco máximo houve queda de até $0,81 \text{ g/cm}^3$, quando adicionada 11% de cal.

Delgado (2007), reconheceu a tendência de achatamento das curvas de compactação devido a incorporação da cal, ao avaliar sete latossolos provenientes do Distrito Federal, com a adição de 2%, 3%, 4% e 6% de cal hidratada. Os valores de peso específico aparente seco máximo diminuíram. Entretanto, as umidades ótimas não apresentaram aumentos de maneira constante, pois houve resultados que se mantiveram inalterados e outros que decresceram, a depender do solo ensaiado e da quantidade de cal utilizada. A autora ainda destaca que além da textura, o comportamento dos solos é influenciado por outros fatores como a mineralogia e a forma da organização estrutural.

d) Resistência a compressão simples (RCS) e a tração por compressão diametral (RTCD)

Apesar do acréscimo de cal ao solo, geralmente, provocar o aumento da capacidade de suporte do mesmo, nem todos os solos apresentarão ganhos de resistência com a incorporação do aditivo químico. Já que além da cal, fatores como o tipo de solo, a densidade e o tempo de cura influenciam a alteração da resistência da mistura solo-cal (Guimarães, 1971; Pessoa, 2004).

Klinsky *et al.* (2014), verificaram, a resistência a compressão simples (RCS) em dois solos argilosos, denominados de S-1 e S-2, coletados em Santa Isabel, em São Paulo, aos quais foram incorporados 3%, 5% e 7% de cal hidratada CH-I e submetidos a cura por 3, 7 e 28 dias. O acréscimo de apenas 3% de cal promoveu aumento de RCS em torno de 50% no solo S-1 e

80% no solo S-2. Contudo, o mesmo comportamento não foi observado para os demais teores, pois 5% e 7% de cal resultaram em aumentos, respectivamente, de 75% e 100% na RCS do solo S-1 e ganhos pouco significativos no solo S-2. Em relação ao tempo de cura, o solo S-1 não apresentou aumentos consideráveis na RCS com 7 e 28 dias, enquanto no solo S-2 os valores de RCS foram superiores com o aumento do tempo de cura.

Joaquim (2017) avaliou a RCS e a resistência a tração por compressão diametral (RTCD) em um solo laterítico e outro não laterítico coletados entre 2 e 5 metros de profundidade na região de Campinas, em São Paulo, com adição de 2%, 4%, 6% e 8% de cal hidratada. Em condições ótimas e compactados na energia normal, o solo laterítico apresentou RCS máxima de 1280 kPa e no solo não laterítico, foi verificado valor máximo de RCS de 650 kPa, ambos com adição de 8% de cal. Já nos ensaios de RTCD, as misturas de solo com 8% de cal apresentaram maiores ganhos de resistência com 435% e 270% em relação ao solo sem cal, respectivamente, no laterítico (80 kPa) e não laterítico (130 kPa). Este último com compactação utilizando a energia intermediária. Assim, os resultados mais expressivos do solo laterítico são atribuídos ao maior teor de argila, o que implica em maior quantidade de produtos cimentantes e por consequência em melhor desempenho (Arabani & Veis Karami, 2005).

e) Retenção de água

Lee & Wray (1995) definem a sucção como a quantidade de energia associada a capacidade de retenção de água do solo em seus poros. Podendo ainda ser dividida em duas componentes, a sucção mátrica, que representa a energia da água livre nos poros e possui relação com os fenômenos de capilaridade e adsorção e a sucção osmótica, que é decorrente da presença de íons e substâncias dissolvidos na água (Fredlund & Rahardjo, 1993). Estas propriedades relacionam-se de acordo com a Equação 2.1:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.1)$$

Onde:

ψ = sucção total;

$(u_a - u_w)$ = sucção mátrica, u_a : poropressão da fase ar, u_w : poropressão da água;

π = sucção osmótica.

Delgado (2007), verificou que em curvas características de latossolos, a estabilização com cal provocou alterações na forma das curvas, pois a ação química da cal influencia a macroporosidade destes solos. Assim, as variações na curva característica dependem de como ocorre a interação entre as partículas de solo e a cal, ou seja, se haverá agregação ou desagregação.

Ayala (2020) obteve reduções semelhantes nos valores de sucção na zona de microporosidade ao adicionar diferentes porcentagens de cal (4%, 6%, e 10%), sendo que a maior redução foi encontrada na zona de meso e macroporos, com a incorporação de 4% de cal e para 10%, houve aproximação da curva do solo *in natura*.

Nos solos finos analisados por Rezende (2003), foi identificado no Trecho Experimental 1, aumento nos valores de sucção com a adição de 2% de cal, enquanto no Trecho Experimental 2, tanto as curvas características do material não estabilizado, quanto as das misturas solo-cal, apresentaram comportamento semelhante.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS

3.1.1 - Solos estudados

Os solos utilizados na presente pesquisa são provenientes de dois furos de sondagem a trado manual, do tipo trado cavadeira, denominados de Perfil 1, com 7,02 m de profundidade e Perfil 2, com 8,24 m de profundidade, executados respectivamente, nos dias 22 e 23 de Abril de 2019. A escolha dos locais das sondagens baseou-se na diferença acentuada de altitude entre os dois, que é de 155 m, propiciando dessa maneira, a análise dos perfis de intemperismo em diferentes estágios de evolução, Figura 3.1.



Figura 3.1 – Perfil de elevação entre os locais das sondagens.

Foram descartados até 0,80 m iniciais de solo de cada perfil para evitar influência antrópica e matéria orgânica em excesso. Na Tabela 3.1 e na Figura 3.2 é possível observar a divisão de cada perfil em três intervalos de profundidade, que ocorreu em razão das próprias características dos perfis de intemperismo, abrangendo solos mais superficiais, intermediários e mais profundos e da quantidade de solo necessária para a realização dos ensaios laboratoriais.

Tabela 3.1 - Divisão dos Intervalos dos Perfis 1 e 2.

Sondagens		Profundidades (m)
Perfil 1	Intervalo 1	0,80 - 2,55
	Intervalo 2	2,55 - 4,32
	Intervalo 3	4,32 - 7,02
Perfil 2	Intervalo 1	0,60 - 3,31
	Intervalo 2	3,31 - 5,68
	Intervalo 3	5,68 - 8,24



Figura 3.2 – Aspecto físico natural dos solos dos Intervalos dos Perfis 1 e 2.

3.1.2 - Cal hidratada - CH-I

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal CH-I possui maior concentração de óxidos totais ($\geq 90\%$) e a menor presença de impurezas (máximo de 10%) em relação aos outros tipos de cal. Lovato (2004), em estudo sobre a estabilização de um Latossolo Vermelho, em Cruz Alta, no Rio Grande do Sul, utilizando a cal cálcica e a dolomítica, constatou que a cal cálcica promoveu maiores valores de resistência a compressão simples, à tração na compressão diametral e módulo de resiliência. Portanto, foi escolhida a Cal Hidratada CH-I cálcica da linha Massical do fabricante Ical para ser utilizada no presente estudo, Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características da Cal Hidratada CH-I fornecidas pelo fabricante.

Dados técnicos da Cal Hidratada CH-I	
Aspecto	Pó seco branco
Composição	Hidróxido de cálcio, magnésio e aditivos
Óxidos não hidratados	0
Poder de incorporação de areia	> 4
Nº Blaine* (g/cm ²)	7200
Massa unitária	0,55
Plasticidade	> 120%
Retenção de água	> 80%
Retido na peneira 30	< 0,5
Retido na peneira 200	< 7

*Nº Blaine: superfície especificada da cal, determinada através do permeabilímetro de Blaine.

3.2 - MÉTODOS

Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia, no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB) e no Laboratório de Difractometria de Raios-X, todos localizados na Universidade de Brasília (UnB).

3.2.1 - Preparação das amostras

A preparação das amostras ocorreu sem secagem prévia do solo até próximo a umidade higroscópica. Realizou-se apenas a secagem ao ar até a umidade que permitisse a mistura de forma homogênea dos solos de cada intervalo e posteriormente a secagem para obter as umidades ótimas nas curvas de compactação.

Nesta última, após a secagem até as umidades pré-determinadas, as amostras foram colocadas em sacos plásticos e levadas para a câmara úmida por período de 24 horas, para garantir a distribuição da umidade de maneira homogênea por toda a amostra.

No Perfil 1, foi encontrado nível d'água a 2,90 m de profundidade. Assim, para manter maior aproximação com a estrutura microagregada original, foi possível a redução manual de agregações compatíveis para passagem na peneira nº 4 (4,75 mm). Sendo realizado o mesmo procedimento nos demais intervalos.

Adotou-se tais procedimentos de secagem a fim de minimizar as diferenças entre o solo estudado em laboratório e o solo encontrado em campo, uma vez que a secagem prévia pode provocar fissuras em agregados e microagregados, resultantes do acréscimo de temperatura, pois os minerais que os compõem podem possuir diferentes coeficientes de expansão térmica, levando a maior suscetibilidade de quebra (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

As exceções a esta preparação foram as amostras utilizadas para estimar o teor mínimo de cal, para a determinação do peso específico dos grãos (γ_s) e a caracterização mineralógica. Já que no primeiro método, utiliza-se a quantidade de solo seco ao ar com equivalência com a quantidade do solo seco em estufa e os demais requerem a utilização de estufa para a secagem completa do solo.

3.2.2 - Adição de cal aos solos

Segundo a norma DNIT 419 (DNIT, 2019), é possível estimar o teor mínimo de cal necessário para promover a estabilização química dos solos. Tal método consiste na separação de 5 amostras de solo seco ao ar, destorroado e passante na peneira nº 40, cada uma em quantidade equivalente a 25 g de solo seco em estufa. Às amostras de solo são adicionados teores de cal que variam de 2% a 10% em relação ao peso de 25 g de solo seco.

Após a mistura entre o solo e a cal, acrescenta-se 100 ml de água destilada e inicia-se a agitação do recipiente, com duração de 30 segundos, para que a homogeneização da solução solo-cal-água ocorra de maneira completa. Assim, o processo de agitação deve ocorrer a cada 10 minutos pelo período de 1 hora, onde nos últimos 15 minutos serão registrados os valores de potencial hidrogeniônico (pH). A partir dos ensaios de pH, busca-se a menor porcentagem de cal necessária para atingir o pH de 12,4, a qual indica o teor mínimo de cal que possibilita a estabilização do solo, Figura 3.3.

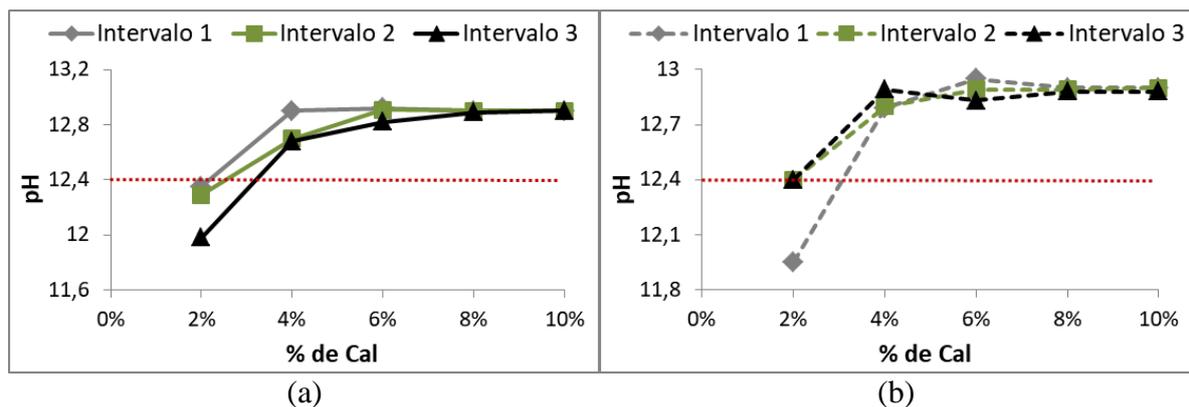


Figura 3.3 – Estimativa do teor mínimo de cal: a) Perfil 1; b) Perfil 2.

Rezende (2003) observou que a adição de 2% de cal a um solo fino promoveu sua desagregação, sendo verificada agregação de outro solo fino ao adicionar maiores teores de cal, como, por exemplo, 6%. Logo, para melhor analisar a influência do teor de cal no solo, foram utilizadas três porcentagens de cal. Desse modo, a todos os solos estudados foram acrescidos 2%, 5% e 8% de cal CH-I em relação ao peso seco de solo, determinado pelo Método da estufa de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Após a adição da cal às amostras de solo, estas foram misturadas pela agitação manual dos sacos plásticos, até a distribuição homogênea da cal. As misturas solo-cal foram colocadas em repouso por 15 minutos, para permitir a interação entre os grãos de solo e as partículas da cal e garantir a padronização do tempo para todas as amostras antes da compactação dos corpos de prova.

3.2.3 - Caracterização física

a) Granulometria

Os procedimentos necessários para a realização da análise granulométrica dos solos estão descritos na NBR 7181 (ABNT, 2016b). Entretanto, como esta pesquisa tem por finalidade a avaliação da mudança textural, o ensaio foi executado com as seguintes modificações:

- Passagem do solo pela peneira de nº 4 (4,75 mm) e não de nº 10 (2 mm).
- Utilização de 100g de solo e não de 70g, pois as amostras encontravam-se úmidas.
- Considerar a umidade de cada amostra ensaiada e não a umidade higroscópica.
- Não adoção do aparelho dispersor em todos os solos e do hexametáfosfato de sódio (defloculante) nas misturas solo-cal, para evitar interferências na análise da ação da cal.

b) Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg correspondem ao Limite de Liquidez (w_L) e ao Limite de Plasticidade (w_p), sendo o Índice de Plasticidade (IP) a diferença entre o primeiro e o segundo. De acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016c), o Limite de Liquidez representa o teor de umidade necessário para o fechamento de uma ranhura feita no solo, com comprimento de 1,27 cm na concha do aparelho Casagrande, ao aplicar 25 golpes.

Enquanto a NBR 7180 (ABNT, 2016d) estabelece que o Limite de Plasticidade compreende o teor de umidade, no qual é possível observar fissuras ou trincas em peças cilíndricas de solo com 3 mm de diâmetro.

c) Peso específico dos grãos (γ_s)

O peso específico dos grãos (γ_s) foi obtido por meio do pentapicnômetro, modelo pentapyc 5200e da marca Quantachrome Instruments. Antes das amostras de solo serem levadas ao equipamento é necessário o destorroamento com auxílio de almofariz e mão de gral e secagem em estufa com temperaturas entre 105 e 110 °C, por 24 horas. Determinou-se o peso de solo seco (30 g) em balança de precisão e em seguida, o solo mais cápsula foram levados para uma, das cinco células do pentapicnômetro. O equipamento faz a injeção de gás hélio na célula, até atingir uma determinada pressão. Assim, obtém-se o volume de sólidos na célula (volume da célula menos o volume de gás injetado) e juntamente com o peso de solo seco já definido na balança de precisão, é determinado o peso específico dos grãos a partir de 5 análises por amostra, sendo o resultado final a média das 5 análises.

3.2.4 - Caracterização química

3.2.4.1 - Composição química

A composição química dos solos *in natura* dos Intervalos 2 e 3 do Perfil 1 e de todos os Intervalos do Perfil 2, foi determinada pelo Laboratório Soloquímica - Análises para Agricultura e Meio Ambiente.

3.2.4.2 - Potencial hidrogeniônico (pH)

Segundo Cardoso (2002), o pH dos solos é um fator de grande influência para a agregação das partículas, refletindo também, na distribuição estrutural entre os vazios e sólidos do solo. Assim, a medição do pH dos solos ocorreu de acordo com a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). Em copo plástico de 100 mL, foram adicionados 10 g de solo e 25 mL de água destilada, agitados por 60 segundos com auxílio de bastão de vidro e em seguida, permanência em repouso por 1 hora. Com o término desse período, deve-se agitar a amostra com bastão de vidro para homogeneizar a solução e realizar a leitura do pH.

O mesmo procedimento foi adotado para a mistura de 10 g de solo e 25 mL de solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol/L⁻¹. Sendo os valores de pH obtidos por meio do pHmetro AK95 da marca AKSO.

Foi estabelecido o tempo de leitura total de 15 minutos tanto para amostras de solo em água destilada, como as de solo em KCl, com medições realizadas a cada 1 minuto. Notou-se que ao final desse período os resultados de pH apresentavam valores constantes, ou seja, pelo menos nos 3 últimos minutos as leituras obtidas eram iguais. O tempo de acompanhamento dos valores de pH foi fixado para minimizar a influência das reações de oxirredução nos resultados e possibilitar a realização de dois ensaios de pH por condição estudada, sendo o resultado final a média aritmética entre esses dois valores.

Com a obtenção dos resultados de pH em água destilada, é possível realizar a classificação dos solos de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Classificação dos solos de acordo com o pH. (Bigarella *et al.*, 1996).

Classificação	Ácido	Moderadamente ácido	Praticamente neutro	Neutro	Alcalino
pH	pH < 5,5	5,5 < pH < 6,4	6,5 < pH < 6,9	pH = 7	pH > 7

A partir dos resultados de pH encontrados em água destilada e em KCl, é possível determinar o ponto de carga zero (PCZ), que indica o ponto onde o balanço entre todas as cargas é igual a zero e o ΔpH , Equações 3.1 e 3.2 (Keng & Uehara, 1974; Benites & Mendonça, 1998). Após obter os valores de ΔpH , pode-se indicar a predominância no solo de argilas silicatadas ou óxidos/hidróxidos de ferro e alumínio, Tabela 3.4.

$$\text{PCZ} = 2 * \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.1)$$

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.2)$$

Onde:

pH_{KCl} = valor do pH encontrado em KCl;

$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ = valor do pH encontrado em água destilada.

Tabela 3.4 - Classificação dos solos de acordo com o ΔpH . (Lima, 2003).

ΔpH	Classificação
Negativo	Predomínio de argilas silicatadas
Positivo	Predomínio de óxidos/hidróxidos de ferro e de alumínio

3.2.5 - Caracterização mineralógica

Para identificação dos minerais presentes nos solos estudados, foram realizados ensaios de Difração de Raios-X (DRX) com amostras retiradas a cada um metro, dos Perfis 1 e 2. Senaha (2019) obteve a mineralogia constituinte do Perfil 2, por meio do difratômetro da marca Siemens no Laboratório do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS, em Aparecida de Goiânia, Goiás. Enquanto os solos do Perfil 1, foram submetidos ao difratômetro da marca Rigaku do Laboratório de Difractometria de Raios-X do Instituto de Geociências da UnB.

A preparação dos solos do Perfil 1, iniciou com secagem em estufa e posterior moagem manual em almofariz de ágata até disposição uniforme dos grãos. Para determinação mineralógica da fração total, as amostras foram colocadas em uma cavidade rasa de lâminas de vidro, levemente compactadas e levadas ao difratômetro.

Já para definir a mineralogia da fração argila, ocorreu a adição de 3 g de solo e água destilada em tubos de ensaio plásticos, que são levados para centrífuga por 7 minutos. Ao fim desse período, a fração grossa é descartada e a fração argila mais água destilada passa por centrifugação durante 30 minutos, para que ocorra a separação da fração argila. A qual é transferida para lâminas de vidro, onde é submetida a técnica do esfregaço e posteriormente são levadas para o difratômetro.

Com a análise da fração total é possível identificar, de maneira geral, os principais minerais presentes no solo, enquanto a análise da fração argila corresponde a procura mais específica pelos argilominerais predominantes.

3.2.6 - Classificação MCT

A classificação dos solos foi realizada com base na norma DNER-CLA 259/96 (DNER, 1996) a partir de corpos de prova compactados de acordo com a norma DNER-ME 258/94 (DNER, 1994a). Na Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) os solos são classificados em solos que possuem comportamento laterítico (L) e solos que não apresentam comportamento laterítico (N). Sendo o primeiro grupo composto por areias com pouca argila (LA), areias argilosas e argilas arenosas (LA'), argilas e argilas arenosas (LG') e o segundo formado por areias, areias siltosas e siltes (NA), areias siltosas e areias argilosas (NA'), siltes, siltes arenosos e argilosos (NS') e argilas, argilas arenosas e argilas siltosas (NG').

3.2.7 - Curvas de compactação mini-Proctor

Para a determinação do peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e da umidade ótima (w_{ot}) dos solos, foi realizado o ensaio de compactação mini-Proctor seguindo a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994b). Como foi utilizada a energia intermediária, aplicou-se 6 golpes na face superior, em seguida ocorreu a inversão do corpo de prova e aplicação de mais 6 golpes.

Após compactados, sem reuso de material para evitar que a quebra progressiva dos grãos modificasse o comportamento dos solos, os corpos de prova foram pesados e tiveram alturas e diâmetros determinados. Resultando em curvas de compactação com 5 pontos cada, onde as umidades de cada ponto apresentaram diferença de aproximadamente 2%.

3.2.8 - Resistência à compressão simples (RCS)

O ensaio para determinação da resistência à compressão simples (RCS) ocorreu seguindo os procedimentos determinados pela NBR 12770 (ABNT, 1992). Foram compactados corpos de prova, com aproximadamente 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, atendendo a relação 2:1, em energia intermediária, utilizando-se 4 camadas e com umidades equivalentes as umidades ótimas definidas pelas curvas de compactação.

Após a compactação, os corpos de prova foram envolvidos em papel filme e colocados em sacos plásticos, para evitar perda da umidade durante os tempos de cura. A ruptura ocorreu em Prensa CBR/Marshall Automatizada da marca Solotest, com velocidade constante de 1,26 mm por minuto. Antes da ruptura os corpos de prova foram pesados e medidos e após a ruptura houve a determinação da umidade segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016a), Figura 3.4.



Figura 3.4 - Ruptura do corpo de prova após o ensaio de resistência à compressão simples.

Como estabelecido na norma NBR 12770 (ABNT, 1992), foram efetuados os cálculos por meio das Equações 3.3 a 3.5.

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta H}{H} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde:

ε = Deformação axial específica (%);

ΔH = Variação da altura do corpo de prova (mm);

H = Altura inicial do corpo de prova (mm).

$$A = \left(\frac{100 \cdot A_i}{100 - \varepsilon} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

A_i = Área da seção transversal média inicial (m²);

ε = Deformação axial específica, correspondente a esse carregamento (%).

$$RCS = \frac{P}{A} \quad (3.5)$$

Onde:

RCS = Resistência a compressão simples;

P = Carga aplicada (kN).

3.2.9 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ocorreu de acordo com a norma DNER-ME 181 (DNER, 1994c) e 136/2018 (DNIT, 2018). Com os solos em suas respectivas umidades ótimas, foram preparados corpos de prova de aproximadamente 25 mm de altura e 50 mm diâmetro, atendendo a relação 1:2. Na compactação, foi adotada energia intermediária e após a mesma, os corpos de prova foram embalados em papel filme e colocados em sacos plásticos para início dos tempos de cura. Colocou-se sobre cada corpo de prova (CP) papéis filtro destinados à determinação das sucções mátricas e totais.

Ao final da cura, retirou-se e pesou-se os papéis filtro e todos os corpos de prova foram pesados, medidos e levados para a Prensa CBR/Marshall Automatizada da marca Solotest, para serem rompidos a velocidade constante de 1,26 mm por minuto, Figura 3.5. Após a ruptura, as umidades dos corpos de prova foram determinadas segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016a) e foram obtidas as resistências a tração por compressão diametral por meio da Equação 3.6.

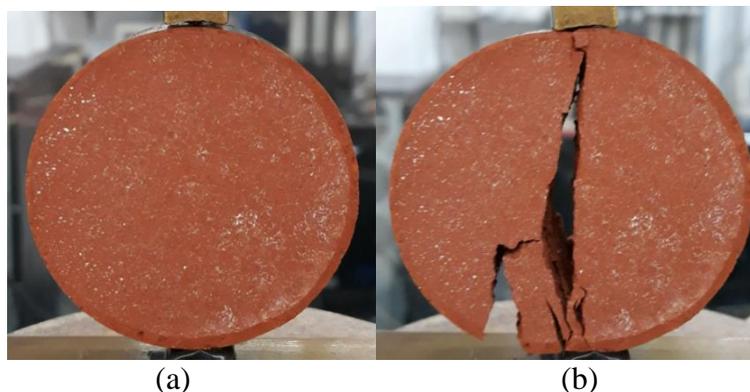


Figura 3.5 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: a) Antes da ruptura; b) Após a ruptura.

$$RTCD = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (3.6)$$

Onde:

RTCD= Resistência a tração por compressão diametral;

F = Carga máxima obtida no ensaio (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (cm);

H = Altura do corpo de prova (cm).

3.2.10 - Determinação da sucção

A sucção mátrica e a sucção total atuantes nos corpos de prova, foram obtidas por meio da técnica do papel filtro seguindo a norma D5298 (ASTM, 2010). Na sucção mátrica, a água presente no solo é transferida para o papel filtro pelo contato direto entre papel e corpo de prova até atingir o equilíbrio de sucção entre o papel e o corpo de prova. Já na sucção total, o vapor úmido proveniente do corpo de prova é que transfere água para o papel filtro até que seja atingido o equilíbrio entre a sucção atuante no solo e a atuante no papel. Assim, em ambos os ensaios foram utilizados papéis filtro da marca Quanty, recortados com 45 mm e 49 mm de diâmetro.

Em uma cápsula de metal, é colocado o papel filtro de 49 mm, seguido pelo de 45 mm e logo após o de 49 mm, que manterá contato com o corpo de prova de 50 mm (mesmo utilizado no ensaio de RTCD) que a ele se sobrepõe. O papel em contato com o corpo de prova e o da base da cápsula devem ser maiores para evitar a contaminação do papel do meio, que é utilizado para determinação da sucção mátrica. Sobre o corpo de prova, é colocado um separador para impedir o seu contato com os dois papéis filtro de 45 mm que a ele se sobrepõe para medição da sucção total. Nesse caso, foi utilizada uma abraçadeira de nylon da marca Western, sendo a sucção total obtida a partir do papel mais próximo do corpo de prova. Portanto, na parte inferior do corpo de prova onde há contato entre papel filtro e corpo de prova, ocorre a montagem do ensaio para determinação da sucção mátrica e na parte superior onde não há contato direto entre corpo de prova e papel filtro, representa o ensaio para obtenção da sucção total, Figura 3.6.

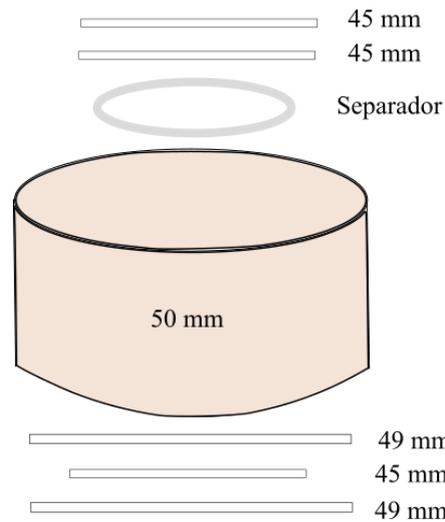


Figura 3.6 - Montagem dos ensaios de sucção mátrica (parte inferior do corpo de prova) e total (parte superior do corpo de prova).

Após a montagem, as cápsulas foram vedadas com fita isolante, colocadas em caixas de isopor e levadas para a câmara úmida onde permaneceram nos últimos 10 dias dos 28 dias de cura dos corpos de prova. Os papéis filtro tiveram massa determinada em balança com precisão de 0,00001g no final da cura e depois de levados à estufa em temperatura de 110 °C, por no mínimo quatro horas. Assim, obteve-se as umidades dos papéis filtro e utilizou-se as equações de Leong *et al.* (2002) para determinação das sucções, Equações 3.7 e 3.8.

$$\text{Para } \omega > 50\%, \text{ Sucção (kPa)} = e^{([128,77-\omega] \div 16,48]} \quad (3.7)$$

$$\text{Para } \omega \leq 50\%, \text{ Sucção (kPa)} = e^{([83,617-\omega] \div 7,017]} \quad (3.8)$$

Onde:

ω = umidade do papel filtro.

Para transformar o valor da sucção em kPa para pF (logaritmo da coluna d'água em centímetros) utilizou-se a Equação 3.9.

$$\text{Sucção (pF)} = \text{Log}_{10} [\text{Sucção (kPa)}.10] \quad (3.9)$$

A partir dos resultados de sucção em pF e o índice de vazios (e), Camapum de Carvalho & Lerouiel (2004) propõem a sucção transformada, que corresponde a multiplicação da sucção

(pF) pelo índice de vazios. E possibilita a estimativa da sucção para índices de vazios diferentes, sem que seja necessário a realização de novas medidas de sucção para novas condições de índice de vazios.

3.2.11 - Tempos de cura

Para Nunez (1991) as reações pozolânicas, que podem prolongar-se por anos, são responsáveis por relevantes alterações no solo, quando adicionada a cal. Enquanto Ayala *et al.* (2018), em estudo sobre a influência do tempo de cura de 1 dia nas misturas solo-cal, constatou que as características químicas, físicas e mineralógicas dos solos, bem como seu comportamento mecânico são afetados pelas trocas catiônicas. Assim, para que se possa avaliar a evolução do efeito da cal no decorrer do tempo, optou-se por tempos de cura de 1, 28 e 90 dias.

Após a realização das misturas solo-cal, tanto as amostras de solo não compactado, utilizadas nos ensaios granulométricos e de pH, como os corpos de prova de 50x100 mm e 50x25 mm foram levados para a câmara úmida, onde permaneceram, isolados das condições atmosféricas, pelos períodos de tempo pré-determinados. Para possibilitar a eventual ocorrência de tixotropia, todos os corpos de prova provenientes dos solos *in natura*, também passaram por período de cura de 28 dias possibilitando a recuperação estrutural gerada pelo processo de compactação devido ao efeito do amolgamento.

3.2.12 - Panorama dos ensaios realizados

Para ilustrar a campanha de ensaios executada, distinguindo os ensaios realizados nos solos *in natura* dos Perfis 1 e 2 e de suas misturas solo-cal, bem como os diferentes teores de cal e tempos de cura a que estas foram submetidas, um resumo da metodologia adotada nesta dissertação é apresentado na Figura 3.7.

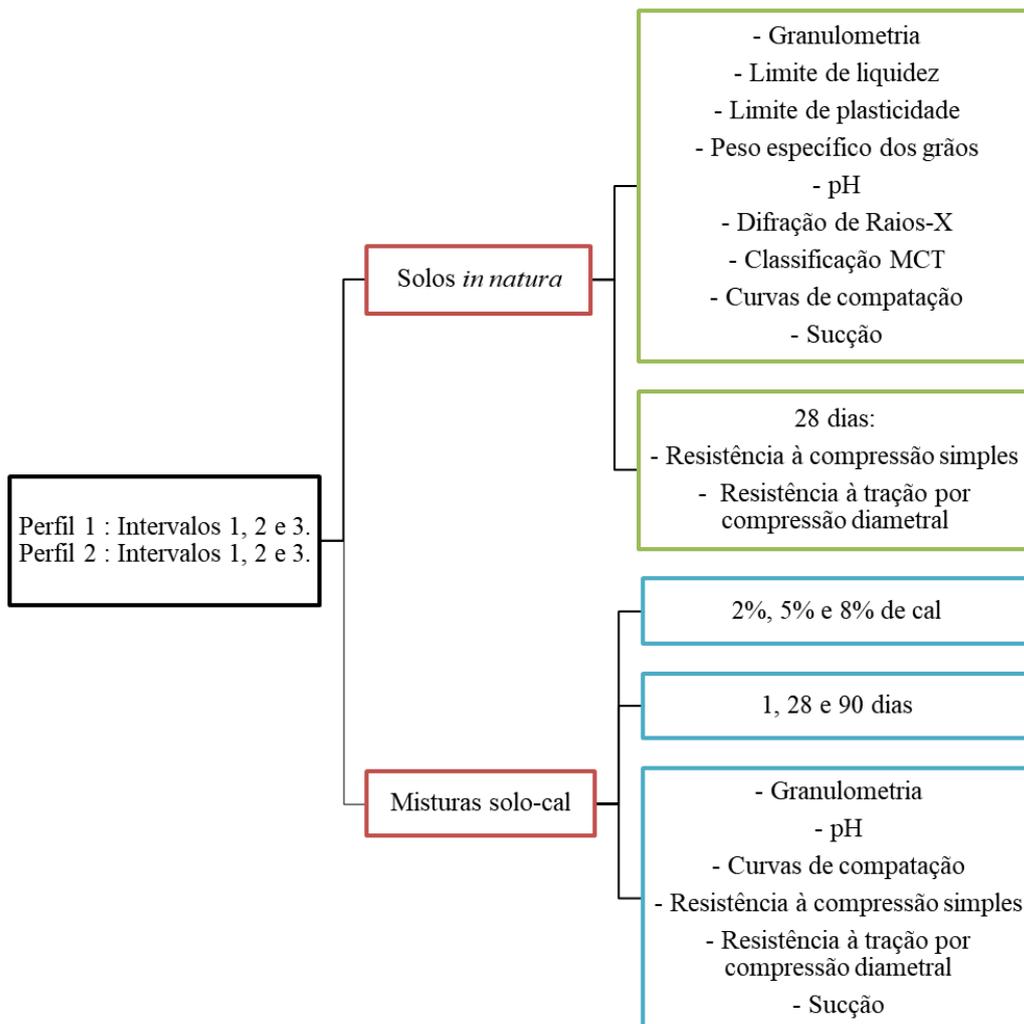


Figura 3.7 - Fluxograma dos ensaios laboratoriais realizados neste trabalho.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - SOLOS *IN NATURA*

As propriedades de caracterização física dos solos *in natura* dos Perfis 1 e 2, como o limite de liquidez (w_L), o limite de plasticidade (w_P), o índice de plasticidade (IP), o peso específico dos grãos (γ_s) e a classificação MCT são apresentadas na Tabela 4.1. Quanto aos limites de Atterberg, houve pequena variação no Perfil 2, onde os valores possuem semelhança com o Intervalo 3 do Perfil 1, sendo os Intervalos 1 e 2 do Perfil 1, similares entre si. Nas demais propriedades os resultados foram próximos, sendo os solos classificados como argilosos de comportamento laterítico (LG’).

Tabela 4.1 - Caracterização dos solos *in natura* dos Intervalos dos Perfis 1 e 2.

Perfis	Intervalos	w_L (%)	w_P (%)	IP (%)	γ_s (g/cm ³)	MCT
Perfil 1	Intervalo 1	44	32	12	2,72	LG’
	Intervalo 2	44	34	10	2,73	LG’
	Intervalo 3	54	42	12	2,75	LG’
Perfil 2	Intervalo 1	53	43	10	2,72	LG’
	Intervalo 2	54	43	11	2,74	LG’
	Intervalo 3	53	42	11	2,77	LG’

Para Cardoso (1995), Farias *et al.* (1999) e Martins (2000), a mineralogia dos solos do Distrito Federal é constituída principalmente por caulinita, ilita, hematita, goethita, gibbsita e anatásio/rutilo, como minerais secundários e o quartzo, como mineral primário, podendo ser também neoforado, conforme descrito por Senaha (2019). A maioria dos minerais citados por estes autores podem ser vistos nas Tabelas 4.2 e 4.3, as quais correspondem aos minerais encontrados nos Perfis 1 e 2, respectivamente.

No Perfil 2, a caulinita, a gibbsita e o quartzo apresentam-se em maior quantidade e distribuem-se ao longo de todo o perfil, com a caulinita e a gibbsita demonstrando comportamento oposto, ou seja, enquanto a caulinita tem o seu teor aumentado com a profundidade, a gibbsita diminui (Figura 4.1).

Uma vez que ocorre o aumento do teor de caulinita com o aumento da profundidade, atingindo valor máximo de 41,8% a 8 m, enquanto a gibbsita apresenta diminuição em seu conteúdo com o avanço da profundidade, atingindo valor mínimo de 1,7% a 8 m, tem-se como

premissa que a gibbsita assim como o quartzo são fruto da intemperização da caulinita. Fazendo-se a soma dos teores de caulinita com gibbsita e caulinita com quartzo ao longo do perfil se obtém valores médios semelhantes, respectivamente 41,5% e 39,9%, o que corrobora com as hipóteses apresentadas para a origem da gibbsita e do quartzo no perfil.

Situação similar foi encontrada por Rodrigues (2017), ao analisar a composição mineralógica de um perfil de 12 m de profundidade localizado no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Distrito Federal. A autora verificou que a gibbsita ocorria em maiores quantidades próximo a superfície, apresenta constância na quantidade entre 2 e 4 m e diminuição em direção a maiores profundidades. Sendo que comportamento contrário foi observado para a caulinita.

De acordo com Cardoso (2002), o responsável por essa inversão de valores em relação a quantidade de caulinita e gibbsita, é o intemperismo da caulinita, que tem como resultado a formação da gibbsita e segundo Senaha (2019) a semelhança entre os perfis obtidos para a gibbsita e para o quartzo indicam ser o quartzo nesses casos neoformado.

A Figura 4.1 mostra ainda, que a soma dos teores de hematita e goethita mantém-se praticamente constante ao longo do Perfil 2, sendo ligeiramente menor na zona mais ativa correspondente aos 4 primeiros metros (10,7%), que nos 4 metros que seguem (12,4%), ocorrendo provavelmente devido a processos de lixiviação. Já no Perfil 1, o quartzo e a caulinita mantem-se presentes em todas as profundidades, mas ocorre o desaparecimento da gibbsita a partir de 5 m de profundidade, Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Minerais presentes no Perfil 1.

Profundidades (m)						
1	2	3	4	5	6	7
Minerais						
Quartzo		Quartzo		Quartzo		
Caulinita		Caulinita		Caulinita		
Saponita		Saponita			-	
Rutilo		Rutilo			Rutilo	
Gibbsita		Gibbsita			-	
Anatásio		Anatásio			Anatásio	
-		Hematita			Hematita	

Tabela 4.3 - Análise semi-quantitativa do Perfil 2. (Senaha, 2019).

Minerais	Profundidades (m)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Intensidade relativa (%)							
Caulinita	18,8	17,7	28,3	24,6	36,6	38,4	33,6	41,8
Gibbsita	18,6	23,1	14,6	19,1	6,7	5,9	2,3	1,7
Quartzo	18,3	9,8	12,3	12,5	7,6	9,3	7,3	2,6
Piroxênio	11,2	10,6	10,8	9,7	13,8	14,6	17,7	17,8
Goethita	6	7,1	6,9	6,3	8,2	8,1	9,2	8,4
Piropo	5,1	5,6	6	5,3	7,8	7	7,7	8,5
Hematita	5	3,6	3,8	4	4,1	3,2	4,4	4,1
Espinélio	4,9	8,4	6,8	7,1	4,6	-	5,2	4,5
Lime	4,5	4,8	4,2	4,3	3,7	4,3	4,1	4
Anatásio	3,6	2,4	2,2	2,2	3,5	3,5	3,4	2,3
Maghemita	2,9	2,7	2,9	3,7	2,1	4,7	4	2,7
Rutilo	1,2	4,2	1,2	1,3	1,3	1,1	1	1,6

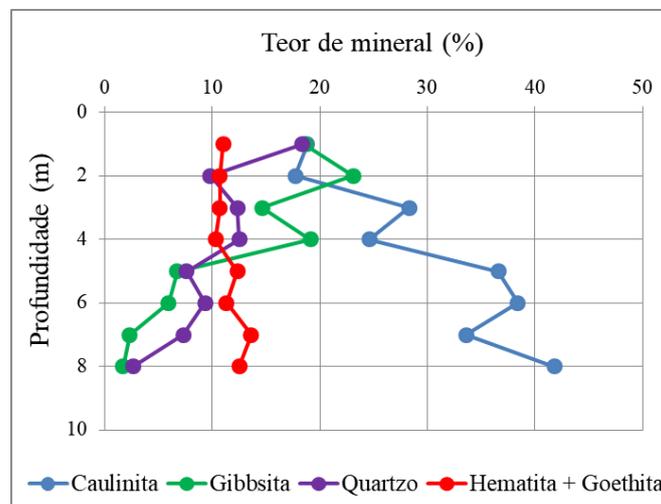


Figura 4.1 – Teores de caulinita, gibbsita, quartzo e goethita mais hematita ao longo do Perfil 2.

4.2 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

4.2.1 - Potencial hidrogeniônico (pH)

No que se refere ao pH dos solos do Distrito Federal, Cardoso (1995) encontrou resultados variando entre 5 e 6. Utilizando-se a classificação de Bigarella *et al.* (1996) e a partir dos resultados do pH em água dos solos *in natura*, determinou-se que no Perfil 1, o solo é considerado ácido no Intervalo 1 e moderadamente ácido nos Intervalos 2 e 3. Já no Perfil 2, o solo é descrito como moderadamente ácido nos Intervalos 1 e 3 e praticamente neutro no Intervalo 2, Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados de pH em água destilada (H₂O), pH em cloreto de potássio (KCl), ponto de carga zero (PCZ) e ΔpH dos solos *in natura*.

Solo <i>in natura</i>		H₂O	KCl	PCZ	ΔpH
Perfil 1	Intervalo 1	5,42	4,91	4,40	-0,51
	Intervalo 2	5,93	4,74	3,55	-1,19
	Intervalo 3	6,05	4,53	3,01	-1,52
Perfil 2	Intervalo 1	5,82	6,33	6,84	0,51
	Intervalo 2	6,91	6,62	6,33	-0,29
	Intervalo 3	6,44	6,34	6,24	-0,1

Para Aguiar (2014) os solos com maior grau de intemperismo possuem pHs mais ácidos. Tal constatação pode ser observada ao longo dos perfis, pois os solos mais superficiais (Intervalo 1 de ambos os perfis) possuem os menores pHs em água destilada. Assim, como indicativo de intemperização mais avançada, no Perfil 1 a gibbsita está presente nos Intervalos 1 e 2 e não no Intervalo 3 (mais profundo), Tabela 4.2. Já no Perfil 2, há diminuição da concentração de gibbsita com o aumento da profundidade (Tabela 4.3) e a soma do teor de hematita mais goethita se mantém praticamente constante ao longo do perfil.

Apesar do Intervalo 3 e do Intervalo 2 do Perfil 2, serem classificados respectivamente, como moderadamente ácido e praticamente neutro, contrariando a princípio Aguiar (2014), ressalta-se que o pH encontrado no Intervalo 3, de 6,44, está no limite dos valores estabelecidos para esta categoria, possuindo dessa maneira grande proximidade com o praticamente neutro que são pHs a partir de 6,5. Assim, atribui-se essa ligeira variação no pH esperado, à porção de

solo analisada do Intervalo 3, devido a variação composicional do solo, já que o mesmo representa valores médios que podem ser encontrados entre 5,68 e 8,24 m de profundidade.

Quanto ao Ponto de Carga Zero (PCZ), verificou-se redução do mesmo com o aumento da profundidade nos Perfis 1 e 2, Tabela 4.4. Assim, sugere-se que a composição mineralógica dos intervalos tenha influência na diminuição no PCZ, pois ao considerar o PCZ de minerais como a caulinita, com PCZ de 3 a 4 e a gibbsita, com PCZ entre 7,5 e 9,5, espera-se maiores valores de PCZ para solos mais abundantes em gibbsita e menores para aqueles com maiores concentrações de caulinita (Parfitt, 1980; Melo, 1998). Cabe ainda destacar que no Perfil 1 os pHs em água são menores que os PCZ afastando-se do equilíbrio de cargas, enquanto no Perfil 2 ocorre a aproximação entre os dois parâmetros sinalizando para o equilíbrio de cargas.

Ao analisar o ΔpH e de acordo com Lima (2003), os intervalos do Perfil 1, apresentaram valores negativos, resultando no predomínio de argilas silicatadas. Enquanto no Perfil 2, houve ΔpH positivo no Intervalo 1, o que corresponde ao predomínio de óxidos de ferro e de alumínio e ΔpH negativos nos Intervalos 2 e 3, porém próximos de zero, embora também sinalize para o predomínio de argilas silicatadas, Tabela 4.4. Essa variação da classificação quanto ao ΔpH no Perfil 2, pode ser atribuída a localização do Intervalo 1 na zona mais ativa e assim possuir maior influência da interação solo-atmosfera em seus resultados.

Segundo Guimarães (1997) ao adicionar cal ao solo, foi verificado aumento do pH para valores de 11 a 12. Os resultados de pH em água e KCl encontrados para os intervalos analisados assemelham-se aos verificados por este autor, sendo superiores ao se utilizar 5% e 8% de cal (Figura 4.2). Para o teor de 2%, os valores de pH em água ficaram inferiores ao preconizado pela norma DNIT 419 (DNIT, 2019), que é pH mínimo de 12,4. Esta norma esclarece, no entanto, que para alguns solos tropicais residuais, devido à presença de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, este limite mínimo pode não ser atingido.

Esse incremento nos valores de pH das misturas solo-cal ao aumentar a porcentagem de cal utilizada, está relacionada a maior disponibilidade dos cátions de cálcio (Ca^{2+}) e/ou magnésio (Mg^{2+}). Pois quanto mais cal presente no solo, maior será a concentração desses íons, resultando em mais substituições do hidrogênio (H^+), o que torna o solo mais alcalino.

Ao considerar o avanço do tempo de cura, nota-se uma tendência de redução do pH tanto em água como em KCl, Figura 4.2. Castro (1981) também observou a diminuição nos valores de pH com o aumento do tempo das análises, passando do pH de 11,3 em 1 hora, para o pH de 7,8 a 120 horas, concluindo que o consumo da cal ocorreu de maneira lenta.

Segundo Camapum de Carvalho & Gitirana JR. (2021), em solos profundamente intemperizados, os aditivos químicos como a cal, não penetram de maneira imediata nos

agregados e microagregados. Logo, com o maior tempo de interação entre o solo e a cal, é possível que tenha ocorrido a migração química da cal para o interior dos agregados, reduzindo dessa maneira, a quantidade de aditivo disponível em solução.

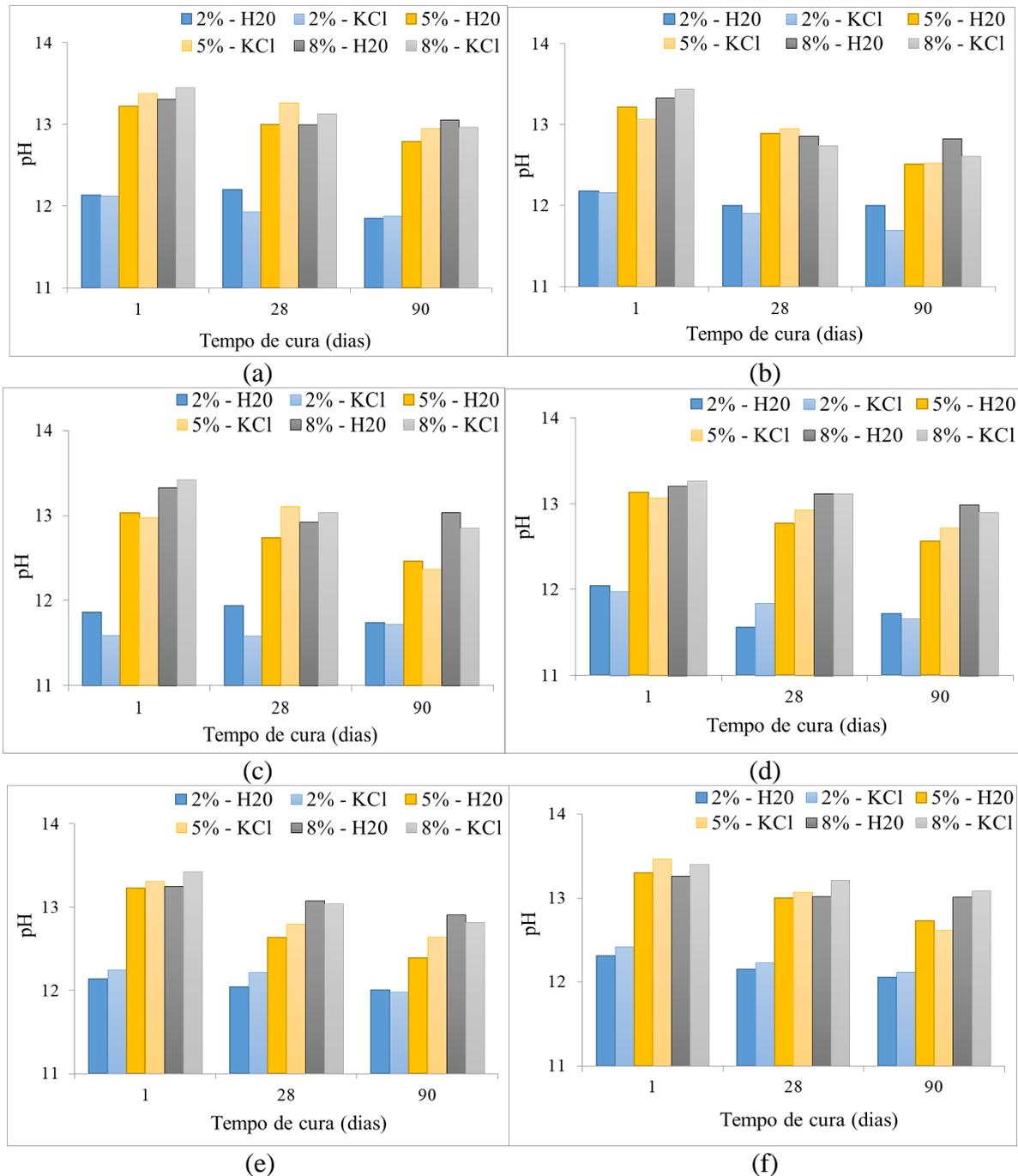


Figura 4.2 - pH em água destilada (H₂O) e cloreto de potássio (KCl) das misturas solo-cal do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3.

No geral, observa-se redução do Δ pH das misturas solo-cal, quando comparado com o Δ pH dos solos *in natura*, ocorrendo até mesmo resultados nulos, Tabelas 4.5 e 4.6. Isso indica

que a cal aproximou os valores de pH em água dos obtidos em KCl, tornando o comportamento do solo mais semelhante perante essas duas soluções.

Tabela 4.5 - Variação de ΔpH com o teor de cal e tempo de cura do Perfil 1.

% de cal	Tempo de cura (dias)	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
		ΔpH	ΔpH	ΔpH
2%	1	0	-0,02	-0,27
	28	-0,27	-0,09	-0,36
	90	0,03	-0,3	-0,02
5%	1	0,16	-0,14	-0,05
	28	0,27	0,06	0,37
	90	0,16	0,02	-0,09
8%	1	0,14	0,11	0,09
	28	0,13	-0,12	0,12
	90	-0,09	-0,22	-0,19

Tabela 4.6 - Variação de ΔpH com o teor de cal e tempo de cura do Perfil 2.

% de cal	Tempo de cura (dias)	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
		ΔpH	ΔpH	ΔpH
2%	1	-0,06	0,11	0,11
	28	0,28	0,18	0,08
	90	-0,06	-0,02	0,06
5%	1	-0,06	0,08	0,17
	28	0,16	0,17	0,07
	90	0,16	0,25	-0,11
8%	1	0,06	0,18	0,14
	28	0	-0,04	0,19
	90	0,09	-0,09	0,08

4.2.2 - Composição química

Objetivando a estabilização química do solo, a composição química do mesmo assume grande relevância e por isso foram determinados os elementos químicos presentes nos solos *in natura* dos Intervalos 2 e 3 do Perfil 1 e dos três Intervalos do Perfil 2, Tabela 4.7.

A troca de cátions (CTC) corresponde a soma dos cátions retidos na superfície coloidal dos solos e possui influência de diferentes fatores, como o conteúdo de matéria orgânica (MO) e o tipo e quantidade de argila que compõe o solo (Besoain *et al.*, 1985; Cardoso, 2002). Na Tabela 4.7, é possível observar que os valores mais elevados de CTC foram encontrados em intervalos com menores concentrações de matéria orgânica, com ligeira diminuição da CTC ao longo do Perfil 1, de 4,7 cmolc-dm^3 no Intervalo 2, para 4,4 cmolc-dm^3 no Intervalo 3. Já no Perfil 2, foi verificado aumento de CTC ao comparar os Intervalos 1 e 3, com valores de 3,8 cmolc-dm^3 e 4,5 cmolc-dm^3 , respectivamente, com ligeira diminuição no Intervalo 2, 3,6 cmolc-dm^3 . Assim, resultados mais elevados de CTC nesse caso, devem-se provavelmente a maior influência da composição mineralógica do perfil, do que à presença de MO.

Portanto, entre os solos estudados, nos que foram identificados maiores CTCs (Intervalo 2 e 3 do Perfil 1 e o Intervalo 3 do Perfil 2), podem apresentar maior sensibilidade, tanto em termos estruturais, quanto de comportamento, diante da incorporação de cal, uma vez que a composição químico-mineralógica do solo influencia a ação deste aditivo e os intervalos citados demonstraram uma possível correlação entre a maior capacidade de troca de cátions e a mineralogia constituinte.

Destacam-se também os resultados de saturação por bases, pois estes representam os cátions básicos (Mg, Na, Ca e K) que estão disponíveis na superfície das partículas para a ocorrência do intercâmbio iônico (Pérez, 2018). No Perfil 2, os valores de saturação por bases ficaram próximos, 29% para os Intervalos 1 e 3 e 33% no Intervalo 2. Já no Perfil 1, houve queda significativa do Intervalo 2 para o Intervalo 3, com valores de 36% e 27%, respectivamente, Tabela 4.7.

Ao comparar os valores de pH obtidos para os solos *in natura* (Tabela 4.4), com os do Laboratório Soloquímica (Tabela 4.7), notou-se diferença nos resultados que pode estar relacionada com as metodologias de ensaio e com os equipamentos utilizados. Desse modo, a partir do pH em água, é possível classificar os solos do Intervalo 3 (Perfil 1) e Intervalos 1 e 2 (Perfil 2), como moderadamente ácidos e do Intervalo 2 (Perfil 1) e Intervalo 3 (Perfil 2), como praticamente neutros. Em relação ao ΔpH , todos os intervalos analisados foram considerados

com predomínio de argilas silicatadas e o PCZ apresentou redução, em relação aos resultados determinados anteriormente.

Tabela 4.7. Composição química do Perfil 1 (Intervalos 2 e 3) e do Perfil 2.

Composição química	Unidades	Perfil 1		Perfil 2		
		Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
Fósforo (P)	mg/dm ³	4,5	6,9	1,9	0,9	6,9
Cálcio (Ca)	cmolc-dm ³	1,5	1	0,9	1	1,1
Magnésio (Mg)	cmolc-dm ³	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Potássio (K)	cmolc-dm ³	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
Sódio (Na)	cmolc-dm ³	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05
Alumínio (Al)	cmolc-dm ³	0	0	0	0	0
Acidez (H+ Al)	cmolc-dm ³	3	3,2	2,7	2,4	3,2
Soma das bases	cmolc-dm ³	1,7	1,2	1,1	1,2	1,3
Capacidade de troca de cátions (CTC)	cmolc-dm ³	4,7	4,4	3,8	3,6	4,5
Saturação por bases	%	36	27	29	33	29
Saturação por Al	%	0	0	0	0	0
Saturação com Na	%	3	4	5	3	4
Carbono orgânico	g/kg	1	1	5,7	2,2	1
Matéria orgânica (MO)	g/kg	1,7	1,7	9,8	3,8	1,7
pH em H₂O	-	6,6	6,2	6	6,4	6,5
pH em KCl	-	4,20	4,10	5,50	6	4,20
ΔpH	-	-2,4	-2,1	-0,5	-0,4	-2,3
PCZ	-	1,80	2	5	5,60	1,90

4.3 - GRANULOMETRIA

Segundo Delgado (2007), o uso do defloculante promove a desagregação dos torrões e das agregações com baixa estabilidade frente ao agente químico. Nos solos dos intervalos estudados, a ação do defloculante pode ser vista nas Figuras 4.3 a 4.6, onde houve desagregação

e consequente migração das curvas granulométricas dos solos *in natura* com defloculante, em direção a maiores porcentagens de finos, em relação as curvas granulométricas com uso apenas de água destilada, condição em que as agregações apresentaram maior estabilidade.

Considerando a distribuição granulométrica dos solos *in natura* e das misturas solo-cal, no geral, a atuação da cal promoveu aumento das agregações em todos os intervalos analisados, como mostra a Figura 4.3 reunindo todos os resultados. Entretanto, ao realizar comparações entre as curvas granulométricas das misturas solo-cal, foi possível notar variedade no comportamento textural do solo com a incorporação de diferentes porcentagens de cal, em tempos de cura distintos, como será detalhado a seguir nas figuras relativas a cada teor de cal.

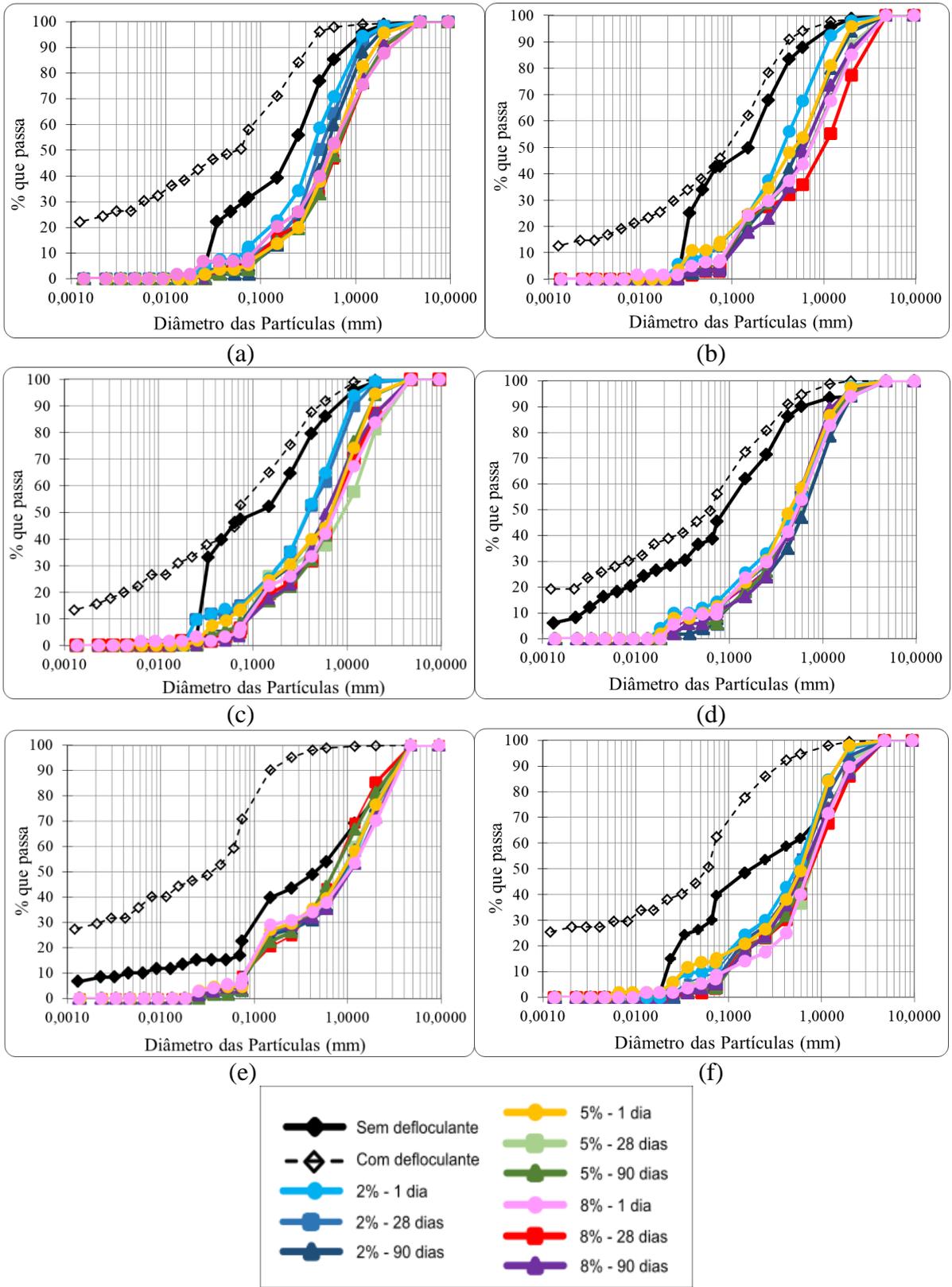


Figura 4.3 - Curvas granulométricas do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3. g) Legenda das curvas granulométricas dos solos *in natura* com e sem defloculante e das misturas solo-cal.

Para melhor visualização os resultados serão agora tratados por teor de cal adotado sendo apresentados respectivamente nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 os resultados obtidos quando do uso de 2%, 5% e 8% de cal.

No Perfil 1, a adição de 2% de cal levou a ampliação das agregações em decorrência do maior tempo de interação solo-cal, com aumentos ligeiramente progressivos no Intervalo 1, enquanto nos Intervalos 2 e 3, houve semelhança nas curvas granulométricas de 1 dia e 28 dias e aumento dos agregados aos 90 dias, Figuras 4.4a, b, c.

Enquanto no Perfil 2, a incorporação de 2% de cal proporcionou mais agregações ao longo do tempo no Intervalo 1 e resultados semelhantes no Intervalo 2, Figuras 4.4d, e. No Intervalo 3, destaca-se a desagregação provocada pela ação da cal, pois as misturas solo-cal apresentaram menores agregações de até 1 mm do que o solo *in natura* e as curvas granulométricas de 1, 28 e 90 dias apresentaram agregações/desagregações semelhantes, ou seja, mesmo com o maior tempo de interação entre o solo e a cal, não houve aumento significativo da flocculação, Figura 4.4f.

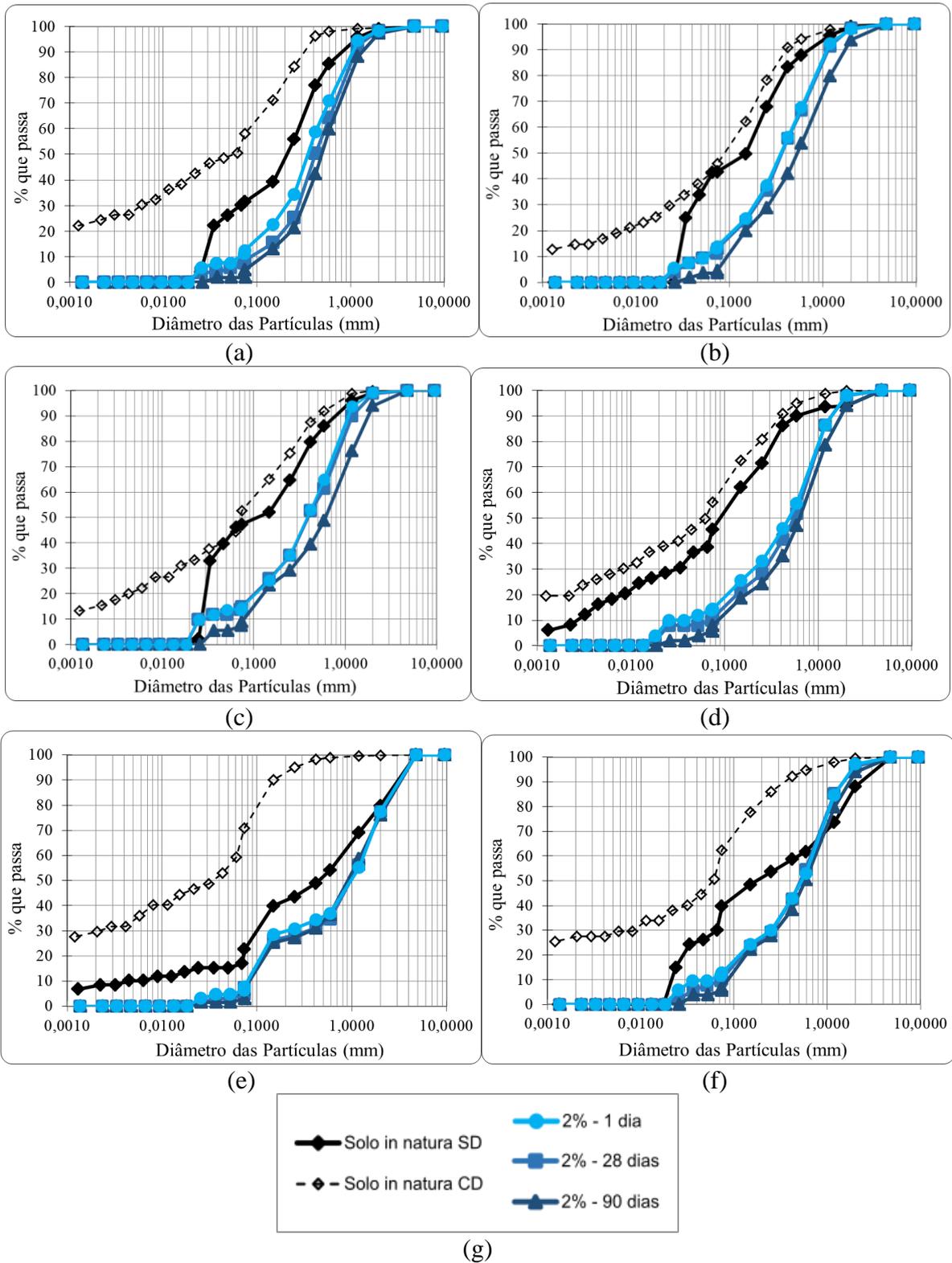


Figura 4.4 - Curvas granulométricas dos solos *in natura* com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) e com adição de 2% de cal no Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3; g) Legenda das curvas granulométricas.

Já o incremento de 5% de cal provocou agregações de maneira contínua nos Intervalos 1 e 2 do Perfil 1, sendo a influência do tempo de cura mais expressiva no Intervalo 2, pois a curva granulométrica de 90 dias se desloca em relação a de 1 dia em direção a frações do solo com maiores diâmetros, Figuras 4.5a, b. No Intervalo 3, destaca-se a desagregação com o maior tempo de cura avaliado (90 dias), que pode ter ocorrido devido a migração da cal para dentro dos agregados, resultando na instabilização dos mesmos, Figura 4.5c. No Perfil 2, as curvas granulométricas possuem comportamento semelhante no Intervalo 1, ligeira desagregação aos 90 dias no Intervalo 2 e 1 dia no Intervalo 3, Figuras 4.5d, e, f.

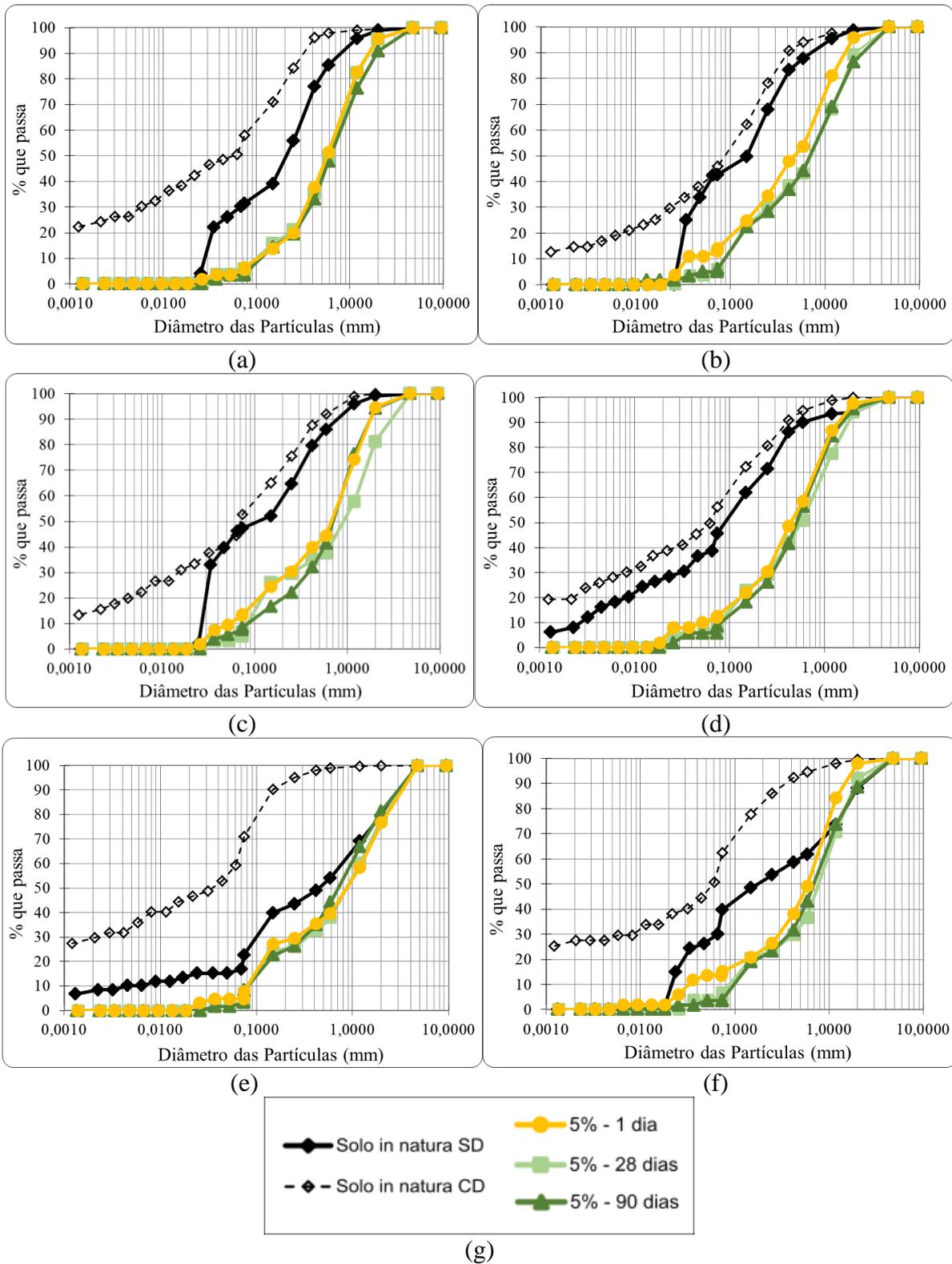


Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos solos *in natura* com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) e com adição de 5% de cal no Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3; g) Legenda das curvas granulométricas.

A progressão do tempo de cura para as misturas de solo com 8% de cal, não apresentou mudanças significativas nos Intervalos 1 e 3 do Perfil 1 e Intervalo 1 do Perfil 2, pois as curvas granulométricas desses intervalos são semelhantes nos três períodos estudados, Figuras 4.6a, c, d. Sendo identificada desagregação nos demais intervalos, aos 90 dias no Intervalo 2 do Perfil 1, aos 28 dias no Intervalo 2 e de maneira mais acentuada aos 90 dias no Intervalo 3, ambos intervalos do Perfil 2, Figuras 4.6b, e, f.

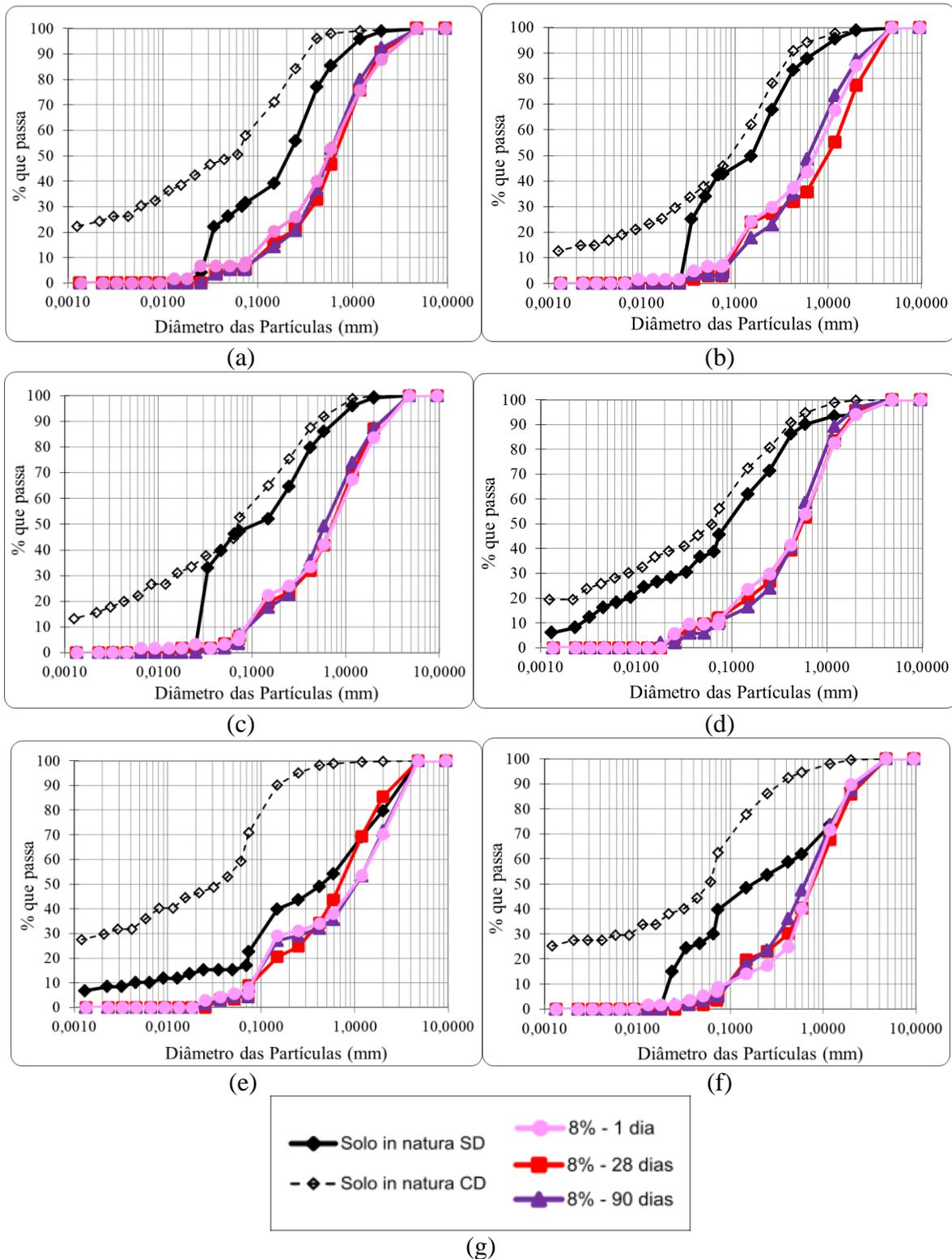


Figura 4.6 - Curvas granulométricas dos solos *in natura* com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) e com adição de 8% de cal no Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3; g) Legenda das curvas granulométricas.

Apesar da desagregação verificada em algumas porções das curvas granulométricas, ao se avaliar a influência da adição de cal aos solos no conjunto, pode-se considerar que a cal promoveu a floculação/agregação do solo e que as variações granulométricas com o tempo de cura, se situam provavelmente na faixa de repetibilidade do ensaio.

4.4 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR

A remoção e o transporte dos solos tropicais das áreas de empréstimo para os locais de compactação acarretam na destruição da macroestrutura do solo, entretanto, a microestrutura geralmente é preservada. Já ao considerar a estabilização dos solos por meios químicos, pode ou não ocorrer a destruição da microestrutura do solo, a depender do solo e do teor e especificidades do aditivo químico utilizado (Aguiar, 2014).

Antes de adentrar nas discussões sobre os resultados de compactação obtidos, cabe lembrar que a condição umidade ótima (w_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) correspondem na curva de compactação ao ponto de oclusão da fase ar. Logo, esse é um ponto que guarda relação direta com a textura e a distribuição de poros no solo. Assim, textura e distribuição de poros também se relacionam com a sucção mátrica atuante no solo, a qual contribuirá para a definição da inclinação do ramo seco da curva de compactação.

Não menos importante, é esta textura e distribuição dos poros para a definição da declividade do ramo úmido da curva de compactação, pois elas serão responsáveis diretas pela geração de pressão neutra positiva quando da compactação, contribuindo desse modo, para a redução da energia efetiva de compactação.

A Figura 4.7 apresenta as curvas de compactação obtidas para os solos *in natura* e para as misturas solo-cal, 15 minutos após a adição de cal. Consta nesta figura as curvas de saturação total ($S_r = 100\%$) obtidas considerando-se o peso específicos dos grãos dos solos *in natura*. Nesta Figura 4.7, observa-se para o Perfil 1 (a, b, c) que a cal gerou um aumento na umidade ótima com redução no peso específico aparente seco máximo, o que aponta para a agregação do solo (Guimarães *et al.*, 1997). Tal comportamento só se repetiu para o Perfil 2 no Intervalo 1, sendo que nos demais observou-se apenas pequena redução na umidade ótima com pouca interferência no peso específico aparente seco.

Quanto ao formato das curvas de compactação, no geral, a adição de cal tendeu a provocar o achatamento das mesmas, em comparação com as curvas de compactação dos solos *in natura*. Em princípio, esse resultado é benéfico para as compactações de campo, pois indica

menor sensibilidade do comportamento mecânico frente as variações da umidade, já que permite considerar faixas de umidade mais amplas.

No entanto, faz-se necessário considerar os fatores impactantes na inclinação do ramo seco da curva de compactação, uma vez que eles poderão ser úteis nas análises do comportamento mecânico. A suavização pode estar ocorrendo em consequência de menores variações na sucção, menos quebra nas agregações e menor efeito lubrificador da água que podem atuar conjuntamente ou de modo isolado.

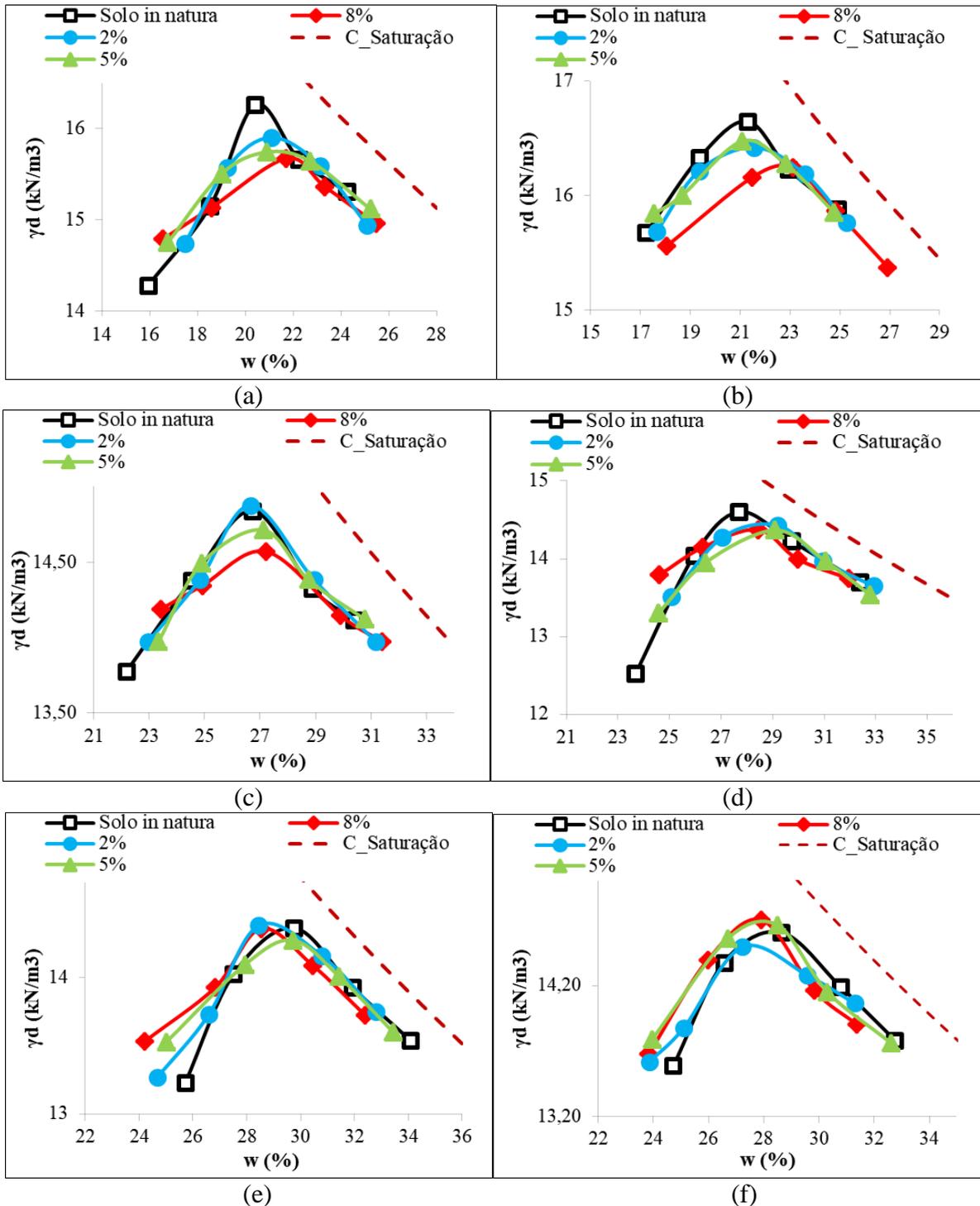


Figura 4.7 - Curvas de compactação do solo *in natura* e das misturas solo-cal do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3; e do Perfil 2: d) Intervalo 1; e) Intervalo 2; f) Intervalo 3.

Na Figura 4.8, constata-se que os Intervalos 1 e 2 do Perfil 1 possuem comportamento semelhante quanto aos parâmetros de compactação (umidade ótima e peso específico aparente seco máximo). Esses dois intervalos apresentaram os menores índices de vazios quando compactados, consequentemente menor quantidade de água é necessária para preenchê-los.

Foram eles que demonstraram menor umidade ótima e maior peso específico aparente seco máximo, Tabelas 4.8 e 4.9. Situação contrária é verificada no Intervalo 3 do Perfil 1 e em todos os intervalos do Perfil 2, já que possuem índices de vazios mais elevados e similares entre si, assim mais água é requerida para que ocorra seu preenchimento. Tais resultados são compatíveis com a maior umidade ótima e menor peso específico aparente seco máximo registrados, Figura 4.8, Tabelas 4.8 e 4.9.

Em relação a efetividade dos teores de cal adicionados aos solos, os intervalos do Perfil 1 exibiram aumentos gradativos da umidade ótima com o aumento do teor de cal, havendo leve diminuição para 5% de cal, para os Intervalos 1 e 2 e em 2% para o Intervalo 3, Figura. 4.8a. No Intervalo 1 do Perfil 2, a umidade ótima aumentou com a adição de 2% e 5% de cal, mas ocorreu redução para a mistura solo-cal 8%, entretanto, todos os valores permaneceram maiores que os dos solos *in natura*. Nos Intervalos 2 e 3, não houve aumento na umidade ótima, pois no Intervalo 2, o solo *in natura* e a mistura solo-cal 5%, apresentaram valores similares e 2% e 8% de cal promoveram a redução da umidade ótima, para resultados menores que o solo *in natura*. E no Intervalo 3, todas as umidades ótimas ficaram abaixo da encontrada para o solo *in natura*, sendo a da mistura solo-cal 5%, a que mais se aproxima da condição *in natura*, Figura 4.8a.

Na Figura 4.8b observa-se que o peso específico aparente seco máximo apresentou diminuição nos intervalos do Perfil 1, com ligeiros aumentos ao adicionar 5% de cal no Intervalo 2 e 2% de cal no Intervalo 3. No Perfil 2, as misturas solo-cal do Intervalo 1, possuem peso específico aparente seco máximo menor que o do solo *in natura*, com valores próximos para 5% e 8% de cal. Enquanto no Intervalo 2, 2% de cal provocou aumento no peso específico aparente seco máximo, 5% levou a redução do mesmo e 8% resultou em valor similar com o solo *in natura*. No intervalo 3, as misturas solo-cal com 2% de cal, acarretaram na diminuição do peso específico aparente seco máximo e 5% e 8% causaram aumentos desse parâmetro.

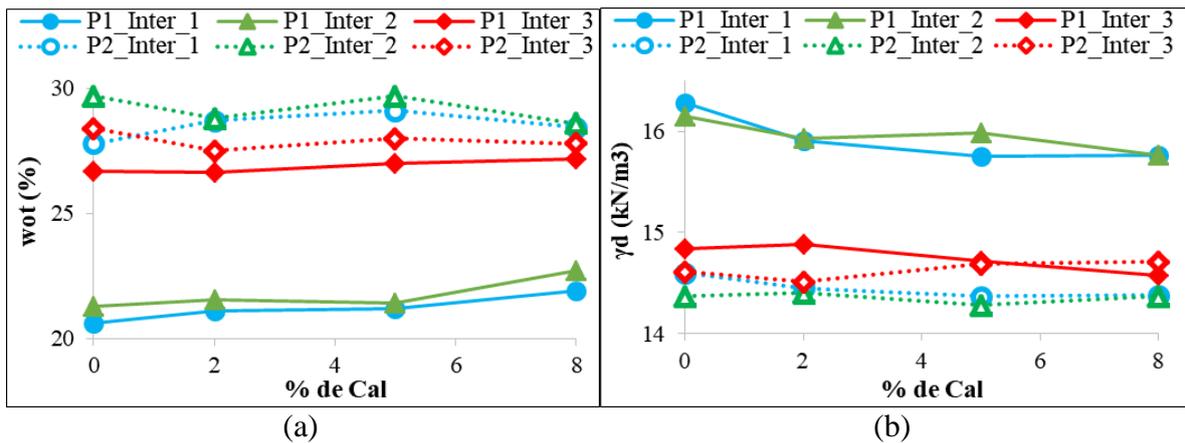


Figura 4.8 - a) Valores de umidade ótima (w_{ot}) dos Perfis 1 e 2. b) Valores de peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) dos Perfis 1 e 2.

Embora na prática da engenharia geralmente se trabalhe considerando apenas a umidade e o peso específico aparente seco, efetivamente o comportamento é função da umidade e do índice de vazios, que em conjunto resultam no grau de saturação. Para definição tanto do índice de vazios como do grau de saturação, não raro se utiliza o peso específico dos grãos obtido para o solo *in natura* também para a determinação destes parâmetros para as misturas solo-cal. Nas Tabelas 4.8 e 4.9, considerou-se o peso específico dos solos *in natura* e os valores corrigidos para as misturas solo-cal fazendo-se uso dos resultados obtidos por Aguiar (2014). A Figura 4.9a mostra, ao se comparar os resultados de índice de vazios considerando-se a influência da cal com os obtidos com base no peso específico dos grãos dos solos *in natura*, que a incorporação da cal proporciona uma redução na porosidade do solo, impactando no grau de saturação (Figura 4.9b).

Tabela 4.8 - Resultados de umidade ótima (w_{ot}), peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), índice de vazios ótimo (e_{ot}) e grau de saturação (S_r) do Perfil 1.

		w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	e_{ot}	e_{ot} corrigido	S_r (%)	S_r (%) corrigido
Intervalo 1	Solo <i>in natura</i>	20,6	16,28	0,64	0,64	87,75	87,75
	Solo-cal 2%	21,10	15,91	0,68	0,67	84,82	85,06
	Solo-cal 5%	21,20	15,75	0,69	0,68	83,13	84,12
	Solo-cal 8%	21,90	15,68	0,70	0,68	84,95	86,57
Intervalo 2	Solo <i>in natura</i>	21,30	16,15	0,66	0,66	88,08	88,4
	Solo-cal 2%	21,57	15,93	0,68	0,68	86,19	86,75
	Solo-cal 5%	21,40	15,98	0,68	0,66	86,18	87,55
	Solo-cal 8%	22,70	15,77	0,70	0,68	89,49	90,51
Intervalo 3	Solo <i>in natura</i>	26,70	14,84	0,82	0,82	89,83	89,83
	Solo-cal 2%	26,66	14,88	0,81	0,81	90,24	90,45
	Solo-cal 5%	27	14,72	0,83	0,82	89,23	90,10
	Solo-cal 8%	27,2	14,57	0,85	0,83	87,90	89,26

Tabela 4.9 - Resultados de umidade ótima (w_{ot}), peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), índice de vazios ótimo (e_{ot}) e grau de saturação (S_r) do Perfil 2.

		w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	e_{ot}	e_{ot} corrigido	S_r (%)	S_r (%) corrigido
Intervalo 1	Solo <i>in natura</i>	27,80	14,60	0,83	0,83	91,43	91,43
	Solo-cal 2%	28,70	14,45	0,85	0,84	92,27	92,48
	Solo-cal 5%	29,10	14,37	0,86	0,84	92,43	93,32
	Solo-cal 8%	28,43	14,38	0,86	0,83	90,44	91,85
Intervalo 2	Solo <i>in natura</i>	29,70	14,37	0,87	0,87	93,54	93,54
	Solo-cal 2%	28,80	14,40	0,87	0,86	91,12	91,32
	Solo-cal 5%	29,70	14,28	0,88	0,87	92,29	93,15
	Solo-cal 8%	28,60	14,37	0,87	0,85	90,08	91,45
Intervalo 3	Solo <i>in natura</i>	28,40	14,61	0,86	0,86	91,54	91,54
	Solo-cal 2%	27,50	14,51	0,87	0,87	87,34	87,53
	Solo-cal 5%	28	14,69	0,85	0,83	91,33	92,2
	Solo-cal 8%	27,80	14,71	0,85	0,82	90,95	92,35

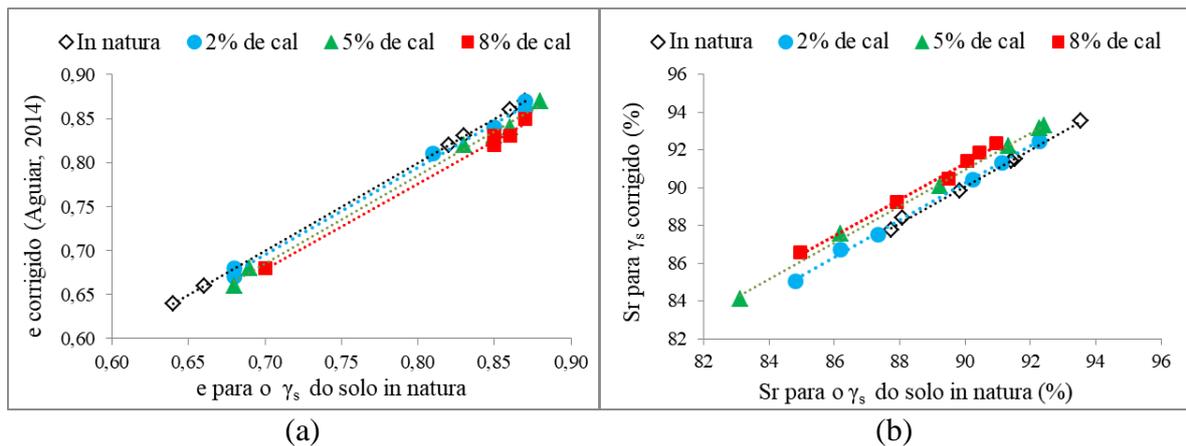


Figura 4.9 - a) Índice de vazios (e) corrigido *versus* índice de vazios (e) obtido com o peso específico (γ_s) dos solos *in natura*; b) Grau de saturação (S_r) obtido com o peso específico dos grãos (γ_s) corrigido *versus* Grau de saturação (S_r) obtido com o peso específico (γ_s) dos solos *in natura*.

4.5 - SUCCÕES ATUANTES NO SOLO

A sucção mátrica e a sucção osmótica atuam nos solos influenciando o seu comportamento mecânico. No entanto, como as principais alterações na sucção osmótica estão ligadas a alterações na química do meio, geralmente ela não é considerada nos projetos geotécnicos e, por consequência, ela é também pouco estudada e analisada. Contudo, a sucção osmótica assume grande relevância nas obras geotécnicas, em situações onde ocorrem alterações na química do meio, como é o caso das estabilizações químicas dos solos.

Embora existam ensaios específicos para a finalidade, a sucção osmótica é, com frequência, como no presente estudo, obtida por meio da diferença entre a sucção total e a sucção mátrica, estas determinadas experimentalmente. A determinação da sucção total e da sucção mátrica, ocorreu diretamente a partir dos corpos de prova com tempo de cura de 28 dias, preparados para serem submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTDC).

A Figura 4.10 apresenta os resultados encontrados para as sucções mátricas (a) e para as sucções osmóticas (b, c, d). Nela, diferenciou-se os intervalos dos Perfis 1 e 2 pelos tamanhos dos símbolos, onde os menores correspondem ao Intervalos 1, os intermediários aos Intervalos 2 e os maiores aos Intervalos 3. Na Figura 4.10a, observa-se que as sucções mátricas mais elevadas atuam nos Intervalos 1 e 2 do Perfil 1. Enquanto o Intervalo 3, apresentou resultados similares aos obtidos para os intervalos do Perfil 2, sendo que neste perfil, os valores não apresentaram grandes variações. As esferas vermelhas vazias representam os solos *in natura*,

sendo possível observar por suas posições geralmente abaixo dos demais símbolos que representam as misturas solo-cal, que a cal ampliou a sucção mátrica atuante no solo.

Em relação aos resultados obtidos para as sucções osmóticas presentes no solo (Figuras 4.10b, 4.10c e 4.10d), houve grande variabilidade, indicando, ao variar a profundidade, o teor de cal e o perfil analisado, a sua dependência da composição químico-mineralógica do solo. Tal variabilidade não foi observada na sucção mátrica (Figura 4.10a), já que a mesma é mais dependente das dimensões dos poros, embora, como mostrado, sofreu influência da cal.

Na Figura 4.10b, guardando semelhança com o observado para a sucção mátrica, os Intervalos 1 e 2 do Perfil 1, apresentam sucções osmóticas distintas do Intervalo 3 e dos três intervalos do Perfil 2. A partir da Figura 4.10c, onde colocou-se em evidência os solos *in natura* e as misturas solo-cal com de 8% deste aditivo e da Figura 4.10d, na qual destacou-se as misturas com 2%, 5% e 8% de cal, mas sem distinção entre os intervalos e perfis analisados, não foi possível observar influência direta da cal na sucção osmótica.

Assim, entende-se, que por enquanto não é possível afirmar que a cal não afeta a sucção osmótica dos solos tropicais. Sendo recomendável a realização de estudos envolvendo outras técnicas de ensaio cabendo, no entanto, destacar que nos estudos realizados por Pérez (2022), o calcário foi um dos compostos químicos em que a sucção osmótica mais se aproximou da sucção atuante no solo *in natura* ao longo da curva característica de retenção de água.

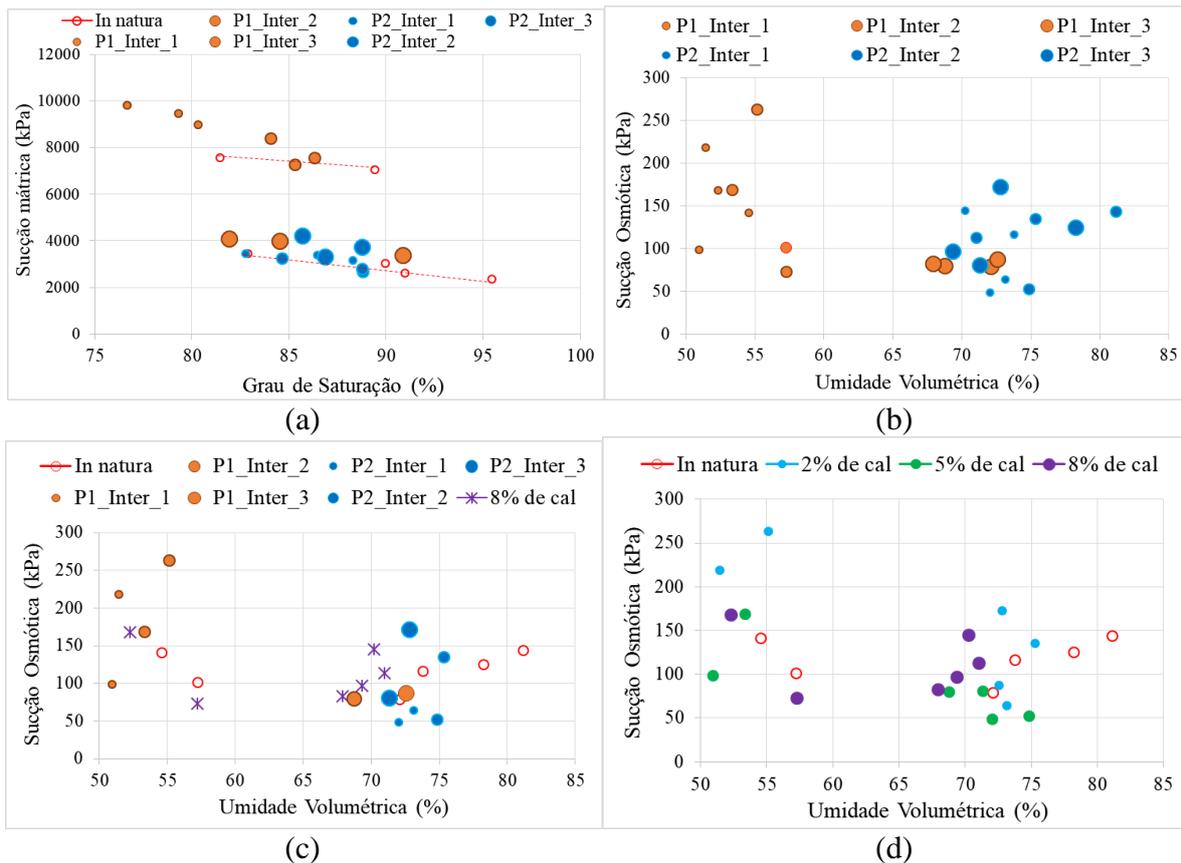


Figura 4.10 - a) Sucções mátricas em função do grau de saturação; b; c; d) Sucções osmóticas em função da umidade volumétrica.

Diante dos resultados apresentados envolvendo o conjunto de variáveis presentes nos solos com adição de cal, torna-se difícil a previsão das sucções mátrica e osmótica para condições distintas daquelas dos ensaios realizados. No entanto, considerando-se a proposta apresentada por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004) foi possível estabelecer linhas de tendência que viabilizam estimar a sucção mátrica para condições diferentes das analisadas (Figura 4.11). Verifica-se nesta figura que exceto um ponto do Intervalo 2 do Perfil 1, os Intervalos 1 e 2 deste perfil seguiram uma determinada tendência. Já os pontos do Intervalo 3 do Perfil 1 e o conjunto dos pontos do Perfil 2, excetuando-se os solos *in natura* dos Intervalos 2 e 3, enquadraram-se em outra tendência. Esses resultados mostram que apesar do nível de intemperização interferir na sucção e no índice de vazios do solo, é possível por meio desse recurso estimar a sucção atuante no solo para condições distintas das de ensaio.

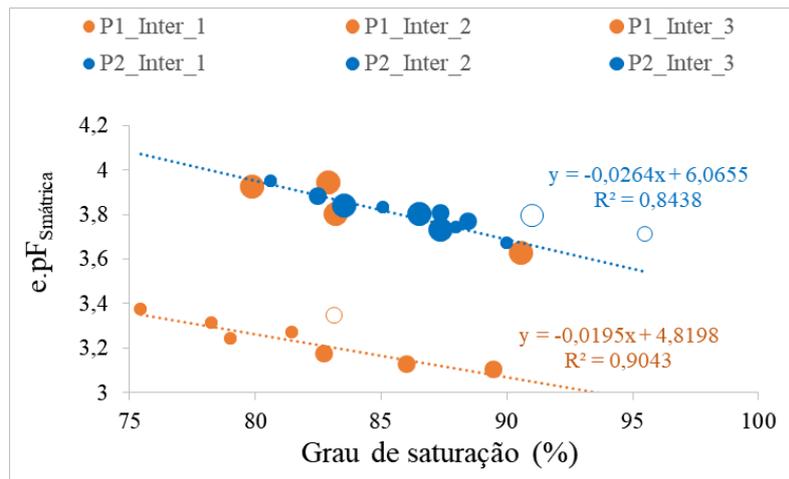


Figura 4.11 - Valores de sucção mátrica em pF e índice de vazios (e) em função do grau de saturação.

Quanto à sucção osmótica, como ela depende da camada de hidratação das partículas, o razoável é que se busque tendências que universalizem o comportamento dentro de determinados limites como uma função da umidade, mas esse é um tema que carece de mais estudos, inclusive envolvendo técnicas de ensaio que permitam a sua determinação direta de modo a se comparar os resultados com aqueles estimados como no presente caso.

No entanto, analisando-se o conjunto de resultados, apesar da significativa dispersão, foi possível chegar à Figura 4.12 em que o pF da sucção osmótica normalizado pela umidade volumétrica é apresentado como uma função do grau de saturação. Na correlação observada na figura, não foram incluídos os pontos obtidos para o Intervalo 2 do Perfil 1. A figura mostra variação significativa no Perfil 1 e pouca variação no Perfil 2. Contudo, atendendo-se para o ponto com maior grau de saturação do Perfil 1 em relação aos demais, supõem-se que a variação da sucção osmótica apresenta um limite imposto pela umidade, ou seja, pelo nível de hidratação das partículas de solo, mas este é também um dos pontos que merecem estudos complementares.

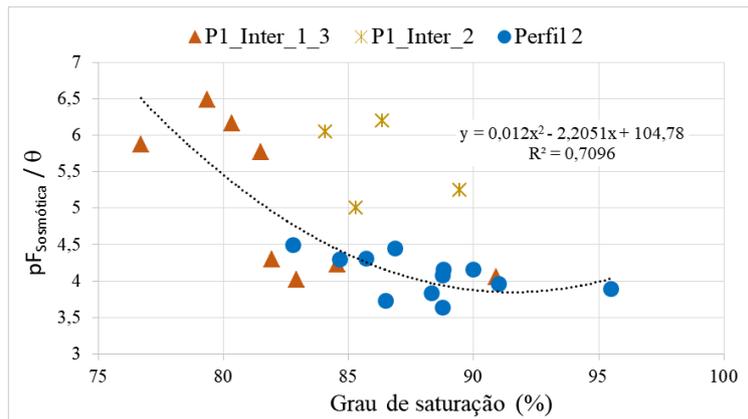


Figura 4.12 - Valores de sucção osmótica em pF normalizado pela umidade volumétrica (θ) em função do grau de saturação.

Faz-se necessário entender que embora tenha se tornado possível estimar as sucções mátrica e osmótica presentes nos solos *in natura* e nos solos com adição de cal dos perfis estudados, a avaliação do comportamento mecânico não pode prescindir de se considerar as características do solo, o tempo de cura e o teor de cal utilizado, uma vez que ele não depende tão somente da sucção, da porosidade e do teor de umidade.

4.6 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Para Castro (1981), é comum que alterações na granulometria, na composição química e na quantidade de aditivo adicionado ao solo, reflitam nas propriedades gerais do mesmo, provocando modificações que podem ser substanciais. No presente estudo buscou-se avaliar o impacto no comportamento mecânico do solo e de seu nível de intemperização, do teor de cal e do tempo de cura em laboratório.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de umidade para o Perfil 1, são apresentados na Figura 4.13. É possível identificar neste perfil que os maiores valores de RTCD foram encontrados nos Intervalos 1 e 2. Contudo, considerando-se o impacto da redução do teor de umidade e do progresso do tempo de cura na RTCD, ambos gerando o seu aumento, não ficou claro nesta figura a influência do teor de cal na resistência, apenas percebendo-se que eles são superiores aos resultados obtidos para os solos *in natura*.

As tendências apresentadas realçam, como esperado, que a resistência aumenta com a diminuição do teor de umidade, mas existe ainda um outro fator que geralmente também intervém na resistência do solo, seja ele estabilizado ou não, é o índice de vazios. Em se tratando

de solos não saturados, não menos relevante para o comportamento mecânico do solo é a sucção nele atuante.

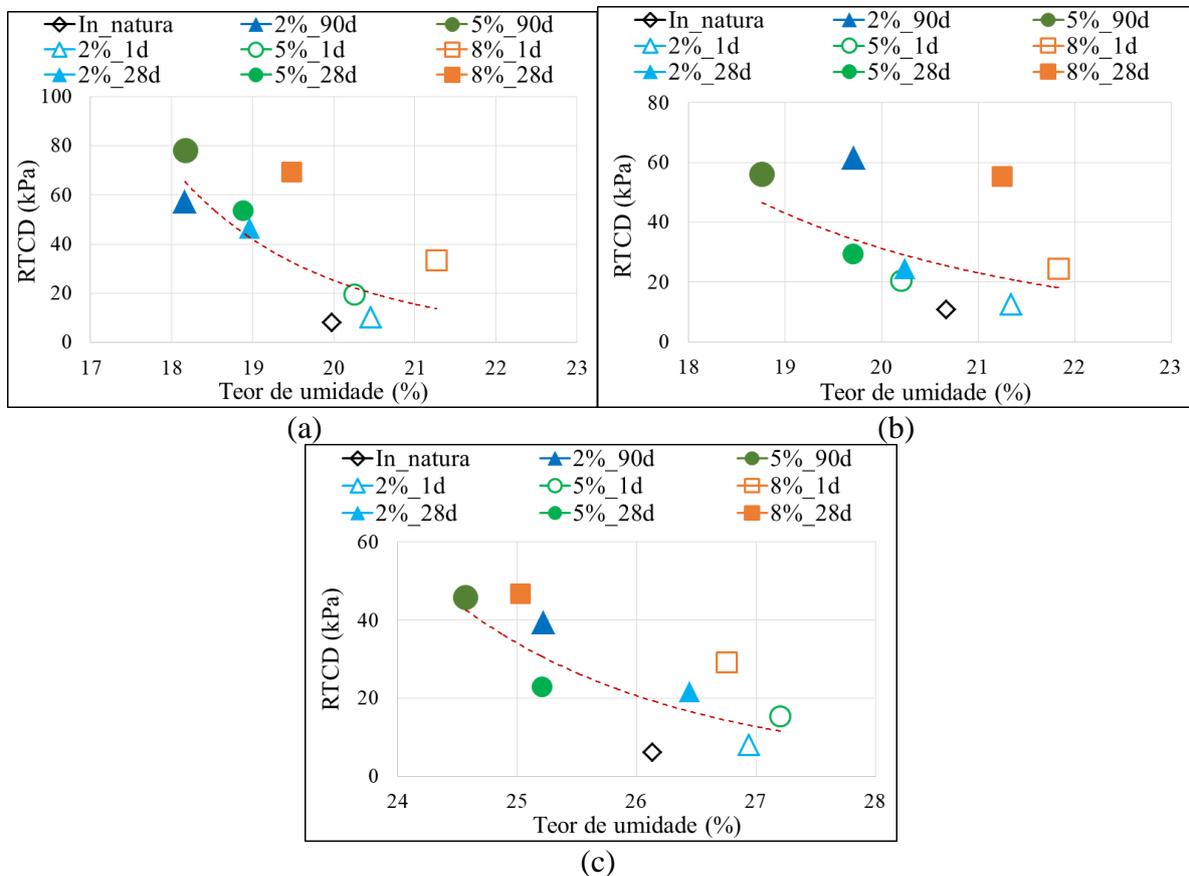


Figura 4.13 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de umidade do Perfil 1: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3.

Diante do exposto, buscando-se o melhor entendimento dos resultados obtidos, optou-se por analisar na Figura 4.14 os valores de RTCD do Perfil 1 em função do índice de vazios (a), do teor de umidade (b), do grau de saturação (c) e da sucção mátrica (d). Nestas figuras adotou-se o símbolo crescente com o tempo de cura, ou seja, um dia corresponde ao menor símbolo e 90 dias ao maior. Ao analisar o Perfil 1, não fica clara por exemplo a influência do índice vazios na RTCD. Sua influência sobressai, no entanto, ao considerar a RTCD em função do grau de saturação, quando a distribuição dos pontos ao longo de uma tendência visualmente se torna melhor que a obtida apenas em função do teor de umidade. Na Figura 4.14d, observa-se a tendência de aumento da RTCD com o aumento da sucção mátrica.

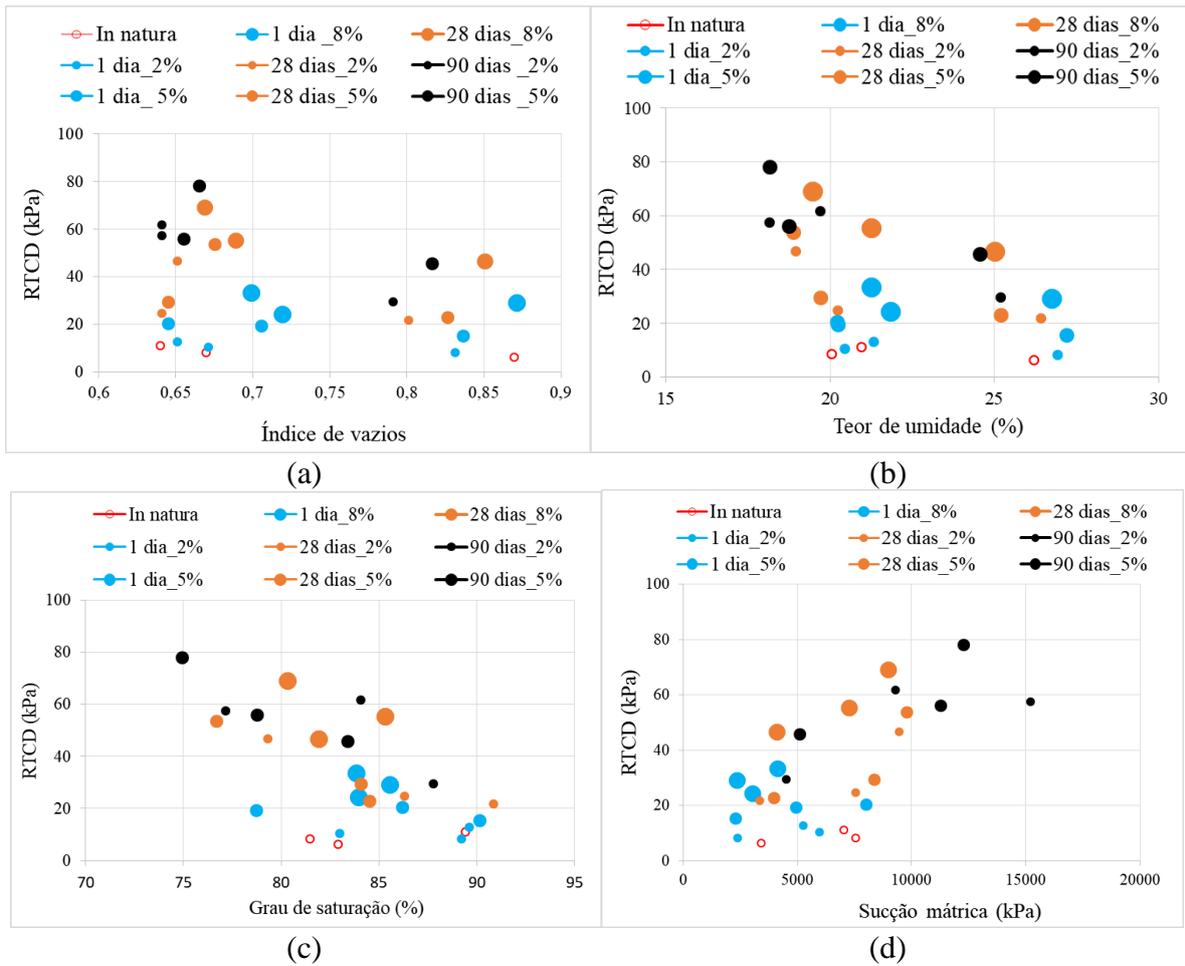


Figura 4.14 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) do Perfil 1 em função do: a) Índice de vazios; b) Teor de umidade; c) Grau de saturação; d) Sucção mátrica.

No Perfil 2, observa-se na Figura 4.15 um comportamento similar ao do Perfil 1 quanto à variação da RTCD com o teor umidade.

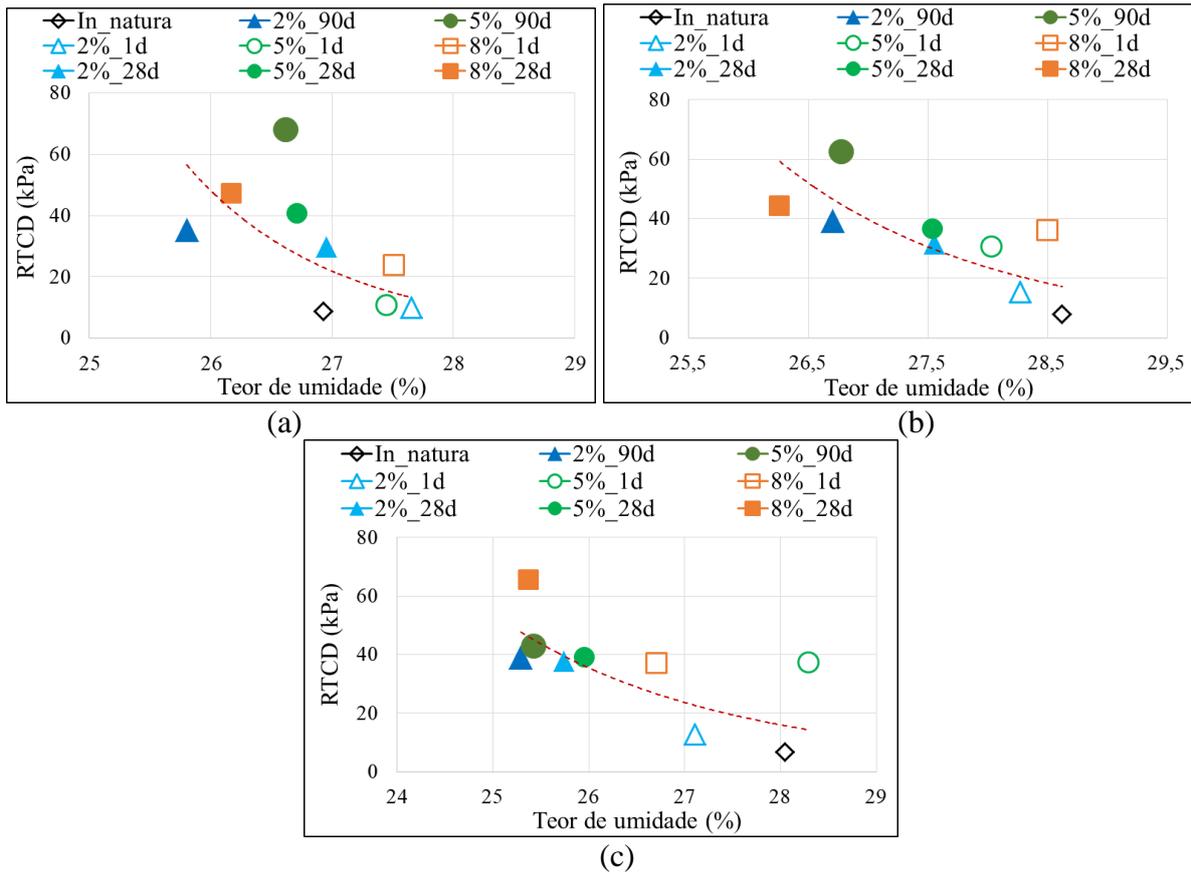


Figura 4.15 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de umidade do Perfil 2: a) Intervalo 1; b) Intervalo 2; c) Intervalo 3.

A Figura 4.16 apresenta o conjunto de resultados obtidos para o Perfil 2 em função do índice de vazios (a), do teor de umidade (b), do grau de saturação (c) e da sucção mátrica (d). Como no caso da Figura 4.14 nestas figuras adotou-se o símbolo crescente com o tempo de cura, ou seja, um dia corresponde ao menor símbolo e 90 dias ao maior. O comportamento geral verificado no Perfil 2 é similar ao observado para o Perfil 1, assim, há tendência de aumento da RTCD com a diminuição do índice de vazios, da umidade e do grau de saturação e de aumento com a elevação da sucção mátrica.

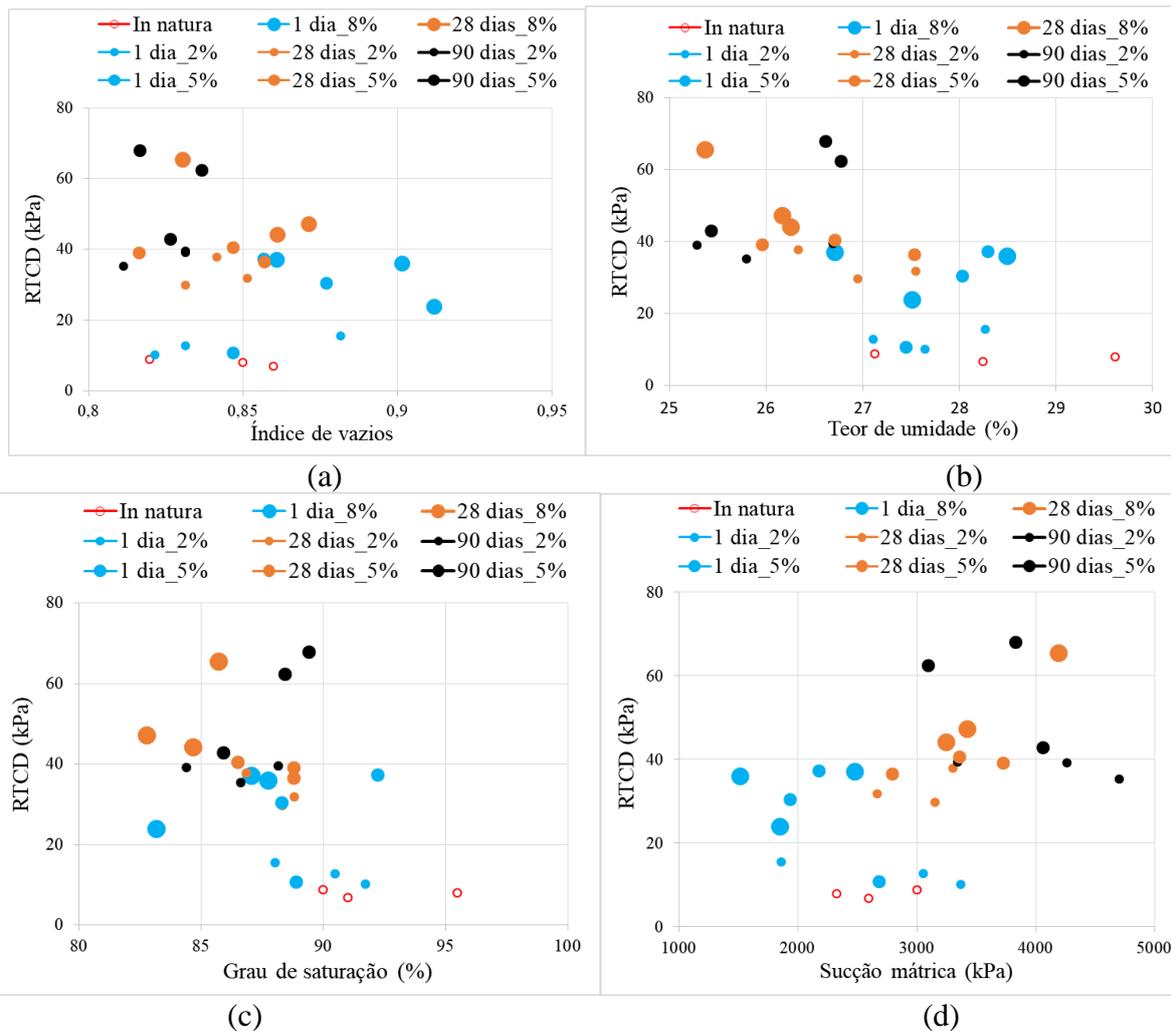


Figura 4.16 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) do Perfil 2 em função do: a) Índice de vazios; b) Teor de umidade; c) Grau de saturação; d) Sucção mátrica.

A Figura 4.17 apresenta a variação da RTCD com o teor de cal considerando-se 28 dias de cura inclusive para os solos *in natura*, de modo a viabilizar eventuais alterações de caráter tixotrópico. A primeira constatação que se faz nesta figura, é o fato do Perfil 1 apresentar significativa variação da RTCD ao passa de um intervalo para outro, variação está bem menor para o Perfil 2. Outro detalhe importante diz respeito a pequena variação da RTCD ao se passar de 2% para 5% de cal, em especial para o Perfil 1, Intervalos 2 e 3, sinalizando para o fato de que até 5% as variações estariam mais atreladas às trocas catiônicas passando a intervir as cimentações a partir de 5%. Este seria mais um fator dificultador das análises, mas que carece de mais estudos para melhor compreensão.

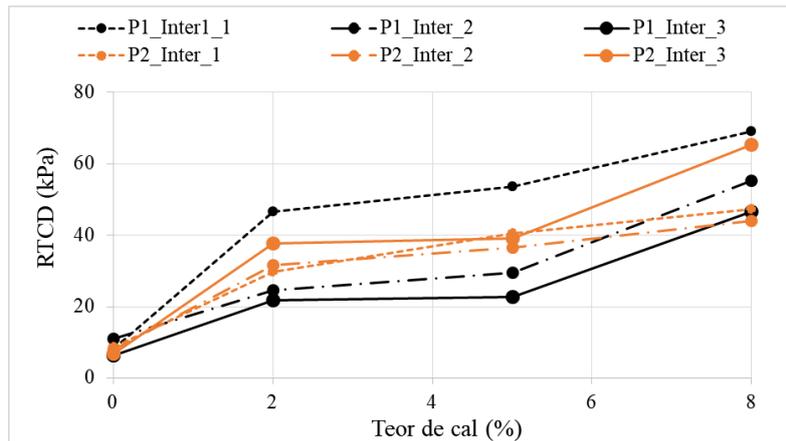


Figura 4.17 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de cal.

Buscando o entendimento dos resultados apresentados sobre a influência da cal na RTCD, plotou-se na Figura 4.18 a RTCD em função da sucção mátrica em pF normalizada pelo índice de vazios (a) e em função do pF da sucção osmótica multiplicado pela unidade volumétrica (b). Como visto na Figura 4.17, a RTCD está muito ligada às propriedades do solo o que dificulta a análise em função da sucção, seja ela mátrica ou osmótica.

Geralmente, o esperado é um aumento da RTCD com a ampliação da sucção e com a diminuição do índice de vazios, como se observa na Figura 4.18a. Para 8% de cal, fazendo-se a exclusão do ponto correspondente ao intervalo 3 do Perfil 2 (símbolo vazio), ponto este que foge a tendência geral. Eliminando-se também os pontos correspondentes a 2% e 5% de cal dos Intervalos 2 e 3 do Perfil 1, por fugirem ao comportamento previsto, se observa a esperada tendência de aumento da RTCD com a ampliação da sucção e com a diminuição do índice de vazios.

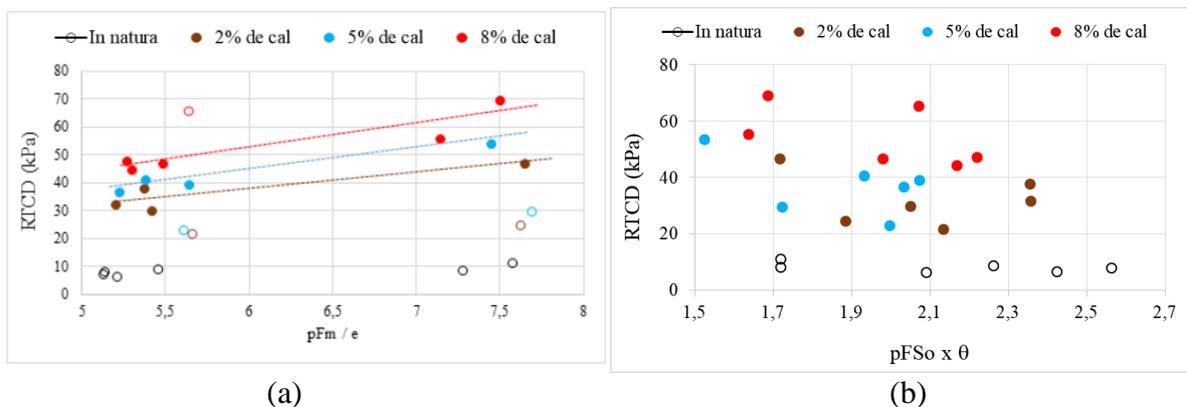


Figura 4.18 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função da: a) Sucção mátrica em pF normalizada pelo índice de vazios (e); b) pF da sucção osmótica multiplicado pela unidade volumétrica (θ).

Fazendo-se a análise dos resultados considerando-se a soma dos dois efeitos, pF da sucção mátrica dividido pelo índice de vazios e pF da sucção osmótica multiplicado pela umidade volumétrica (Figura 4.19) e efetuando-se a exclusão dos pontos eliminados quando da análise da Figura 4.18, chega-se a mesma conclusão, indicando para o pouco impacto da sucção osmótica na RTCD dos solos estudados tendo em vista a não presença de uma tendência na Figura 4.18b.

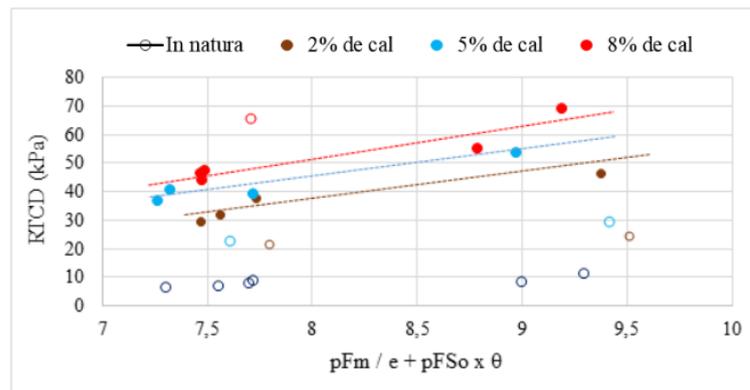


Figura 4.19 - Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do pF da sucção mátrica dividido pelo índice de vazios (e) e pF da sucção osmótica multiplicado pela umidade volumétrica (θ).

As análises aqui apresentadas, indicam elevada complexidade do comportamento mecânico dos solos tropicais estabilizados quimicamente. Requerendo, portanto, a realização de estudos mais amplos, porém limitando as variáveis que não se pretende analisar.

4.7 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Os resultados obtidos para a resistência a compressão simples (RCS) podem ser observados nas Figuras 4.20 e 4.21, respectivamente para os Perfis 1 e 2. Para cada intervalo e considerando-se os teores de cal incorporados e os tempos de cura, são apresentados os resultados de RCS em função do teor de umidade (Figura 4.20a, c, e, Perfil 1 e Figura 4.21a, c, e, Perfil 2) e do grau de saturação (Figura 4.20b, d, f Perfil 1 e Figura 4.21b, d, f, Perfil 2).

Nas Figuras 4.20 e 4.21, a partir das linhas de tendência gerais, constatou-se que os ganhos de resistência pela incorporação de cal são mais significativos nos Intervalos 2 e 3 do Perfil 1 e no Intervalo 3 do Perfil 2. Quanto aos demais Intervalos (1 do Perfil e 1 e 2 do Perfil 2) a melhoria no comportamento mecânico é atribuída ao menor grau de saturação.

Ao considerar a influência da ampliação do tempo de cura sobre a RCS, verifica-se que no Perfil 1, a adição de 2% de cal provocou ligeira melhoria no Intervalo 1 e piora nos Intervalos 2 e 3; 5% de cal apresentou piora no Intervalo 1, ligeira melhoria nos Intervalos 2 e 3, enquanto a incorporação de 8% de cal levou a uma ligeira melhoria nos três Intervalos, Figura 4.20. Foi possível observar ainda, que para o Perfil 1, com o avanço da profundidade, o aumento do tempo de interação das misturas solo-cal de 28 para 90 dias promoveu aumentos mais efetivos de RCS com adição de 5% e 8% de cal.

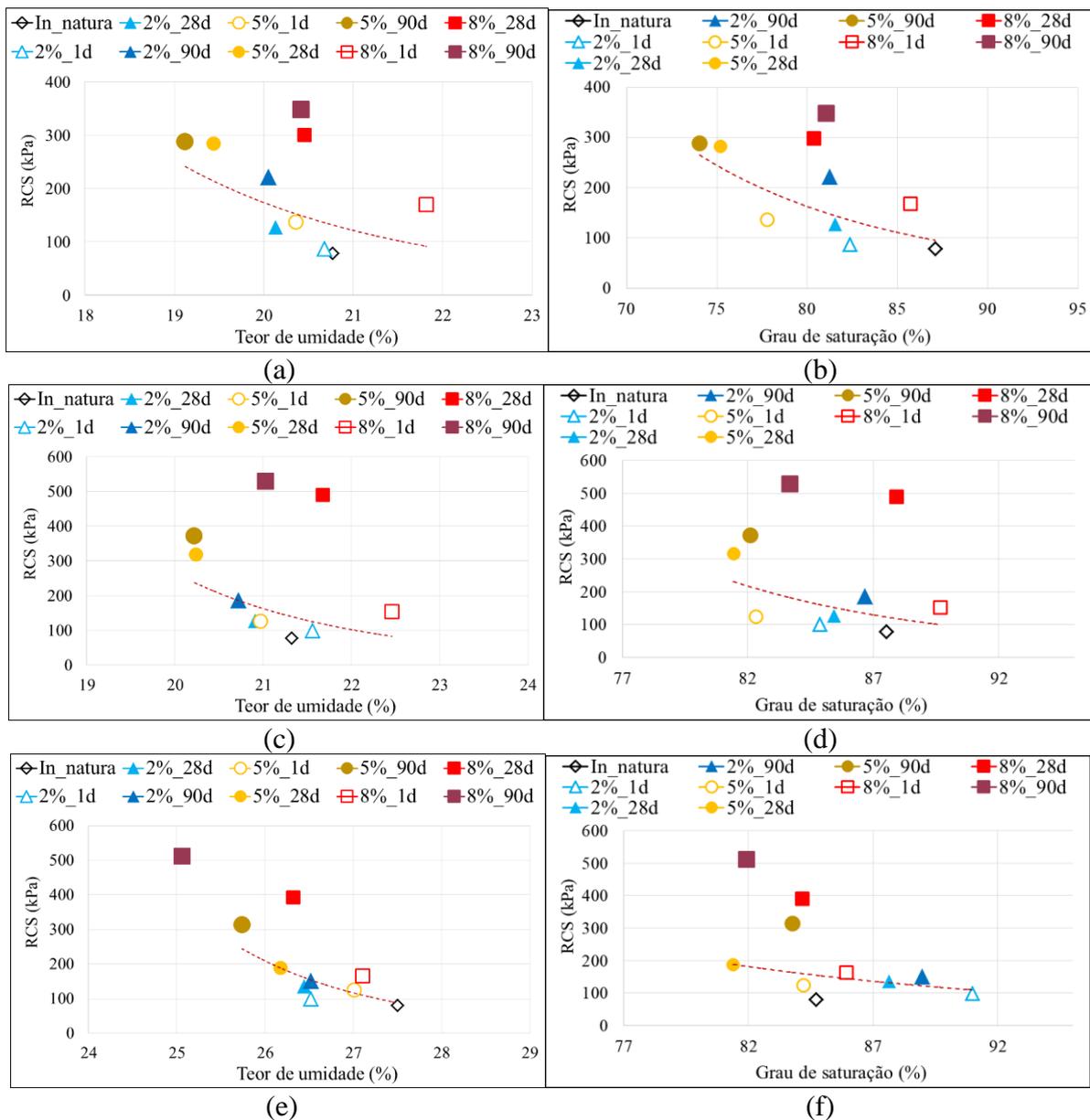


Figura 4.20 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do Perfil 1, em função do Teor de umidade e Grau de saturação do: a) e b) Intervalo 1; c) e d) Intervalo 2; e) e f) Intervalo 3.

No Perfil 2, ao adicionar 2% de cal, notou-se melhoria no comportamento no Intervalo 1 e ligeira melhoria nos Intervalos 2 e 3, 5% provocou ligeira melhoria nos Intervalos 1 e 2 e melhoria no Intervalo 3, já quando adicionado 8% aos solos os ganhos de resistência foram mais significativos com o aumento da profundidade, pois no Intervalo 1 nota-se piora de comportamento quando comparado 28 e 90 dias, enquanto os Intervalos 2 e 3 para o mesmo tempo de cura, apresentou ligeiro aumento no Intervalo 2, sendo os resultados de RCS maiores no Intervalo 3, Figura 4.21.

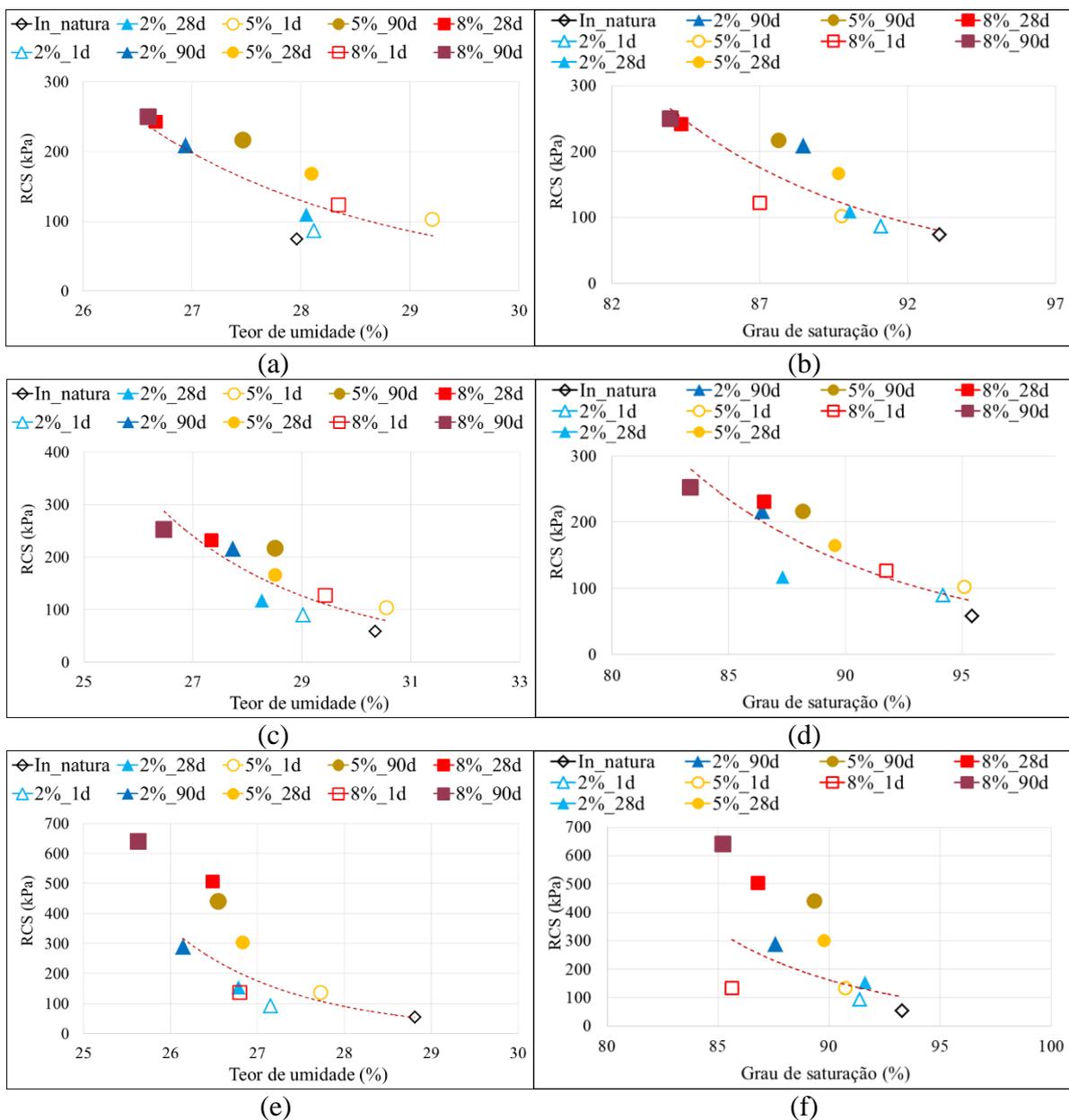


Figura 4.21 - Resistência à Compressão Simples (RCS) do Perfil 2, em função do Teor de umidade e Grau de saturação do: a) e b) Intervalo 1; c) e d) Intervalo 2; e) e f) Intervalo 3.

Embora se perceba a partir dessas figuras, a tendência geral de aumento da RCS com o teor de cal e com o tempo de cura, faz-se necessário análises mais detalhadas para que se tenha maior compreensão do comportamento mecânico dos perfis de solos estudados quando estabilizados com cal. Para isso, estimou-se a sucção mátrica do solo e das misturas solo-cal fazendo-se uso dos resultados de sucção obtidos quando da realização dos ensaios de RTCD e da proposta de transformação da curva característica conforme sugerido por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004).

Utilizando-se os resultados obtidos, plotou-se a RCS em função da sucção mátrica para o Perfil 1 (Figura 4.22a) e para o Perfil 2 (Figura 4.22b), onde os símbolos são crescentes com o aumento do tempo de cura, ou seja, um dia corresponde ao menor símbolo e 90 dias ao maior. Embora como mostrado nas caracterizações físico-químicas os solos variem ao longo dos perfis analisados, os resultados apresentados nessas figuras colocam em evidência que o tempo de cura ideal, vai depender das propriedades do solo e do próprio teor de cal analisado, e quanto a este último aspecto, ele também dependerá das características do solo.

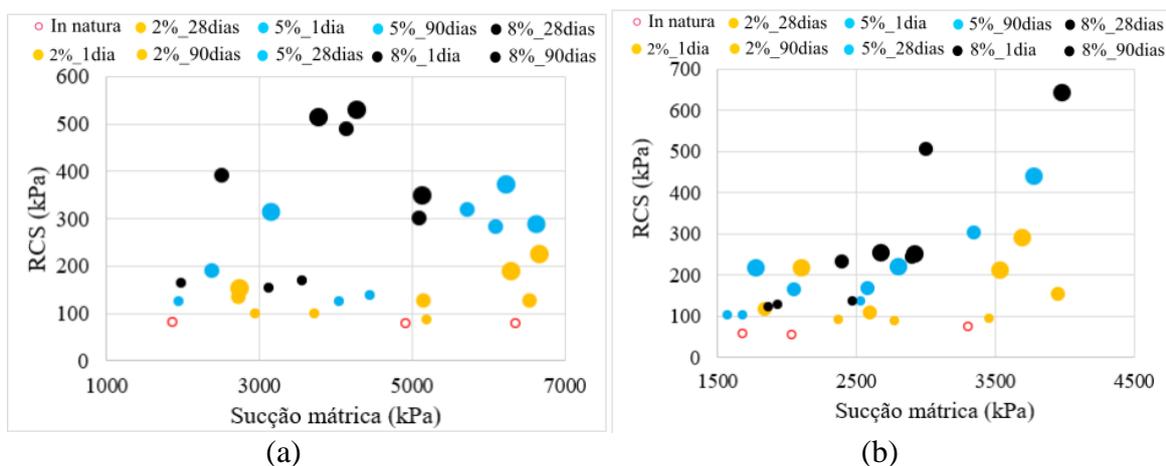


Figura 4.22 - Resistência à compressão simples (RCS) em função da sucção mátrica do: a) Perfil 1; b) Perfil 2.

4.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, tem-se como considerações finais:

1. A mineralogia determinada nos Perfis 1 e 2, principalmente, pelo decréscimo da quantidade de gibbsita em direção a maiores profundidades e comportamento oposto da caulinita no Perfil 2, além do desaparecimento da gibbsita e permanência da caulinita na base do Perfil 1, apresenta semelhanças com a encontrada em outros estudos sobre perfis de intemperismo no

Distrito Federal e destaca a importância da consideração de processos de hidrólise parcial, para o entendimento da composição mineralógica de perfis de solos tropicais.

2. Na avaliação do pH dos solos, a mineralogia se mostrou influente ao relacionar menores valores de PCZ, em intervalos que possuem maiores concentrações de caulinita (PCZ de 3 a 4) e maiores PCZs em intervalos com maiores teores de gibbsita (PCZ de 7,5 a 9,5).

3. A adição de cal elevou o pH dos solos, sendo verificados aumentos crescentes com a maior quantidade de cal incorporada. Quando comparados os pHs obtidos a 1 e a 90 dias de cura, nota-se redução acentuada no valor dos mesmos, a qual pode ser atribuída a migração da cal para o interior dos agregados com o passar do tempo.

4. A partir das curvas granulométricas dos solos *in natura* com e sem defloculante, foi possível identificar que os solos dos intervalos analisados possuem estrutura natural agregada, indicada pelos aumentos nos teores de silte e argila em decorrência do uso do defloculante. Portanto, com a realização dos ensaios de sedimentação utilizando água destilada, é possível obter resultados com maior semelhança ao estado natural do solo.

5. Quanto às curvas granulométricas das misturas solo-cal, observou-se que no geral, a cal tem potencial agregador com adição de 2%, 5% e 8% aos solos *in natura* dos Perfis 1 e 2. Entretanto, ao relacionar os diferentes intervalos, com as porcentagens de cal utilizadas e os tempos de cura a que os mesmos foram submetidos, notou-se variações granulométricas, até mesmo desagregação, embora pequena, após a agregação. Tal desagregação pode estar ligada a mecanismos de solubilização dos oxi-hidróxidos de ferro e/ou alumínio com a possível entrada da cal nas agregações.

6. Em relação ao formato das curvas de compactação, com a adição da cal, foi verificada tendência geral de achatamento. Quanto as umidades ótimas e os pesos específicos aparentes secos máximos, torna-se recomendável realizar a análise da influência da cal sobre o comportamento dos solos, considerando o índice de vazios e o grau de saturação.

7. Foram identificadas sucção mátrica e osmótica mais próximas nos Intervalos 1 e 2 do Perfil 1 e valores semelhantes no Intervalo 3 (Perfil 1) com os intervalos do Perfil 2. Entretanto, ao analisar a sucção mátrica e osmótica em função do teor de cal adicionado, notou-se

variabilidade nos resultados da sucção osmótica, não sendo possível definir a influência ou não da cal a partir dos ensaios realizados sobre essa sucção.

8. A análise dos resultados de sucção matricial transformada em relação ao índice vazios e da sucção osmótica normalizada pela unidade volumétrica, indicam ser esse um recurso com potencial adequado de utilização quando não se dispõe de avaliações pontuais características de cada situação. Destaca-se, no entanto, a necessidade de se ampliar os estudos sobre a sucção osmótica, em especial quando dos tratamentos químicos dos solos ou eventuais contaminações.

9. A análise dos resultados obtidos para as misturas tratadas quimicamente com cal, indicaram que a RTCD aumenta com o aumento logaritmo da sucção matricial normalizada pelo índice de vazios somado ao logaritmo da sucção osmótica transformada pela unidade volumétrica. Evidenciou-se nesta análise a tendência de aumento da RTCD com a ampliação do teor de cal sendo em todos os casos clara a melhoria do comportamento em relação ao solo *in natura*.

10. A avaliação da RCS em função da sucção estimada, por um lado confirma a relevância da técnica de transformação da curva característica pelo índice de vazios e por outro mostra o aumento da RCS com a sucção e com o teor de aditivo usado.

11. O grande volume de variáveis dificulta a realização de observações mais conclusivas, pois além daquelas analisadas ainda intervêm nos resultados as especificidades dos solos que compõem cada um dos três intervalos analisados por perfil, assim como as alterações da sucção osmótica proporcionadas pelo aditivo químico.

12. A maior semelhança nos resultados dos ensaios realizados entre os intervalos do Perfil 2, assim como a maior proximidade nos resultados obtidos para os Intervalos 1 e 2 e certa distinção em comparação com o Intervalo 3 do Perfil 1, podem ser oriundas da influência das unidades geológicas em que os perfis foram originados. Visto que o Perfil 2 situa-se em uma unidade onde há predomínio de uma litologia (quartzito), enquanto o Perfil 1 está inserido em uma unidade com alternância entre litologias, de metalamitos, metassiltitos e quartzitos finos.

13. Apesar do microclima dos dois perfis ser o mesmo em termos de localização, as condições altimétricas, geomorfológicas e geológicas, são distintas, impondo modos de drenagem de

superfície e subsuperfície diferentes, resultando em perfis de intemperismos dotados de particularidades geotécnicas independentes.

5 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 - CONCLUSÃO

As considerações apresentadas ao final do Capítulo 4 permitem concluir que o nível de intemperização dos perfis estudados possui significativa influência sobre a estabilização dos solos por meio da adição de cal. A partir dos ensaios realizados, foram verificados resultados distintos para os intervalos definidos, sendo essa diferenciação encontrada ao longo de cada perfil e ao comparar os perfis 1 e 2. Assim, para a efetuação das obras geotécnicas é importante considerar a atuação local do intemperismo, já que nas análises realizadas no decorrer desta dissertação, foi possível observar variação das propriedades físico-químicas, composição mineralógica e do comportamento mecânico com a mudança de profundidade e localidade de coleta das amostras.

5.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir do estudo realizado nesta dissertação, recomenda-se para pesquisas futuras:

- Avaliação das misturas solo-cal em tempos de cura superiores a 90 dias.
- Realizar as classificações TRB e MCT dos solos *in natura* e após a adição da cal.
- Submeter os corpos de prova a cura *in situ*.
- Realização de ensaios de Módulo de Resiliência (MR).
- Obtenção das curvas características tanto dos solos *in natura*, quanto das misturas solo-cal.
- Nas análises dos comportamentos mecânicos realizados é importante que se considere a influência da sucção mátrica e quando da estabilização química, também da sucção osmótica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L.A. (2014). Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados e Estabilizados Quimicamente para Uso em Barragens. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 281 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. (2010). D5298 – Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. American Society for Testing and Materials – ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 6 p.

ANDRADE, F.R.D., MCREATH, I., MADUREIRA FILHO, J.B. & ATENCIO, D. (2009) A Terra sólida: rochas e minerais. Decifrando a Terra, TEIXEIRA, W., FAIRCHILD, T.R., TOLEDO, M.C.M. & TAIOLI, F. (eds.), Companhia Editora Nacional, São Paulo, SP, pp. 130-151.

ARABANI, M. & VEIS KARAMI, M. (2005) Geomechanical properties of lime stabilized clayey sands. 2º International Symposium on Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, Paris, França, 10 p.

ARAÚJO, C.B.C. & DANTAS NETO, S.A. (2014). Caracterização de solos lateríticos para utilização em pavimentos de baixo custo na cidade de Canindé/CE. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Goiânia, GO, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1992). NBR 12770 – Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2003). NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2016a). NBR 6457 – Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2016b). NBR 6459 – Solo - Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2016c). NBR 7180 – Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2016d). NBR 7181 – Solo - Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.

AYALA, R.J.L., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, A.L. (2018). Análise de misturas de solo-cal a curto prazo. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Salvador, BA, 9 p.

AYALA, R.J.L. (2020). Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 300 p.

AZEVEDO, A.L. (2010). Estabilização de Solos com Adição de Cal. Um Estudo a Respeito da Reversibilidade das Reações que Acontecem no Solo após a Adição de Cal. Dissertação de Mestrado, NUGEO, UFOP, Ouro Preto, MG, 114 p.

BARBOSA, H.M.S. (2014). Intemperismo Biogeoquímico e Ciclagem de Nitrogênio pela Interação do Líquen *Cladonia Substellata* Vainio com Granito e Basalto. Tese de Doutorado, CFCH, UFPE, Recife, PE, 233 p.

BARBOSA, V. (2013). Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal. Dissertação de Mestrado, CTG, UFPE, Recife, PE, 111 p.

BENITES, V.M. & MENDONÇA, E.S. (1998). Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica, RBCS, 22: 215-221.

BESOAIN, E. (1985). Mineralogia de Arcillas de Suelos. Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, San José, Costa Rica, 125 p.

BIGARELLA, J.J., BECKER, R.D. & PASSOS, E. (1996). Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais: Intemperismo Biológico, Pedogênese, Laterização, Bauxitização e Concentrações de Bens Minerais. EDUFSC, Florianópolis, SC, 2 vol., 875 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J & LEROUEIL, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas, 27(3): 231-242.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., REZENDE, L.R., CARDOSO, F.B.F., LUCENA, L.C.F.L., GUIMARÃES, R.C. & VALENCIA, Y.G. (2015). Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations. Transportation Geotechnics, 5: 3-19.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR., G.F.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. Soils and Rocks, 44(3): 1-25.

CAMPELLO, C.S., MOURÃO, P.V., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & REZENDE, L.R. (2000). Estabilização com cal da mistura solo-revestimento asfáltico fresado. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, DF, 1: 164-174.

CAMPOS, J.E.G. (2004). Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Revista Brasileira de Geociências, 34(1): 41-48.

CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A., FREITAS-SILVA, F.H. & MARTINS-FERREIRA, M.A.C. (2013). Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. Brazilian Journal of Geology, 43(3): 461-476.

CARDOSO, F.B.F. (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 142 p.

CARDOSO, F.B.C., MARTINS, E.S. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1998). A evolução pedogeológica e sua influência nas propriedades físicas dos solos profundamente intemperizados do Distrito Federal. 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, DF, 1: 51-58.

CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 357 p.

CASTRO, F.J.C.O. (1981). Um Estudo Físico-químico-matemático da Estabilização Alcalina de Solos Argilosos. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 489 p.

CASTRO, F.J.C.O. (1995). Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquioxídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 410 p.

COELHO, A.Z.G., TORRAL, F.P. & JALALI, S. (2009). A Cal na Construção. TecMinho/Universidade do Minho, Portugal, 130 p.

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE. (1985). Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. Progress Report, ABMS, São Paulo, SP, 124 p.

DARDENNE, M.A. (2000). The Brasília fold belt. 31st International Geological Congress, SBG, Rio de Janeiro, RJ, 1: 231-263.

DELGADO, A.K.C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 392 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. (1994a). DNER-ME 258/94 - Solos compactados em equipamento miniatura Mini-MCV. DNER, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. (1994b). DNER-ME 228/94 - Solos - Compactação em equipamento miniatura. DNER, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. (1994c). DNER-ME 181/94 - Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada -Determinação da resistência à tração por compressão diametral. DNER, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. (1996). DNER-CLA 259/96 - Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. DNER, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. (2018). 136: Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. DNIT, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. (2019). Pavimentação - Solo-cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo - Método de ensaio. DNIT, Brasília, DF, 8 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (1978). Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Boletim Técnico n° 53, EMBRAPA-SNLC, Rio de Janeiro, RJ, 455 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (1999). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. EMBRAPA, Brasília, DF, 412 p.

FARIAS, W.M., BOAVENTURA, G.R., CARDOSO, F.B.F., MARTINS, E.S. & GUIMARÃES, E.M. (1999). Caracterização química e mineralógica do solo do aterro sanitário do Jockey Club (DF) e a influência da matéria orgânica e pH no comportamento dos elementos. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Ouro Preto, MG, 392-398.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Wiley & Sons, New York, USA, 517 p.

FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J.E.G. (1998). Geologia do Distrito Federal. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal, SEMARH, Brasília, DF, 86 p.

GUIMARÃES, J.E.P. (1971). Estabilização de Solos – Nova e Importante Aplicação da Cal – seus Conceitos e suas Vantagens. ABPC, Boletim n° 5, São Paulo, SP, 67 p.

GUIMARÃES, J.E.P. (1997). A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. Pini, São Paulo, SP, 285 p.

GUIMARÃES, R.C., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & FARIAS, M.M. (1997). Contribuição ao estudo da utilização de solos finos em pavimentação. I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego - I SIMBRATA. 1: 469-478.

GUIMARÃES, R.C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 183 p.

GUSMÃO FILHO, J.A. (2008). Solos da Formação Geológica ao Uso na Engenharia. EDUFPE, Recife, PE, 2ª ed., 198 p.

HUSS, F.O. (2018). Estabilização Química de Solos para Fins Rodoviários. Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, AM, 74 p.

JACINTHO, E.C. (2005). Estudo do Comportamento de Misturas Solo-emulsão para uso em Barragens. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 160 p.

JACINTHO, E.C., CAMAPUM DE CARVALHO, J., CARDOSO, F.B.F. & GUIMARÃES, R.C. (2012). Perfil de intemperismo e infiltração. Tópicos sobre Infiltração: Teoria e Prática

Aplicadas a Solos Tropicais, CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA JUNIOR, G.F.N. & CARVALHO, E.T.L. (eds.), Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, pp. 117-142.

JOAQUIM, A.G. (2017). Estudo de Dois Solos Tropicais Melhorados com Cimento ou Cal para Emprego em Camadas Superiores de Estradas não Pavimentadas. Dissertação de Mestrado, FEC, UNICAMP, Campinas, SP, 161 p.

KENG, J.C.W. & UEHARA, G. (1974). Chemistry mineralogy and taxonomy of oxisols and ultisols. Proceedings of Soil and Crop Sciences Society 33: 119-126.

KEYBONDORI, S. & ABDI, E. (2021). Lime stabilization to improve clay-textured forest soil road subgrades. International Journal of Forest Engineering, 8 p.

KLINSKY, L.M.G., FARIA, V.C. & LEAL, A.D. (2014). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada. Relatório de Pesquisa, ANTT, Brasília, DF, 129 p.

LEE, H.C. & WRAY, W.K. (1995). Techniques to evaluate soil suction – a vital unsaturated soil water variable. First International Conference on Unsaturated Soil, Paris, France, 2: 615-622.

LEITE, R., CARDOSO, C., CAVALCANTE, E. & FREITAS O. (2016). Lime stabilization of expansive soil from Sergipe – Brazil. E3S Web of Conferences, 9: 1-6.

LEONG, E.C., HE, L. & RAHARDJO, H. (2002). Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. Geotechnical Testing Journal, 25(3): 321-332.

LIMA, M.C. (2003). Degradação Físico-Química e Mineralógica de Maciços junto às Boçorocas. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 356 p.

LITTLE, D.N. (1995). Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Kendall Hunt Publishing Company, Dubuque, United States of America, 244 p.

LOVATO, R.S. (2004). Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação. Dissertação de Mestrado, EENGA, UFRGS, Porto Alegre, RS, 144 p.

MACEDO, J.M. & LEMOS, M.A.M. (1961). Introdução ao Estudo da Gênese dos Minerais de Argila. Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa, Portugal, 81 p.

MARTINS, E.S. (2000). Petrografia, Mineralogia e Geomorfologia de Rególitos Lateríticos do Distrito Federal. Tese de Doutorado, IG, UnB, Brasília, DF, 196 p.

MEDINA, J. (1987). Apostila de estabilização de solos. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

MÉLO, V.D. (2011). Classificação e Estabilização de solos Lateríticos do Estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado, CTRN, UFCG, Campina Grande, PB, 91 p.

MELO, V.F. (1998). Potássio e Magnésio em Minerais de Solos e Relação entre Propriedades da Ct com Formas não Trocáveis destes Nutrientes. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, MG, 205 p.

MIO, G. (2005). Condicionantes Geológicas na Interpretação de Ensaio de Piezocone para Identificação Estratigráfica na Investigação Geotécnica e Geoambiental. Tese de Doutorado, EESC, USP, São Carlos, SP, 359 p.

MOHAMED, A.A.M.S., AL-AJAMEE, M., KOBAIL, A., DAHAB, H., ABDO, M.M. & ALHASSAN, H.E. (2021). A study on soil stabilization for some tropical soils. *Materials Today: Proceedings*, 6 p.

MUÑETÓN, C.M.G. (2009). Uso de Biotecnologia na Melhoria de Solos para Fins de Pavimentação Rodoviária. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 98 p.

MUÑETÓN, C.M.G. (2013). Avaliação Geotécnica de um Perfil de Solo Tratado Biotecnologicamente para Fins de Pavimentação. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 163 p.

NÓBREGA, M.T. (1991). A Estabilização dos Solos Tropicais com Adição de Cal para fins Rodoviários. ABPC, Boletim nº 15, São Paulo, SP, 116 p.

NUNEZ, W.P. (1991). Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, visando seu Emprego na Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 150 p.

OLIVEIRA, R.F.V. (2011). Análise de Dois Solos Modificados com Cimento para Dimensionamento de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, NUGEO, UFOP, Ouro Preto, MG, 186 p.

PARFITT, R.L. (1980). Chemical properties of variable charge soils. *Soil With Variable Charges*, THENG, B.K.G. (ed.), Lower Hutt, pp. 167-194.

PASTORE, E.L. (1995). Weathering profiles. 10th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Panamerican Organizing Committee, Guadalajara, México, 1: 353-364.

PEDRO, G. (1966). Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération superficielle. *Compte Rendu de la Academie des Sciences de Paris*, 262: 1828 – 1831.

PÉREZ, A.C. (2018) Influência de Insumos Agrícolas em Propriedades Físicas de Solos Tropicais. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 103 p.

PÉREZ, A.C. (2022) Análise da Influência de Insumos Agrícolas no Comportamento de um Perfil de Solo Tropical. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 132 p.

PESSOA, F.H.C. (2004). Análises dos Solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 151 p.

- PRUSINSKI, J.R. & BHATTACHARJA, S. (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*, 1652: 215-227.
- QUEIROZ DE CARVALHO, J.B. (1988). Propriedade e comportamento de solos lateríticos estabilizados com cal. 22^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, 1: 689-706.
- REZENDE, L.R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, FT, UnB, Brasília, DF, 372 p.
- RODRIGUES, S.M. (2017). Caracterização Mineralógica e Microestrutural de um Perfil Intemperizado de Brasília. Trabalho de Conclusão de Curso, UFG, Goiânia, GO, 98 p.
- SALOMÃO, F.X.T. & ANTUNES, F.S. (1998). Solos em pedologia. *Geologia de Engenharia*, OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (eds.), ABGE, São Paulo, SP, pp. 87-99.
- SENAHA, S.C.F. (2019). A Quartzilização em Perfis de Intemperismo Tropical. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 159 p.
- SIVAPULLAIAH, P.V., PRASHANTH, J.P. & SRIDHARAN, A. (1998). A delay in compaction and importance of lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. *Ground Improvement*, 2: 27-32.
- SYERS, J.K. & ISKANDAR, I.K. (1973). Pedogenic significance of lichens. *The Lichens*, AHMADJIAN, V. & HALL, M.E. (eds.), Academic Press, London, England, pp. 225-248.
- TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A. & TEIXEIRA, W.G. (2017). Manual de Métodos de Análise de Solo. EMBRAPA, Brasília, DF, 574 p.
- TOLEDO, M.C.M., OLIVEIRA, S.M.B. & MELFI, A.J. (2009). Da rocha ao solo: intemperismo e pedogênese. *Decifrando a Terra*, TEIXEIRA, W., FAIRCHILD, T.R., TOLEDO, M.C.M. & TAIOLI, F. (eds.), Companhia Editora Nacional, São Paulo, SP, pp. 210-239.
- VILLIBOR, D.F., NOGAMI, J.S., CINCERRE, J.R., SERRA, P.R.M. & ZUPPOLINI NETO, A. (2009). Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas. *Arte & Ciência*, São Paulo, SP, 2 vols., 196 p.
- VILLIBOR, D.F. & ALVES, D.M.L. (2019). Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: Projeto e Construção: Novas Considerações. *Tribo da Ilha*, Florianópolis, SC, 544 p.

APÊNDICE A - CLASSIFICAÇÃO MCT

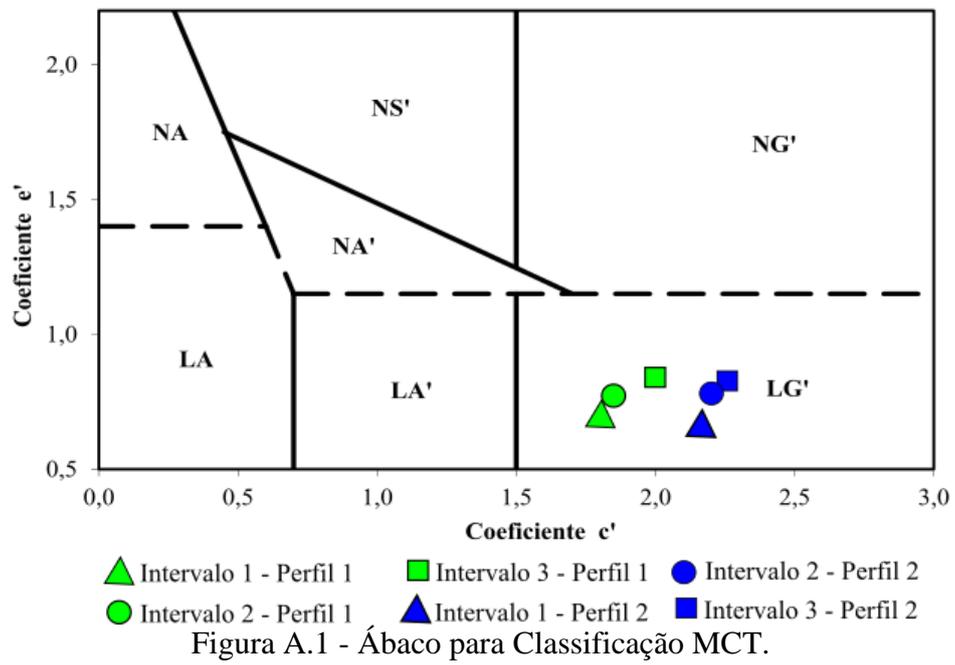
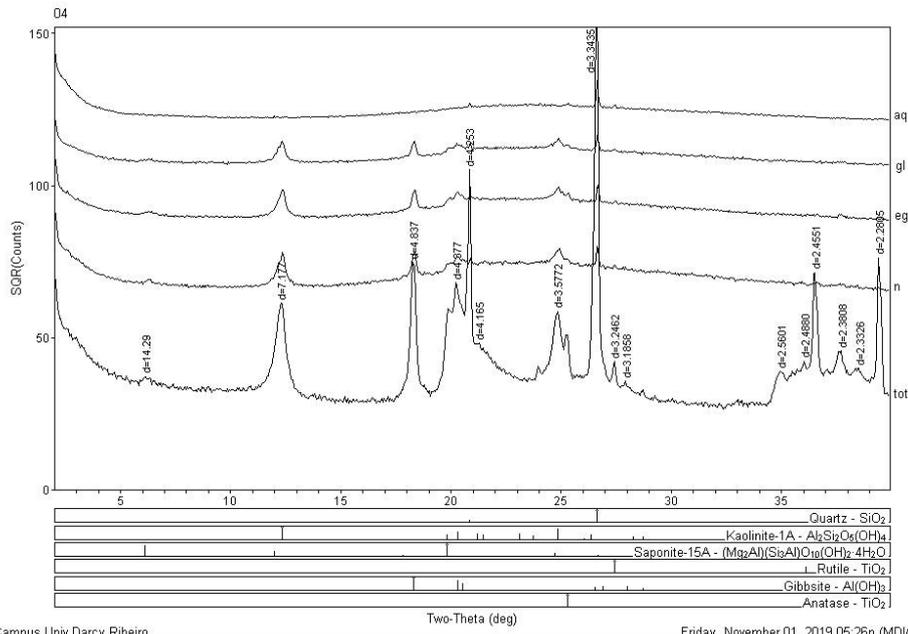


Figura A.1 - Ábaco para Classificação MCT.

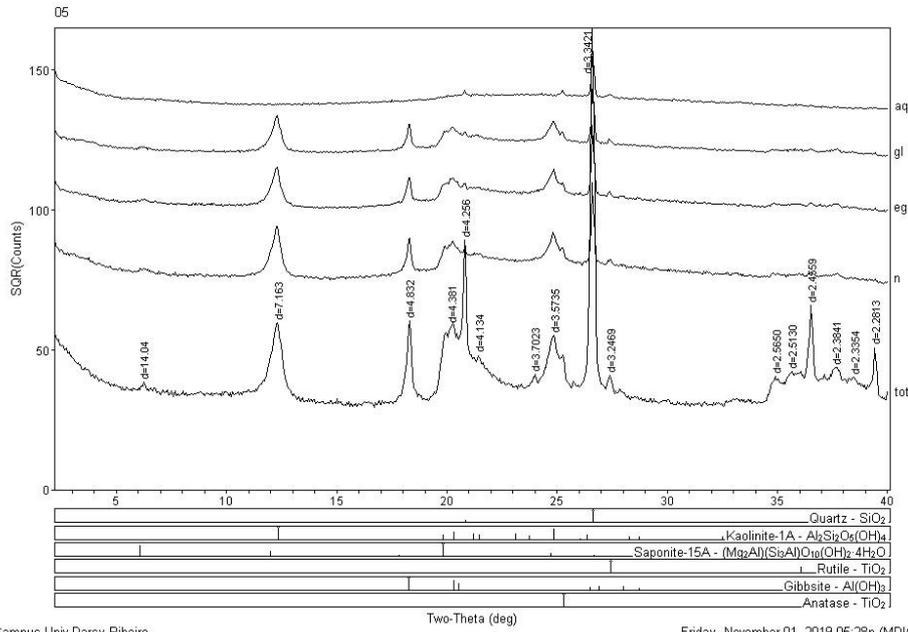
APÊNDICE B - DIFRATOGRAMAS



Campus Univ Darcy Ribeiro

Friday, November 01, 2019 05:26p (MDI/JADE9)

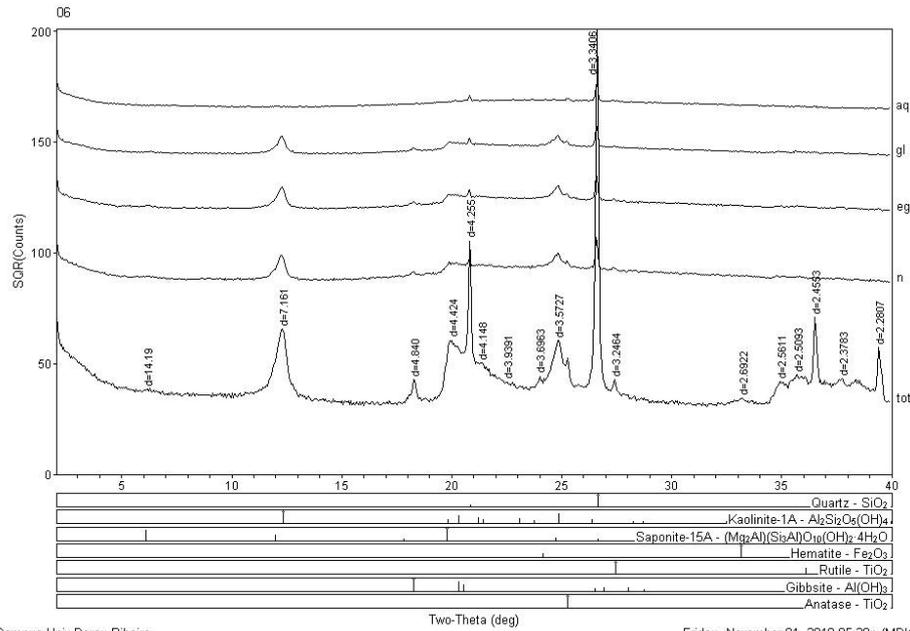
Figura B.1 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 1 m de profundidade do Perfil 1.



Campus Univ Darcy Ribeiro

Friday, November 01, 2019 05:28p (MDI/JADE9)

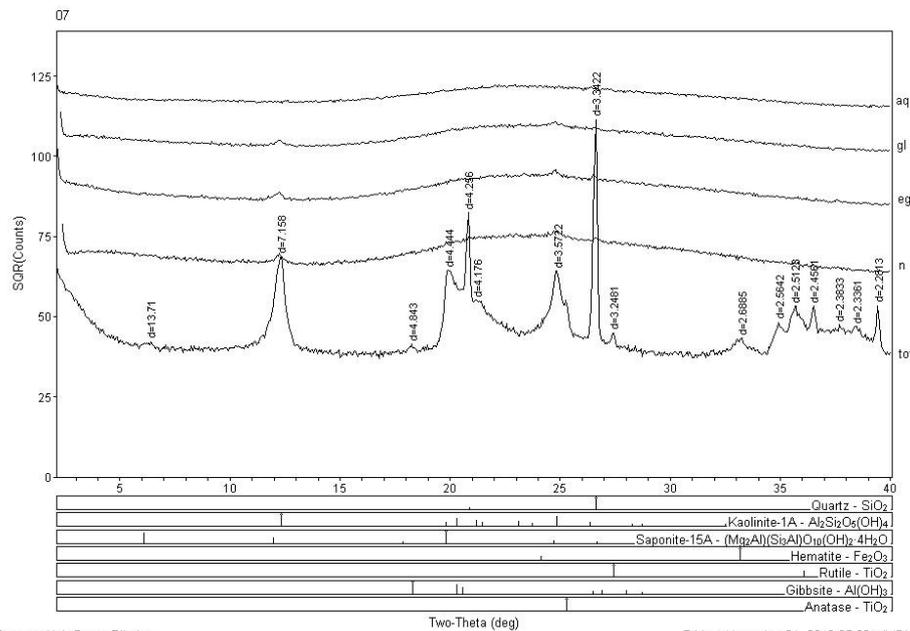
Figura B.2 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 2 m de profundidade do Perfil 1.



Campus Univ Darcy Ribeiro

Friday, November 01, 2019 05:30p (MDI/JADE9)

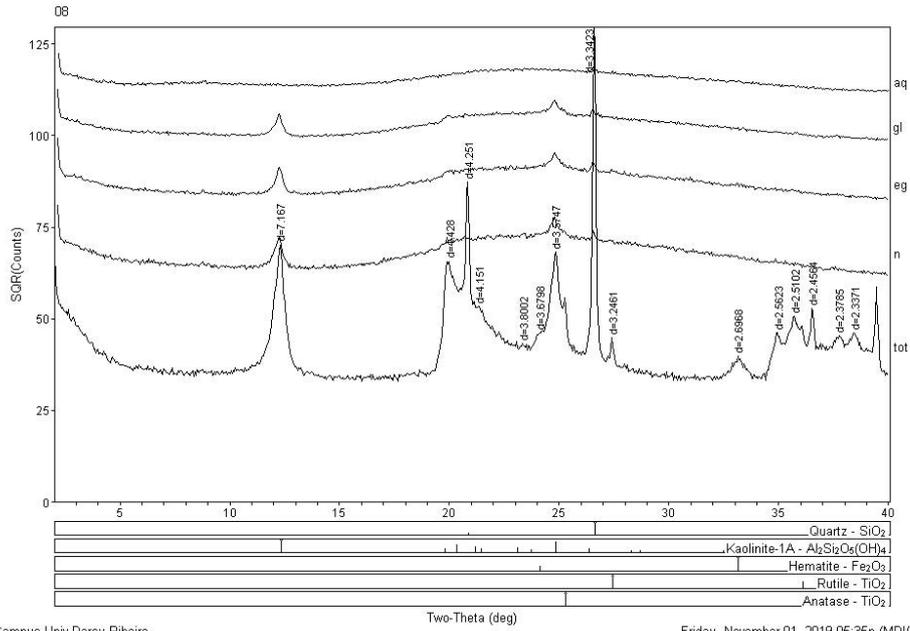
Figura B.3 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 3 m de profundidade do Perfil 1.



Campus Univ Darcy Ribeiro

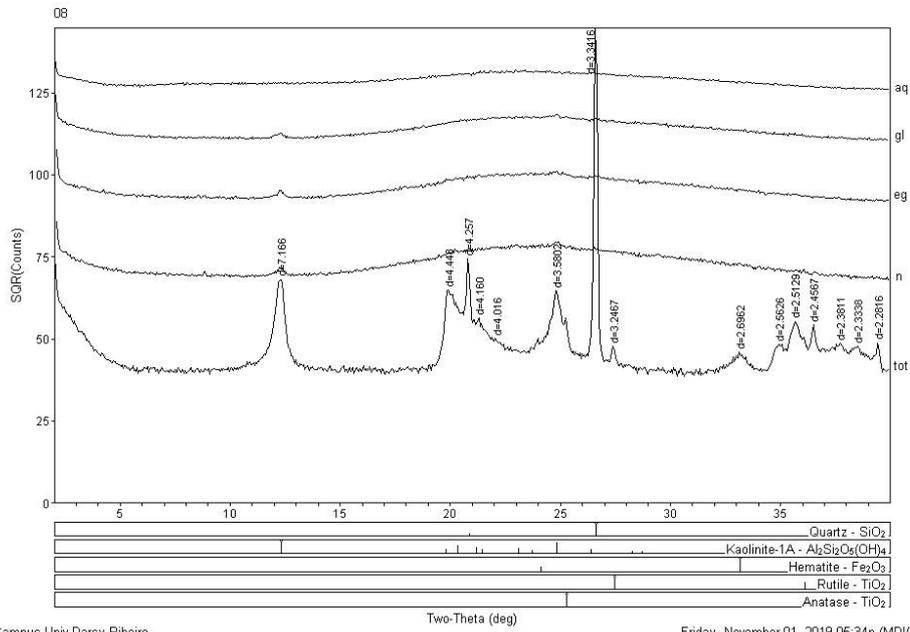
Friday, November 01, 2019 05:32p (MDI/JADE9)

Figura B.4 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 4 m de profundidade do Perfil 1.



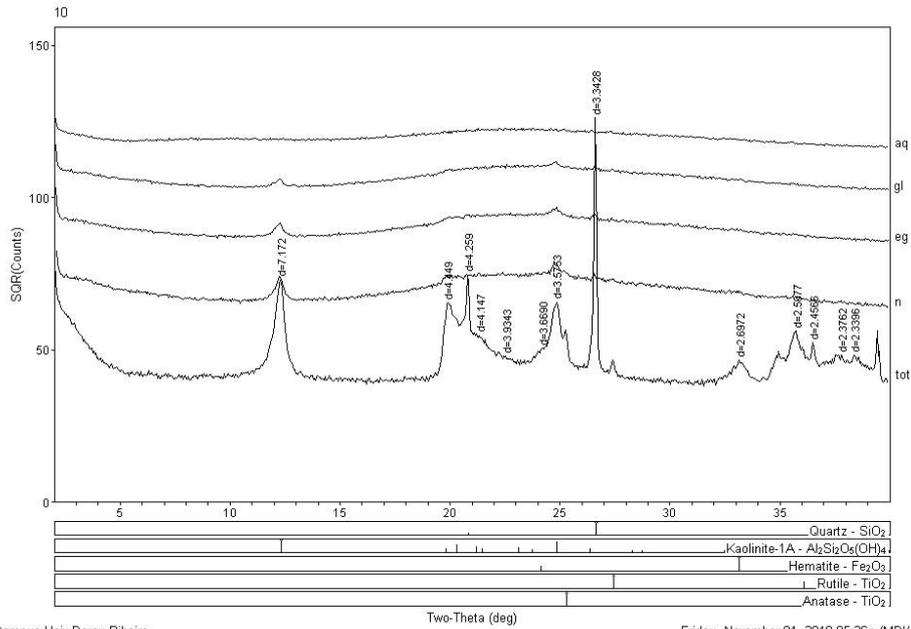
Campus Univ Darcy Ribeiro Friday, November 01, 2019 05:35p (MDI/JADE9)

Figura B.5 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 5 m de profundidade do Perfil 1.



Campus Univ Darcy Ribeiro Friday, November 01, 2019 05:34p (MDI/JADE9)

Figura B.6 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 6 m de profundidade do Perfil 1.



Campus Univ Darcy Ribeiro

Friday, November 01, 2019 05:36p (MDI/JADE9)

Figura B.7 - Difratoograma de Raios- X para amostra coletada a 7 m de profundidade do Perfil 1.

APÊNDICE C - RCS E DEFORMAÇÃO AXIAL

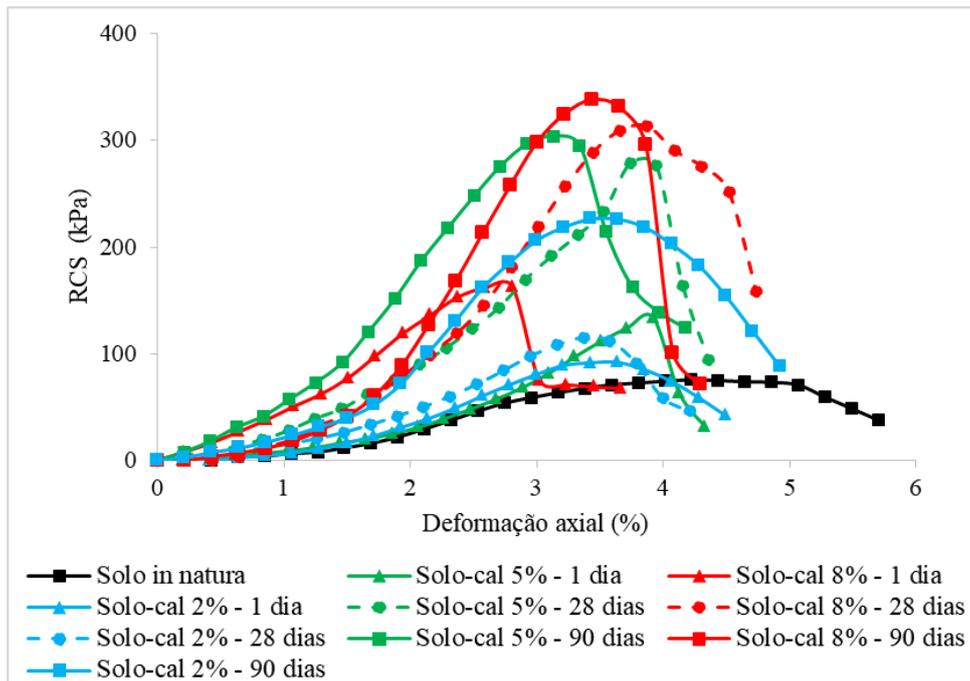


Figura C.1 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 1 do Perfil 1.

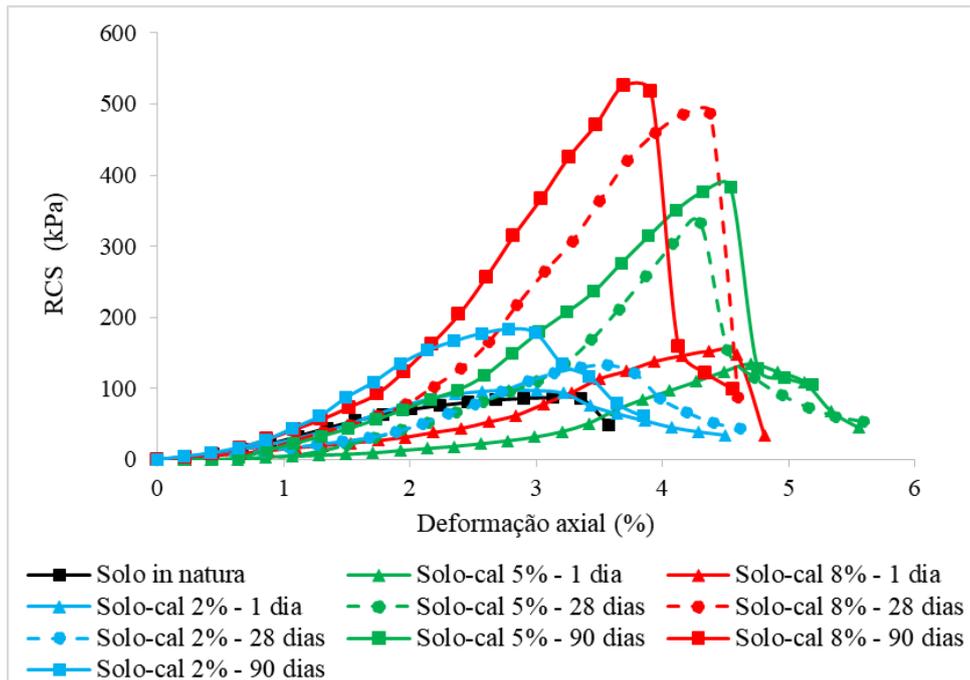


Figura C.2 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 2 do Perfil 1.

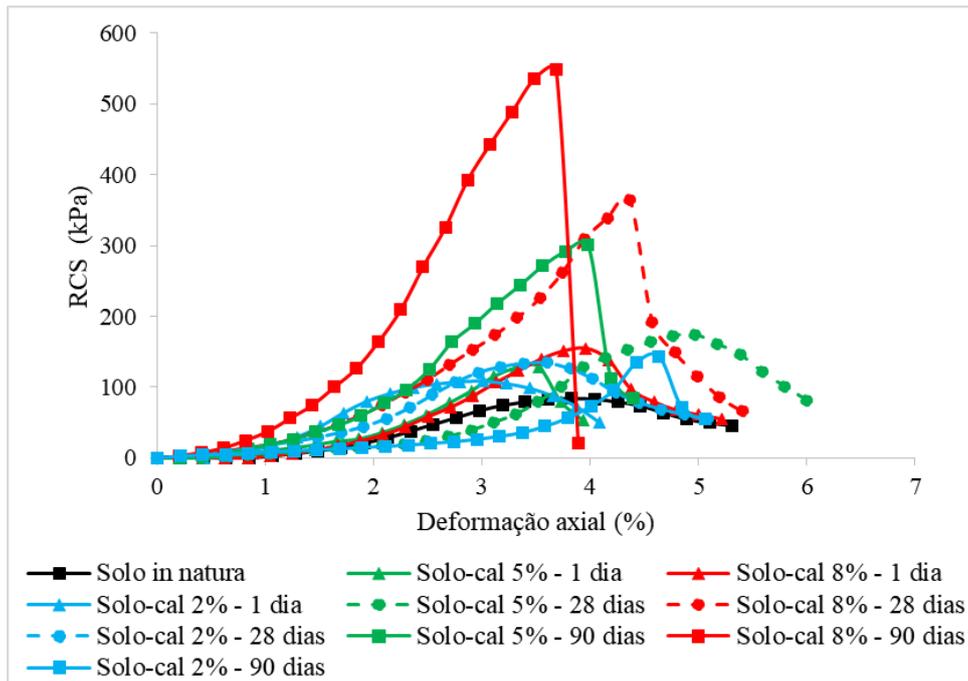


Figura C.3 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 3 do Perfil 1.

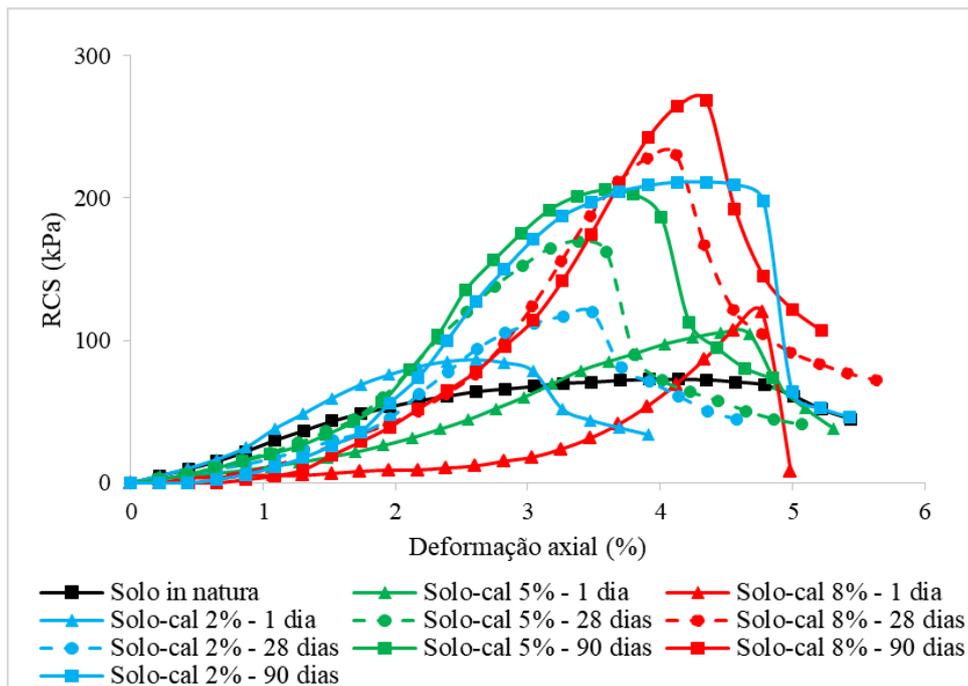


Figura C.4 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 1 do Perfil 2.

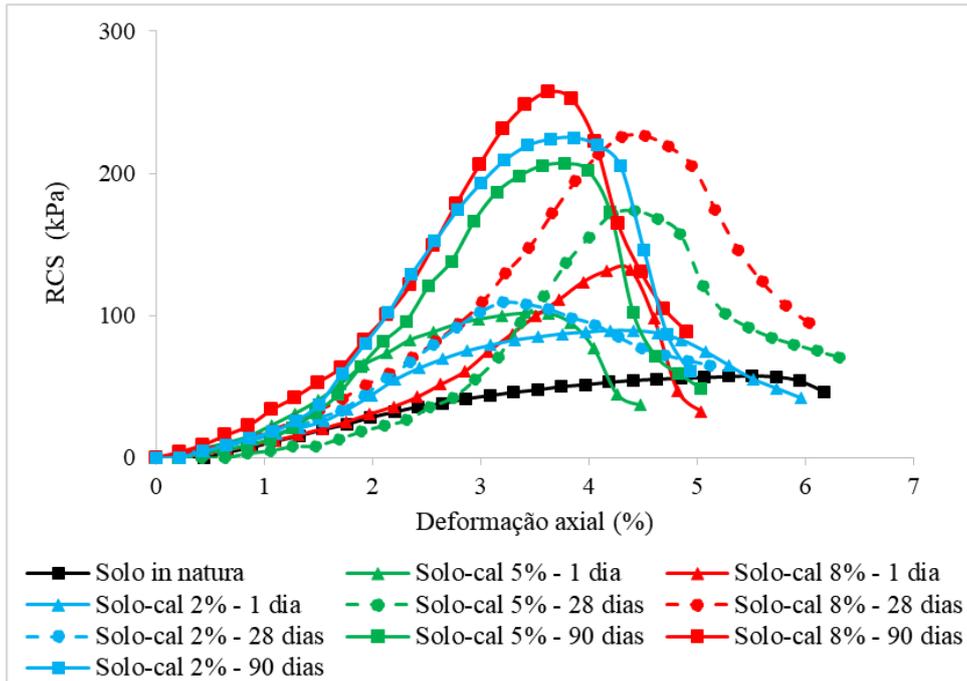


Figura C.5 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 2 do Perfil 2.

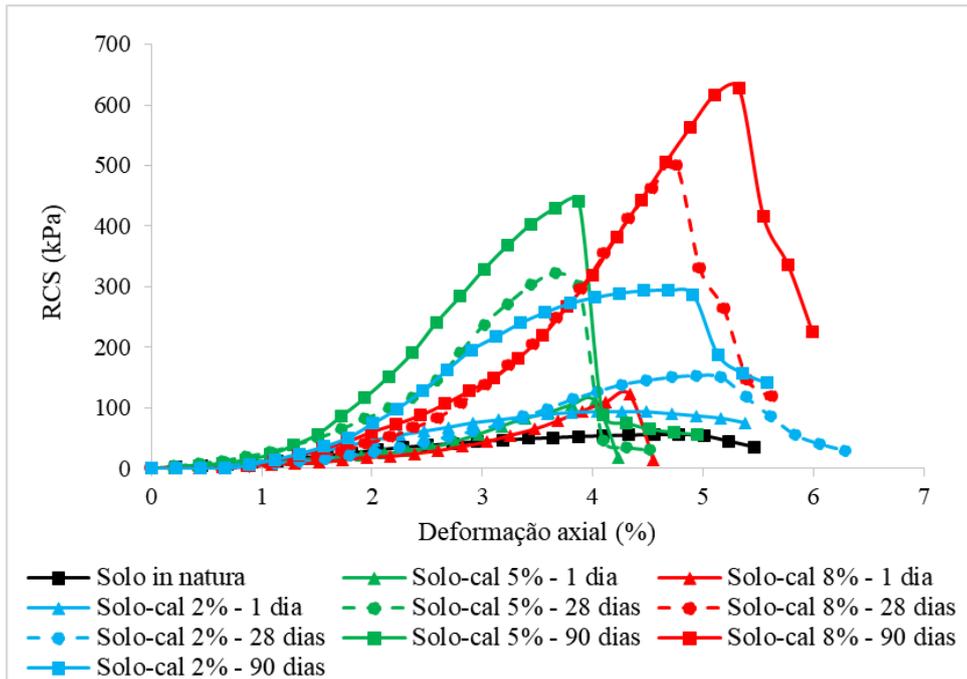


Figura C.6 - Curvas RCS x Deformação Axial do Intervalo 3 do Perfil 2.