

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA SUÇÃO E  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS  
TROPICAIS COMPACTADOS**

**ROCÍO DEL CARMEN PÉREZ COLLANTES**

**ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Julho 2022

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

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA SUCÇÃO E  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS TROPICAIS  
COMPACTADOS**

**ROCÍO DEL CARMEN PÉREZ COLLANTES**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD – 174/2022**

**BRASÍLIA/DF: 07 DE JULHO 2022**

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

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA SUCÇÃO E  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS TROPICAIS  
COMPACTADOS**

**ROCÍO DEL CARMEN PÉREZ COLLANTES**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

**APROVADA POR:**

---

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

---

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, D.Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA, D.Sc. (UFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**RENATO MARQUES CABRAL, D.Sc. (UEG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 07 DE JULHO DE 2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

PÉREZ COLLANTES, ROCÍO DEL CARMEN

Influência da temperatura na sucção e comportamento mecânico dos solos tropicais compactados, Distrito Federal, 2022.

xxiv, 177 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2022)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

1. Solos tropicais

2. Módulo resiliente

3. Clima

4. Curva característica

I. ENC/FT/UnB

II. G.DT-174/2022

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PÉREZ COLLANTES, R.D.C., (2022). Influência da temperatura na sucção e comportamento mecânico dos solos tropicais compactados, Distrito Federal, 2022. Tese de Doutorado, Publicação G.DT-174/2022. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 178 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rocío del Carmen Pérez Collantes

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Influência da temperatura na sucção e comportamento mecânico dos solos tropicais compactados. GRAU / ANO: Doutora / 2022

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

---

**Rocío del Carmen Pérez Collantes**

Av. María Parado de Bellido 574-Independencia  
Lima-Lima-Perú

## **DEDICATÓRIA**

### **A DEUS**

Aos meus pais, **Eulalia e Rigoberto,**

Aos avós (*in memoriam*), **Alejandra, Espiritu, Samuel e Belisario,**

Ao Professor e Amigo, **José Camapum de Carvalho,**

Aos Irmãos, **Arturo, Rafael, Frank y Carolina,**

Aos meus cunhados, **Eliu, Paola, Nair e Bertha**

Aos sobrinhos, **Fátima, Tadeo, Rodrigo, Angel, Dana, Oriana e Leonardo.**

Aos amigos, Iara e Gino pelo apoio e carinho,

Aos colegas pelo aprendizado.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir a realização deste doutorado, me iluminando.

Ao Brasil pela oportunidade de estudar doutorado em Geotecnia.

Aos meus pais, Eulalia e Rigoberto, pelo amor e dedicação, por serem meus exemplos de vida, por me apoiarem nesta jornada e dando-me forças para não desistir.

Ao professor José Camapum de Carvalho por todos os ensinamentos e orientações ministrados neste tempo de desenvolvimento da minha tese, pela dedicação, interesse, incentivo e esforço no decorrer desta pesquisa.

À professora Michelle Casagrande e ao Laboratório de Geotecnia do solo da UnB por todo suporte e infraestrutura necessária a execuções dos ensaios de laboratório.

Ao Instituto de Química da UnB, pelo apoio nas análises de fluorescência de raios X.

À professora Edi Guimarães do Laboratório de Difratoimetria de Raios X (LDRX) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB), pelo apoio nas análises de DRX.

Ao Laboratório de Microscopia e Microanálise (LMM) do Instituto de Ciências Biológicas (IB) da Universidade de Brasília (UnB), pelo apoio nas análises de microscopia eletrônica de varredura.

Ao professor e diretor do Laboratório de INFRALAB da UnB, Márcio Muniz de Farias, pelo apoio com seus equipamentos de triaxial cíclico de cargas repetidas.

Aos professores André Luís Brasil e Juan Félix pela contribuição como Coordenadores do programa na condução e como facilitadores na execução do projeto.

Aos técnicos Rogério e Saimon do Laboratório de Geotecnia da UnB, pelo apoio.

Aos colegas e amigos da pós-graduação da Geotecnia da UnB.

À CAPES pelo suporte financeiro.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós – Graduação pelo suporte estrutural que sem o qual não seria possível a conclusão desta pesquisa.

Obrigada a todos.

# **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA SUÇÃO E COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS TROPICAIS COMPACTADOS**

## **RESUMO**

Na engenharia geotécnica é relevante estudar as características e o comportamento dos solos que formam um perfil estratigráfico aonde se vai projetar e executar uma obra sendo relevante considerar as possíveis interações solo-atmosfera de modo a se ter um maior conhecimento dos solos em estudo. A motivação principal dessa pesquisa é entender o impacto das variações da temperatura e umidade no desempenho estrutural de solos tropicais que integram a estrutura de pavimento contribuindo assim para a melhoria de projetos e execução das obras submetidas a diferentes condições climáticas. Para o desenvolvimento do estudo foram coletadas amostras deformadas a 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m de profundidade em um mesmo perfil de intemperismo tropical cobrindo assim diferentes níveis de intemperização pelos quais passam os solos. As amostras foram submetidas a ensaios de caracterização física e químico-mineralógicas, compactadas na energia intermediária, para definição das curvas de compactação e em seguida foram submetidas as preparações necessárias para a realização dos ensaios destinados a avaliarem o impacto da temperatura no comportamento dos solos. Definidas as curvas de compactação moldou-se corpos de prova nas umidades ótimas obtidas e nas respectivas temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C para obtenção das curvas características pelo método de papel filtro. Ajustadas as umidades o conjunto corpo de prova – papel filtro foram mantidos em câmara climatizada por 15 dias, período após o qual se determinou as respectivas sucções definidoras das curvas características em termos de sucção matricial para as três temperaturas estudadas. Os corpos de prova utilizados na definição das curvas características foram submetidos a ensaios de resistência à tração. Também foram feitos ensaios de modulo resiliente e análise estrutural por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados obtidos apontam para a importância de se considerar a temperatura na avaliação das propriedades e comportamento dos solos, considerando a influência das mudanças climáticas no desempenho estrutural de solos passíveis de integrarem as estruturas de pavimentos. O foco do estudo são as vias submetidas a baixo e médio volume de tráfego sendo aplicável em camadas de reforço de subleito, sub-base e base. Sua aplicação vai desde a execução (considerando as diferenças de temperatura entre laboratório e campo) até a vida útil da obra tendo em vista a variabilidade climática.

# **TEMPERATURE INFLUENCE ON THE SUCTION AND MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPACTED TROPICAL SOILS**

## **ABSTRAC**

In geotechnical engineering it is relevant to study the characteristics and behavior of the soils that make up a stratigraphic profile where a work is going to be designed and executed, and it is important to consider the possible soil-atmosphere interactions in order to have a greater knowledge of the soils under study. The main motivation of this research is to understand the impact of temperature and humidity variations on the structural performance of tropical soils that are part of the sidewalk structure, thus contributing to improve the design and execution of the works submitted to different climatic conditions. For the development of the study, deformed samples were collected at 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m and 11 m depths in the same tropical weathering profile, thus covering different weathering levels of the soils. The samples were submitted to physical and chemical-mineralogical characterization tests, compacted at intermediate energy, to define the compaction curves, and then were subjected to the necessary preparations for the tests to evaluate the impact of temperature on the behavior of the soils. Once the compaction curves were defined, specimens were molded at the optimal moisture levels obtained and at the respective temperatures of 10 °C, 25 °C and 40 °C to obtain the characteristic curves using the filter paper method. Once the humidities were adjusted, the test specimen - filter paper set were kept in an acclimatized chamber for 15 days, after which the respective defining suctions of the characteristic curves were determined in terms of matrix suction for the three temperatures studied. The specimens used to define the characteristic curves were submitted to tensile strength tests. Resilient modulus tests and structural analysis by means of scanning electron microscopy (SEM) were also performed. The results obtained point to the importance of considering temperature when evaluating the properties and behavior of soils, considering the influence of climate change on the structural performance of soils likely to integrate sidewalk structures. The focus of the study is on roads subjected to low and medium volume traffic, and it is applicable in layers of subgrade, subbase, and base reinforcement. Its application ranges from execution (considering the temperature differences between laboratory and field) to the useful life of the work taking into account the climatic variability.

# **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA SUCCIÓN Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS SUELOS TROPICALES COMPACTADOS**

## **RESUMEN**

En la ingeniería geotécnica es importante estudiar las características y el comportamiento de los suelos que forman un perfil estratigráfico donde se va a diseñar y construir una obra, siendo relevante considerar las posibles interacciones suelo-atmósfera, a fin de tener un mayor conocimiento de los suelos en estudio. La principal motivación de esta investigación es conocer el impacto de las variaciones de temperatura y humedad en el comportamiento estructural de los suelos tropicales que integran la estructura del pavimento, contribuyendo así a mejorar el diseño y la ejecución de las obras sometidas a diferentes condiciones climáticas. Para el desarrollo del estudio se obtuvieron muestras deformadas de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m y 11 m de profundidad para un mismo perfil de meteorización tropical, cubriendo así diferentes niveles de meteorización por los que pasan los suelos. Las muestras fueron sometidas a ensayos de caracterización física y químico-mineralógica, compactadas a la energía intermedia, para la definición de las curvas de compactación y luego fueron sometidas a las preparaciones necesarias para la realización de los ensayos destinados a evaluar el impacto de la temperatura en el comportamiento de los suelos. Una vez definidas las curvas de compactación, se moldearon los cuerpos de prueba a las humedades óptimas obtenidas y a las temperaturas respectivas de 10 °C, 25 °C y 40 °C para obtener las curvas características por el método del papel de filtro. Ajustadas las humedades, el conjunto de cuerpo de prueba - papel de filtro se mantuvo en una cámara climática durante 15 días, período tras el cual se determinaron las respectivas succiones definitorias de las curvas características en términos de succión mátrica para las tres temperaturas estudiadas. Los cuerpos de prueba utilizados en la definición de las curvas características fueron sometidas a ensayos de resistencia a la tracción. También se realizaron ensayos de módulo resiliente y análisis estructural mediante microscopía electrónica (MEV). Los resultados obtenidos apuntan a la importancia de tener en cuenta la temperatura en la evaluación de las propiedades y el comportamiento de los suelos, teniendo en cuenta la influencia de los cambios climáticos en el rendimiento de los suelos que pasan a integrar las estructuras de los pavimentos. El estudio se centra en carreteras sometidas a volúmenes de tráfico bajos y medios y es aplicable en capas de subrasante, subbase y refuerzo de la base. Su aplicación abarca desde la ejecución (considerando las diferencias de temperatura

entre el laboratorio y el campo) hasta la vida útil de la obra teniendo en cuenta la variación climática.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	3
1.2	HIPÓTESE DA TESE.....	4
1.3	OBJETIVOS.....	4
1.3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1	SOLOS TROPICAIS.....	6
2.1.1	SOLOS LATERÍTICOS.....	11
2.1.2	SOLOS SAPROLÍTICOS.....	14
2.2	SOLOS NÃO SATURADOS.....	15
2.2.1	SUCÇÃO COM TEMPERATURA.....	17
2.2.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLOS.....	23
2.3	PROJETOS DE PAVIMENTO COM VARIAÇÕES CLIMÁTICAS.....	27
2.3.1	RODOVIAS EM CAMBERRA.....	27
2.3.2	RODOVIAS NA MONGÓLIA.....	29
2.3.3	ESTRADAS NO PERU.....	30
2.4	CLIMA DO BRASIL E DO PERU.....	31
2.5	PLUVIOMETRIA E TEMPERATURA EM BRASÍLIA E PERÚ.....	36
2.6	CONGELAMENTO/DESCONGELAMENTO EM PAVIMENTOS.....	40
2.7	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DA ÁGUA NOS SOLOS.....	41
2.8	PROJETO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	42
2.8.1	RELAÇÃO ENTRE A SUCÇÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SOLO.....	47
2.8.2	INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE SOLOS.....	48
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>

3.1	MATERIAIS .....	50
3.1.1	LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM .....	50
3.1.2	CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE SOLO EM ESTUDO.....	51
3.2	METODOLOGIA DE ESTUDO.....	55
3.3	MÉTODOS DE CURA NA CÂMARA CLIMÁTICA.....	56
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	58
	Densidade real dos grãos ( <i>G<sub>s</sub></i> ).....	60
	- ASTM D5550 (2014).....	60
	Solo – Análise Granulométrica .....	60
	- ABNT NBR 7181(2016).....	60
3.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	60
3.5.1	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) .....	60
3.5.2	ANÁLISES MINERALÓGICAS DOS SOLOS VIA DRX.....	61
3.5.3	ANÁLISE MICROESTRUTURAL (MEV) .....	62
3.6	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	63
3.6.1	COMPACTAÇÃO MINI-MCV .....	63
3.6.2	ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	64
3.6.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – RTCD .....	65
3.7	DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA 66	
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
4.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA .....	69
4.1.1	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X .....	69
4.1.2	ANÁLISES MINERALÓGICA DRX.....	70
4.1.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS APÓS ENSAIO MÓDULO DE RESILIENCIA ÀS TEMPERATURAS 10, 25 E 40C° .....	75
4.2	ENSAIOS DE UMIDADE NATURAL Y DENSIDADE DOS GRÃOS.....	80
4.3	GRANULOMETRIA DOS SOLOS ESTUDADOS.....	81

4.4	RESULTADOS DE LIMITES DE ATTERBERG E CLASSIFICAÇÃO DO PERFIL DO SOLO.....	83
4.5	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, SUCCÃO E RTCD.....	85
4.6	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, SUCCÃO E RTCD PARA AS TEMPERATURAS DE 10 °C, 25 °C e 40 °C .....	93
4.9	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO RESILIENTE (MR) E RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD).....	122
4.9.1	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO RESILIENTE (MR).....	123
4.9.2	ENSAIO DE RTCD.....	126
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>128</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	128
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	131
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>132</b>
	<b>APÉNDICE A: RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE PARA A TEMPERATURA 10 °C .....</b>	<b>144</b>
	<b>APÉNDICE C:RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE PARA A TEMPERATURA 40 °C .....</b>	<b>150</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical .....	6
Figura 2.2 – Carta climática de América do Sul (Köppen, 2007). Fonte: Peel, M. C., Finlayson, B. L., and Mc Mahon, T. A. ....	9
Figura 2.3 – Ocorrência de solos lateríticos e saprolíticos no território brasileiro .....	12
Figura 2.4 – Amostra oriunda de 2 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.....	19
Figura 2.5 – Amostra oriunda de 9 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.....	19
Figura 2.6 – Modelo de Curva Característica (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> , 2009).....	21
Figura 2.7 – Estrutura de Pavimento Flexível, Camberra (Austroads, 2013) .....	28
Figura 2.8 – Temperatura horária a diversas profundidades do revestimento (Camberra), a) verão e b) inverno. (Adaptado de AUSTROADS, 2013).....	28
Figura 2.9 – Descrição dos regimes térmicos com alteração sazonal em regiões frias (Kachroo <i>et al.</i> , 2002).....	29
Figura 2.10 – Estrutura do Pavimento em Peru .....	31
Figura 2.11 – Cartas de: a) Clima de Peru (Beck <i>et. al.</i> 2018), b) América do Sul (Atlas Riedel), c) Clima de Brasil (Alvarez, 2013) .....	32
Figura 2.12 – Gráfico de temperaturas máximas médias no Brasil e no Peru .....	34
Figura 2.13 – Gráfico de temperaturas mínimas médias no Brasil e no Peru .....	34
Figura 2.14 – Gráfico de Precipitação média mensal no Brasil e no Peru .....	35
Figura 2.15 – Gráfico de Umidade Relativa mensal média no Brasil e no Peru.....	35
Figura 2.16 – Distribuição sazonal da precipitação em: a) Brasília - Brasil (1963-2021, INMET 2021) e b) Mazán-Peru (1992-2014, SENAMHI 2021).....	36
Figura 2.17 – Precipitação acumulada anual média em: a) Brasília (1963-2021) e b) Mazán (1992-2014).....	37

Figura 2.18 – Precipitação média sazonal em Brasília: a) Verão, b) Outono, c) Inverno, d) Primavera, no período de 1963 até 2021. Fonte: INMET 2022.....	38
Figura 2.19 – a) Precipitação média sazonal em Brasília - Brasil, no período de 1963 até 2021 e b) Precipitação média sazonal em Mazán - Peru, no período de 1992 até 2014.....	39
Figura 2.20 – a) Temperatura máxima, mínima e média e b) Temperatura anual máxima em fevereiro e mínima em julho, em Brasília no período de 1963 até 2021. Fonte: INMET, 2022.....	39
Figura 2.21 – Gráfico da influência da temperatura: a) no peso específico da água; b) na viscosidade cinemática; c) na tensão superficial; d) na pressão de vapor.....	41
Figura 2.22 – Esquema de camadas de solos com distintos comportamentos elásticos (Bernucci <i>et al.</i> , 2010).....	44
Figura 2.23 – a) Esquema de aplicação de tensões no ensaio triaxial e b) Deslocamentos sofridos pelo corpo de prova no ensaio triaxial (Bernucci <i>et al.</i> , 2010).....	44
Figura 2.24 – Esquema de esquema da montagem da amostra.....	45
Figura 3.1 – Localização do poço P realizado para coleta das amostras (modificado, Google Earth, 2020).....	50
Figura 3.2 – Poço a 1 m de profundidade, solo profundamente intemperizado.....	51
Figura 3.3 – Perfil de solo do campo experimental da UnB (Modificado de Mota, 2003).....	52
Figura 3.4 – Esquema de solos utilizados e suas características.....	53
Figura 3.5 – Solo na condição compactada, aumento 50x: a) 1 m, b) 3 m, c) 5 m, d) 7 m, e) 9 m e f) 11 m.....	53
Figura 3.6 – Mapa geológico do Distrito Federal e ponto de coleta da amostra (Modificado, Freytas-Silva e Campos, 1998).....	54
Figura 3.7 – Localização do poço P no mapa de pedológico do Distrito Federal (Modificado, EMBRAPA, 2004).....	54
Figura 3.8 – Organograma dos ensaios de laboratório realizados na tese.....	56
Figura 3.9 – Câmara Climática do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.....	57
Figura 3.10 – Esquema de cura de solos e/ou corpos de prova.....	58

Figura 3.11 – a) Preparação de amostras com destorroamento; b) Solos em lâminas de vidro preparadas para análise no DRX .....	61
Figura 3.12 – a) Equipamento de microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Biologia da UnB; b) Amostras de MEV metalizadas. ....	62
Figura 3.13 – a) Corpo de prova para ensaio MR, b) Corpo de prova na célula triaxial e c) Equipamento triaxial cíclico.....	64
Figura 3.14 – Dados y resultados de ensaio no programa UTM-41 .....	65
Figura 3.15 – Corpo-de-prova colocado no equipamento de Resistência a Tração por Compressão Diametral .....	65
Figura 3.16 – Montagem do ensaio de determinação da sucção pela técnica do papel filtro ..	67
Figura 4.1 – Composição Química dos Solos .....	69
Figura 4.2 – Gráfica: a) Ferro e Alumínio, b) Alumínio e Silício.....	70
Figura 4.3 – Difratoograma para a profundidade de 1 m, solo laterítico .....	71
Figura 4.4 – Difratoograma para uma profundidade de 3 m, solo laterítico .....	72
Figura 4.5 – Difratoograma para uma profundidade de 5 m, solo laterítico .....	72
Figura 4.6 – Difratoograma para uma profundidade de 7 m, solo laterítico .....	73
Figura 4.7 – Difratoograma para uma profundidade de 9 m, solo de transição .....	73
Figura 4.8 – Difratoograma para uma profundidade de 11 m, solo saprolítico .....	74
Figura 4.9 – Solo de 1 m, MEV (5000x), vista horizontal: a) 10 °C, b) 25 °C e c) 40 °C.....	75
Figura 4.10 – Solo de 1 m, MEV (5000x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c)40°C e 1 m, MEV (500x), vista vertical: d) 10°C, e) 25°C e f) 40°C .....	76
Figura 4.11 – Solo de 3 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C .....	76
Figura 4.12 – Solo de 3 m, MEV (5000x), vista vertical : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.....	76
Figura 4.13 – Solo de 5 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C. ....	77
Figura 4.14 – Solo de 5 m, MEV (5000x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.....	77
Figura 4.15 – Solo de 7 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C. ....	77
Figura 4.16 Solo de 7 m, MEV (5000x), vista vertical : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.....	77

Figura 4.17 – Solo de 9 m, MEV (5000x), vista horizontal: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C .....	78
Figura 4.18 – Solo de 9 m, MEV (5000x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.....	78
Figura 4.19 – Solo de 11 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C .....	78
Figura 4.20 – Solo de 11 m, MEV (5000x), vista vertical : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.....	79
Figura 4.21 – Solo de 11 m, MEV (700x), vista horizontal: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C .....	79
Figura 4.22 – Solo de 11 m, MEV (700x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.....	79
Figura 4.23 - a) Perfil de umidade no momento da amostragem atual e de Lopera, 2016 e b) Densidade dos grãos (Gs atual) e de Lopera, 2016 .....	80
Figura 4.24 – Curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante na sedimentação para as amostras provenientes de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m de profundidade.....	82
Figura 4.25 – Curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante na sedimentação para as amostras provenientes de 9 m e 11 m de profundidade. ....	82
Figura 4.26 – Variação das frações granulométricas argila, silte e areia ao longo do perfil. a) Análise granulométrica sem uso de defloculante e b) Análise granulométrica com uso de defloculante .....	83
Figura 4.27 – Curvas de Compactação dos solos. a) Amostras de 1, 3, 5, e 7 m, b) Amostras de 9 e 11 m e c) Todas as amostras.....	87
Figura 4.28 – Curvas de compactação em termos do índice de vazios e umidade dos solos: a) amostras de 1, 3, 5, 7 m de profundidade; b) amostras de 9 e 11 m de profundidade e c) todas as amostras .....	88
Figura 4.29 – Gráfico de solos de 1 m, 3 m, 5 m e 7 m a) Sucção vs. Umidade e b) Sucção vs. Saturação .....	89
Figura 4.30 – Gráfico de solos de 9 m e 11 m a) Sucção vs. umidade e b) Sucção vs. Sr.....	90
Figura 4.31 – Gráfico de solos de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m: a) Sucção vs. Umidade e b) Sucção vs. Saturação .....	90
Figura 4.32– a) Resistência à tração de 1 m, 3 m, 5 m e 7 m vs. Umidade e b) Resistência à tração de 1 m, 3 m, 5 m e 7 m vs. Saturação.....	91
Figura 4.33 – a) Resistência à tração de 9 m e 11 m vs. Umidade e b) Resistência à tração de 9 m e 11 m vs. Saturação.....	91

Figura 4.34 – a) Resistência à tração de todas as amostras vs. Umidade e b) Resistência à tração de todas as amostras vs. Saturação .....	92
Figura 4.35 – Resistência à tração para todas as profundidades vs. Sucção mátrica .....	93
Figura 4.36 – a) Solo de 1 m (a1: $\gamma_d$ vs. w, a2: e vs.w, a3: sucção vs. w) .....	95
Figura 4.37 – b) Solo de 3 m (b1: $\gamma_d$ vs. w, b2: e vs.w, b3: sucção vs. w) .....	96
Figura 4.38 – c) Solo de 1 m (c1: $\gamma_d$ vs. w, c2: e vs.w, c3: sucção vs. w) .....	97
Figura 4.39 – d) Solo de 7 m (d1: $\gamma_d$ vs. w, d2: e vs.w, d3: sucção vs. w) .....	98
Figura 4.40 – e) Solo de 9 m (e1: $\gamma_d$ vs. w, e2: e vs.w, e3: sucção vs. w) .....	99
Figura 4.41 – f) solo de 11 m (f1: $\gamma_d$ vs. w, f2: e vs.w, f3: sucção vs. w). .....	100
Figura 4.42 – Resistência à tração dos solos coletados ao longo do perfil de intemperismo em função da: Umidade (a1, b1, c1, d1, e1, f1); Saturação (a2, b2, c2, d2, e2, f2) e Sucção (a3, b3, c3, d3, e3, f3).....	107
Figura 4.43 – Resistência à tração de todos os solos estudados com variação de temperatura (10 °C, 25 °C e 40 °C).....	108
Figura 4.44 – Curvas características de retenção de água para o solo de 1 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr.....	110
Figura 4.45 – Curvas características de retenção de água para solo de 3 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr .....	111
Figura 4.46 – Curvas características de retenção de água para solo de 5 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Sr e d) e.pF x Sr.....	113
Figura 4.47 – Curvas características de retenção de água para o solo coletado à 7 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr .....	114
Figura 4.48 – Curvas características de retenção de água para solo de 9 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr .....	115

Figura 4.49 – Curvas características para o solo coletado à 11 m de profundidade: a) Sucção x Umidade gravimétrica ( $w$ ); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação ( $S_r$ ) e d) $e.pF$ x $S_r$ .....	116
Figura 4.50 – Comparação entre as curvas características de retenção de água dos solos compactados considerando-se: a) 1 m, 3 m, 5 m, e 7 m; b) 9 m e 11 m e c) Todas as profundidades .....	118
Figura 4.51 – Curvas características de retenção de água transformadas $e.pF$ x $S_r$ dos solos compondo o perfil de intemperismo analisado .....	119
Figura 4.52 – Resultados de RTCD x $S_r$ para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C obtidos para as profundidades: a) 1 m e 3 m; b) 5 m e 7 m e c) 9 m e 11 m .....	121
Figura 4.53 – Resultados de RTCD x $pF/e$ para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C obtidos para as profundidades: a) 1 m e 3 m; b) 5 m e 7 m e c) 9 m e 11 m .....	122
Figura 4.54 – Módulo Resiliente médio em função da profundidade para: a) $W_{\acute{o}timo-2\%}$ ; b) $W_{\acute{o}timo}$ ; c) $W_{\acute{o}timo+2\%}$ e d) $W_{\acute{o}timo-2\%}$ , $W_{\acute{o}timo}$ e $W_{\acute{o}timo+2\%}$ .....	124
Figura 4.55 – Módulo resiliente em função da sucção para a temperatura 25 °C .....	125
Figura 4.56 – Módulo resiliente em função da sucção para as temperaturas 10 °C (a) e 40 °C (b) .....	125
Figura 4.57 – Vistas dos ensaios de resistência a tração do solo de 1 m (umidade ótima) para temperatura: a) 10°C; b) 25°C e c) 40°C. ....	126
Figura 4.58 – Vista dos ensaios de resistência à tração do solo de 11 m de profundidade (umidade ótima + 2%), para temperatura: a) 10°C; b) 25°C e c) 40°C .....	126
Figura 4.59 – Resistência à tração x umidade para os corpos de prova previamente submetidos às temperaturas: a) 10 °C; b) 25 °C; c) 40 °C; d) 10 °C, 25 °C e 40 °C .....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades solos tropicais (Balbo, 2007).....	8
Tabela 2.2 – Atributos do clima do Brasil considerando-se as médias anuais acumuladas por região entre 1960 e 2018 .....	33
Tabela 2.3 – Atributos do clima do Peru considerando-se as médias anuais acumuladas por região entre 1992 e 2014 .....	33
Tabela 2.4 – Pares e sequência de tensões para determinação de módulo de resiliência indicados pela norma AASHTO (T 307-99/2007) para solos de base e sub-base .....	45
Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização de solos .....	59
Tabela 3.2 – Equações de calibração da sucção definidas por Leong <i>et al.</i> (2002).....	68
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de DRX.....	74
Tabela 4.2 – Porosidade com temperaturas de 10, 25 e 40 °C.....	80
Tabela 4.3 – Resultados de umidade natural, limites de Atterberg, índices de plasticidade, índice de consistência e índice de liquidez e da classificação na Carta de Casagrande dos solos coletados.....	83

## Lista de Abreviaturas

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CL	Argila de baixa plasticidade
CNT	Confederação Nacional do Transporte
C.D.	Com defloculante
cm	Centímetro
CP-1	Corpo-de-prova n°1
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento de Infraestrutura de Transportes
DF	Distrito Federal
D <sub>10</sub>	Diâmetro efetivo
D <sub>30</sub>	Diâmetro das peneiras que permitem passar 30% do solo em massa
D <sub>60</sub>	Diâmetro das peneiras que permitem passar 60% do solo em massa
DRX	Difração de Raios X
e	Índice de Vazios
e	Espessura
<i>et al.</i>	E outros
EDX	Espectrometria de Raios-X por Dispersão em Energia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Ferro
FRX	Fluorescência de Raios X

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de Plasticidade
K	Potássio
kg	Quilograma
kN	Quilo Newton
km	Quilómetro
kPa	Quilo Pascal
w <sub>l</sub>	Limite de Liquidez
w <sub>p</sub>	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MCV	Moisture Condition Value
MCT	Miniatura, Compactada e Tropical
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ML	Silte de baixa plasticidade
Mr	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
N <sub>spt</sub>	Ensaio de Penetração Estânder
m	Metro
mm	Milímetro
pF	Logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral para solos
S <sub>ad</sub>	Sucção de Adsorção
S <sub>c</sub>	Sucção Capilar
u <sub>a</sub> -u <sub>w</sub>	Sucção
S.D.	Sem Defloculante
SEAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte

SEST	Serviço Social do Transporte
SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura
Si	Silício
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
$S_{om}$	Sucção Osmótica
R	Constante Universal dos Gases
T	Temperatura
$\Psi$	Sucção total
$h_r$	Umidade Relativa
Ti	Titânio
UnB	Universidade de Brasília
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
WMAPT	Temperatura Média Anual Ponderada do Pavimento

## Lista de Símbolos

$\sigma_1$	Tensão axial
$\sigma_3$	Tensão confinante
$\sigma_d$	Tensão desvio
$k_1, k_2, k_3$	Constantes de regressão
g	Grama
$\gamma_d$	Peso específico do solo seco
$\gamma_n$	Peso específico natural do solo
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$G_s$	Massa Específica dos grãos ( $\text{g/cm}^3$ )
$G_w$	Massa Específica da água
OCR	Razão de pré-consolidação
w	Teor de umidade
$w_{ót}$	Umidade ótima
$R^2$	Coeficiente de correlação
$S_r$	Saturação
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
Cc	Coeficiente de Curvatura
%	Porcentagem
K	Grau Kelvin

# 1 INTRODUÇÃO

Mundialmente o transporte rodoviário tem papel fundamental no desenvolvimento social e econômico dos países. O Brasil e o Perú não constituem exceção neste cenário. Segundo estudo da Confederação Nacional do Transporte (CNT), mais de 65 % do transporte de cargas e mais de 90 % dos deslocamentos de passageiros se dão através de rodovias, sendo que a malha rodoviária brasileira é composta por 1.720.700 km, dentre os quais apenas 213.453 km (12,4 %) são pavimentadas (SEST & SEAT, 2018). A grande extensão de rodovias que necessitam ser implantadas, pavimentadas ou restauradas, revela a importância de se estudar soluções que permitam a redução do custo das obras rodoviárias e sua maior durabilidade e eficiência. Portanto, é imprescindível melhorar a qualidade das rodovias, para oferecer segurança a motoristas, passageiros e pedestres.

Um pavimento pode ser definido como uma estrutura formada por múltiplas camadas, capazes de suportar a ação do tráfego e do meio ambiente. Os pavimentos são afetados por fatores climáticos extremos presentes em determinadas regiões, como gelo e degelo, baixas e altas temperaturas, gradiente térmico e intensa radiação solar, no entanto, quase sempre o seu dimensionamento se limita a considerar os efeitos das cargas a ele impostas pelo tráfego.

As condições ambientais podem influenciar na construção e na vida útil das rodovias, pois elas interferem não só nas condições de execução como na temperatura e umidade de equilíbrio do solo e, por consequência, no próprio comportamento mecânico. A umidade de equilíbrio como indica a própria forma das curvas características solo-água, interfere diretamente na sucção matricial atuante no solo, no entanto, os efeitos da temperatura em si, ainda são pouco estudados, em especial nos solos tropicais.

Segundo Alkasawneh (2007) e Papafiannakis (2008), a variação da temperatura é causa da mudança do módulo de rigidez com a profundidade, que por sua vez influencia a resposta do pavimento e seu desempenho, resultando em alterações das características estruturais originais.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2022), o Brasil possui uma grande diversidade de solos em sua extensão continental, onde predominam os Latossolos, Argissolos e Neossolos, que no conjunto se distribuem em aproximadamente 70%

do território nacional. As classes Latossolos e Argissolos ocupam aproximadamente 58% da área do Brasil e são solos profundos, altamente intemperizados e ácidos.

Segundo Lopera (2016), nos solos tropicais tem maior intemperismo químico, devido a ação da água, produzindo reações de hidrólises, lixiviação, acumulação e fenômenos que alteram as propriedades e minerais dos solos, formando os solos lateríticos. Isto pode ocorrer tanto em solos residuais como em solos transportados.

O Brasil apresenta regiões com temperaturas em curtos intervalos de tempo abaixo de 0 °C, como em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, situação na qual o desempenho da estrutura de pavimento pode ser afetado pelas variações climáticas, que provocam no solo constituinte da estrutura do pavimento, contrações e expansões. Em outros países como é o caso do Peru, tal condição climática é ainda mais severa e duradoura o que amplia a possibilidade de dano à estrutura de pavimento. Quanto à submissão da estrutura de pavimento a temperaturas elevadas essa é uma situação frequente em países como o Brasil e a região de selva do Peru. Diante deste cenário, a pesquisa proposta destaca-se pela sua relevância para o entendimento do impacto das variações térmicas sobre as propriedades e comportamento em especial as de curto prazo.

Vários fatores podem influenciar no comportamento resiliente dos solos, dentre estes, vale citar a umidade, que pode variar em função das especificidades do projeto e de acordo com as condições ambientais a que os pavimentos estarão sujeitos no campo. Essa variação está associada, entre outros fatores: com a infiltração da água da chuva através de trincas eventualmente presentes no revestimento ou pelos acostamentos; a variação do nível do lençol freático e a transferência de umidade entre as camadas, devido às mudanças nas condições atmosféricas e ao fluxo capilar.

As variações climáticas sazonais podem acarretar alterações que comprometem o desempenho do pavimento, sendo importante verificar quais são os materiais que melhor resistem a tais variações.

O presente estudo volta-se para o uso dos solos tropicais em obras rodoviárias motivo pelo qual se trabalhou com solos compactados. Embora para a composição da estrutura de pavimento geralmente se use os solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, não raro

encontram-se em nível de subleito, principalmente nos cortes, solos de transição e solos pouco intemperizados, conhecidos como solos saprolíticos.

De modo a contemplar uma maior gama de solos passíveis de comporem uma estrutura de pavimento, incluindo-se o subleito, se trabalhará usando amostras que integram um perfil de intemperismo como um todo localizado no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

Tendo em vista que a mineralogia, textura e estrutura dos solos afetam as suas propriedades e comportamentos, optou-se por estudar seis solos oriundos de um mesmo perfil de intemperismo tropical típico do Distrito Federal, Brasil. Quatro solos lateríticos coletados a 1 m, 3 m, 5 m e 7 m de profundidade, um solo de transição para o solo saprolítico coletado à 9 m de profundidade e um solo saprolítico coletado na profundidade de 11 m.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

O estudo se justifica pelo fato de estruturas de pavimento construídas em certas regiões com materiais argilosos serem submetidas a condições climáticas seja quanto a baixas temperaturas como quanto a temperaturas elevadas e esse aspecto climático ainda não se encontra amplamente estudado. Outro aspecto relevante diz respeito às condições térmicas de estudo dos solos em laboratório distinta daquelas nas quais se executará a obra podendo impactar na própria execução.

As principais motivações para esse trabalho são as seguintes:

- Entender o impacto das variações climáticas em função da temperatura e umidade no desempenho estrutural de solos tropicais que integram a estrutura de pavimento;
- Contribuir para a melhoria de projetos e execução de estruturas de pavimento submetidas a condições climáticas diversas;
- Entender a influência da temperatura no comportamento mecânico de seis tipos de solos tropicais.

## **1.2 HIPÓTESE DA TESE**

As hipóteses são as seguintes:

- As diferenças de temperatura entre laboratório e campo podem interferir na qualidade da execução e no controle tecnológico da obra.
- As variações climáticas podem ter influência ou impacto favorável ou desfavorável no desempenho estrutural de solos tropicais que integram a estrutura de pavimento.
- A variação de temperatura tem influência na estrutura e nas curvas características de solos tropicais compactados que integram um pavimento.
- O valor de módulo resiliente de um solo é afetado pelas condições climáticas, ou seja, quando se tem variação de umidade e temperatura.

## **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar, entender e definir a influência da temperatura no comportamento mecânico de solos que passaram por diferentes níveis de intemperização indo dos solos pouco intemperizados aos solos profundamente intemperizados em condições climáticas tropicais.

### **1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcançar o objetivo principal, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar como os fatores climáticos (temperatura e umidade), influenciam na curva característica dos solos.
- Estudar o comportamento dos solos em estado não saturado e compactado submetidos a variações de sucção e temperatura.
- Verificar quais são os materiais mais sensíveis às variações térmicas.

## 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em cinco capítulos, descritos sucintamente a seguir:

- Capítulo 1: Apresenta uma introdução ao trabalho abordando a temática estudada, as motivações e os objetivos do estudo;
- Capítulo 2: Faz-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados na pesquisa: solos tropicais, solos não saturados, solos compactados, sucção e curva característica, ensaios dinâmicos, clima de Brasília e do Peru, projetos de pavimentos com variações climáticas no mundo.
- Capítulo 3: Aqui se apresenta a localização do ponto de amostragem realizado no campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e as principais características dos solos. São detalhados métodos e o planejamento da pesquisa e procedimentos de ensaios.
- Capítulo 4: Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física, químico-mineralógica e mecânica dos materiais empregados, as curvas de retenção de água obtidas pela técnica do papel filtro, imagens de microscopia eletrônica de varredura (*SEM*), resistência à tração por compressão diametral, módulo resiliente e suas respectivas análises.
- Capítulo 5: São apresentadas as principais conclusões obtidas das avaliações e análises de resultados realizadas nesta pesquisa, assim como também algumas sugestões para estudos futuros.
- Referências Bibliográficas
- Anexos: Nos anexos são apresentados resultados complementares relevantes oriundos da pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais conceitos dos solos tropicais, solos não saturados, da curva de retenção de água dos solos, resistência a tração dos solos, comportamento dos solos compactados e ensaios dinâmicos.

### 2.1 SOLOS TROPICAIS

No âmbito da engenharia rodoviária, considera-se solo todo tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra.

Segundo Villibor *et al.* (2007), os solos são materiais não consolidados, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos de fácil dispersão em água e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplenagem. O solo ainda terá estrutura artificial quando transportado e/ou compactado mecanicamente, como em aterros, barragens de terra, reforços do subleito de pavimentos etc.

Solos tropicais são solos que apresentam peculiaridades de comportamento e propriedades, relativamente aos solos não tropicais, devido a atuar sobre eles processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Então a esses solos, é necessário aplicar técnicas adequadas a fim de caracterizá-los e classificá-los, conforme as condições ambientais em que estão inseridos. Encontram-se os seguintes solos nas regiões tropicais: lateríticos, saprolíticos e transportados. Um perfil esquemático da ocorrência desses solos pode ser visto na Figura 2.1:

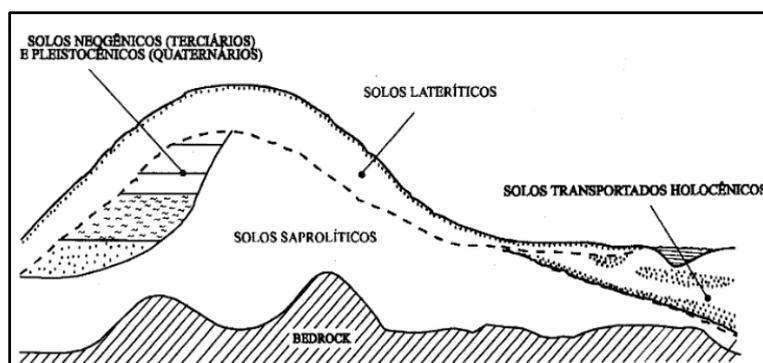


Figura 2.1 – Perfil esquemático de ocorrência de solos em ambiente tropical

(Villibor *et al.*, 2007)

Medrado (2009) afirma que para se caracterizar um solo como tropical não basta que o solo tenha sido formado na faixa geográfica tropical ou em região de clima tropical úmido, mas é indispensável que apresente peculiaridades específicas de interesse geotécnico. As características do horizonte superficial variam consideravelmente de acordo com o grupo pedológico a que pertence. O quartzo é encontrado com muita frequência e de maneira predominante nas frações areia e pedregulho desses solos.

Segundo Camapum de Carvalho (2015), os solos de Brasília são tropicais e apresentam características geotécnicas diferentes aos solos temperados, que são classificados com base em propriedades físicas, tais como cor, textura e plasticidade. Essas classificações são insuficientes para conhecer o comportamento hidráulico e mecânico dos solos tropicais, requerendo análises sobre a estrutura e a composição químico-mineralógica.

Os perfis de intemperismo tropical são geralmente compostos sequencialmente partido do estrato rochoso, por três tipos de solo: o pouco intemperizado, para o qual as propriedades e comportamentos tendem a guardar relação com a sua origem; o profundamente intemperizado, cujas propriedades e comportamentos já não tem elo direto com a sua origem, ou seja, as alterações químico-mineralógicas e estruturais desse solo romperam esse vínculo; o solo de transição entre estes dois horizontes, no qual existem porções pouco intemperizadas e porções profundamente intemperizadas tornando-o com propriedades e comportamentos mais heterogêneos.

Segundo os autores Cardoso (2002), Camapum de Carvalho et. al., 2015 e Pérez (2017) divide o manto de intemperismo tropical em solo laterítico, transição (zona mosqueada), solo saprolítico, saprolito, rocha alterada e rocha sã. O solo laterítico pode ter origem residual ou transportada, mas o que efetivamente marca as suas propriedades e seu comportamento é o nível de intemperismo pelo qual passou o perfil. Em um manto de intemperismo, um centímetro de solo não é jamais exatamente igual ao seguinte, apesar de apresentar a mesma cor e aparentar a mesma textura (Camapum, 2017).

Os diferentes níveis de alterações físico-químicas, mineralógicas e estruturais pelos quais passam os perfis de solo permitem associar a posição do solo no perfil com as propriedades e comportamento esperados.

Em uma escala global, o intemperismo químico prevalece e é mais efetivo na alteração das rochas do que a desintegração mecânica sendo ele mais pronunciado em algumas regiões do planeta. A ação química é especialmente eficaz na presença de água (devido à sua reatividade) e a alta temperatura (que acelera as taxas de reação química) e por consequência, torna-se mais intenso e efetivo em regiões tropicais onde predominam essas duas condições.

Segundo Morandini (2014), os solos tropicais são solos formados sob um conjunto de processos intempéricos e pedogenéticos específicos denominados laterização e são característicos de zonas tropicais úmidas, onde se encontra grande parte do território brasileiro.

No processo de intemperização o clima exerce, portanto, grande influência, especialmente a umidade relativa, a precipitação e a temperatura. No caso de mecanismos físicos de alteração, a temperatura é um dos fatores mais importantes por meio dos mecanismos de contração, expansão e esforços distorcionais. Se um material está exposto a clima com grandes amplitudes de variação térmica, certamente sofrerá maiores e mais ciclos de expansão e contração volumétrica. Logo, esse material também é mais suscetível ao intemperismo (Huat e Toll, 2013).

Segundo Balbo (2007), a laterização dos solos tropicais resulta na presença significativa de minerais caulíníticos, óxidos e hidratados de ferro ou de alumínio em suas frações finas, culminando em estruturas bem agregadas entre partículas estáveis, porosas e permeáveis, tanto em solos argilosos como em solos arenosos. Desta forma os solos tropicais lateríticos possuem porosidade típica e resistência mecânica muito maior aos solos convencionais.

Isto pode-se verificar na Tabela 2.1 onde são comumente empregados os solos tropicais nas rodovias brasileiras.

Tabela 2.1 – Propriedades solos tropicais (Balbo, 2007)

PROPRIEDADE	SOLOS LATERÍTICOS	SOLOS SAPROLÍTICOS
Contração	Elevada (argilas) Baixa (areias)	Média e elevada
Expansão	Baixa	Baixa a elevada
Suporte a seco	Elevado a muito elevado	Médio a elevado
Permeabilidade	Baixa (argilas)	Baixa a média
	Elevada (areias)	

Sendo as condições climáticas definidoras do intemperismo em regiões tropicais o manto de intemperismo pode ter origem residual ou sedimentar. Em ambos os casos a espessura do manto de solo intemperizado e o nível de intemperização da rocha em regiões tropicais é função de fatores como rocha de origem, clima e microclima e das condições de drenagem. Sendo assim, ele pode se fazer ausente ou variar de alguns centímetros a dezenas de metros. Também os processos erosivos e os movimentos de massa vão interferir em sua espessura. A Figura 2.2 mostra a Carta climática de América do Sul, apresenta as particularidades climáticas intervindo na formação destes solos (Köppen, 2007).

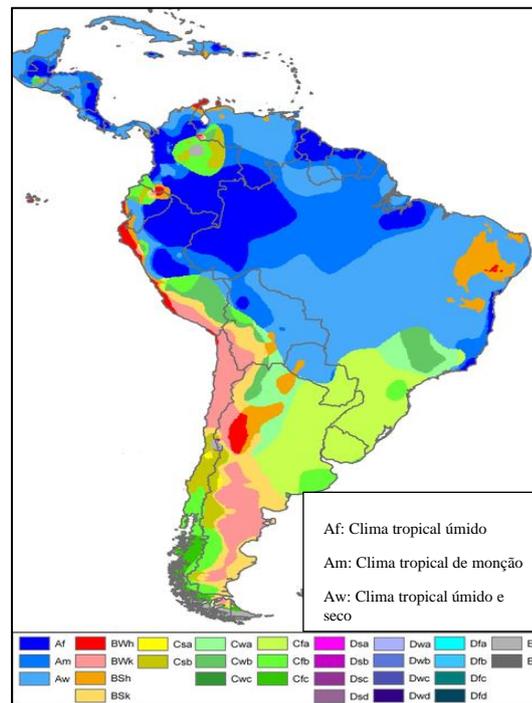


Figura 2.2 – Carta climática de América do Sul (Köppen, 2007). Fonte: Peel, M. C., Finlayson, B. L., and Mc Mahon, T. A.

Nas regiões tropicais, a temperatura pode variar em mais de 10°C em um só dia e as precipitações médias anuais variam ao redor de 2000 mm, ou seja, tem muita água para produzir reações químicas. A temperatura e água são fatores importantes no intemperismo e estão presentes nos climas tropicais (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015a).

Guimarães (2002) estudou a distribuição dos principais minerais ao longo da profundidade de um perfil de intemperismo no campo experimental da UnB. Pode-se concluir que enquanto o teor de caolinita aumenta com a profundidade o teor de gibbsita diminui até se

tornar nulo a 9 m de profundidade. Também mostrou que tanto o teor de gibbsita+caolinita+ilita como teor de hematita+goethita são praticamente constantes com a profundidade, o que caracteriza um perfil típico de alteração de regiões tropicais, ou seja a gibbsita provem da alteração da caolinita e esta da alteração da ilita enquanto a goethita não passa de uma forma hidratada da hematita.

O comportamento dos solos tropicais, no que se refere a infiltração, e influenciado pela estrutura dos macros e microporos, pelo grau de saturação inicial e pela sucção correspondente. Ainda que os solos não saturados apresentem uma descontinuidade da fase de ar, em um primeiro momento, o processo de infiltração pode ser impedido por causa da presença do ar nos poros e da pressão que este exerce (Gitirana Jr., 2005).

Nos solos finos, particularmente os solos argilosos, o mecanismo de junção entre as partículas em grande parte se deve às forças de adsorção. Embora o termo geralmente adotado seja sucção mátrica, a distinção é importante, pois enquanto na capilaridade predomina o aspecto físico, tamanho e distribuição dos poros, na sucção propriamente dita se inclui o aspecto químico-mineralógico e a porosidade (Silva, 2016).

Segundo Lopera (2016), as propriedades e comportamento dos solos tropicais estão quase sempre associados à microestrutura desenvolvida no processo de formação. Nas obras de engenharia e em especial nas geotécnicas, o comportamento dos materiais empregados é geralmente estudado considerando-se suas características macroscópicas e pouco estudada no aspecto microestrutural desses materiais e sua composição químico – mineralógica. Entretanto, além de analisar a macroestrutura, compreender a microestrutura do solo é relevante para definir suas propriedades e comportamento.

Dada a importância das dimensões dos poros no comportamento de retenção de água pelos solos cabe destacar que Klein e Libardi (2002) consideram como macroporos, os poros de diâmetro ( $\emptyset$ ) maior que 0,05 mm e como microporos, poros com  $\emptyset$  menor que 0,05 mm. Marcelo *et al.*, (2016) fazem uma maior compartimentação do tamanho dos poros macroporos, poros com  $\emptyset$  maior que 0,3 mm; mesoporos, poros com  $\emptyset$  entre 0,3 e 0,05 mm; microporos, poros com  $\emptyset$  entre 0,05 e 0,0002 mm e criptoporos, poros com  $\emptyset$  menor que 0,0002 mm.

A temperatura é um fator que pode afetar o comportamento expansivo em uma porção de solo, sendo limitada aos efeitos sobre a viscosidade e gravidade específica da água adsorvida. O aumento da temperatura tende a comprimir a água da dupla camada. No entanto, baixas temperaturas resultam na expansão da dupla camada. O ponto mais importante é a influência da temperatura na movimentação da umidade, tanto em forma de líquido como vapor, como resultado dos gradientes térmico no interior da massa de solo. O vapor de água a uma temperatura mais elevada é capaz de migrar para uma região mais fria em um esforço a fim de balancear a energia térmica do sistema. A movimentação da umidade por um gradiente térmico ocorre como um filme termo osmótico análogo ao fluxo electro osmótico (Souza, 2014).

Cardoso *et al.* (2012) realizou um estudo em escala micrométrica do comportamento volumétrico de solos argilosos compactados no qual foi avaliado o efeito da compactação levando em consideração a variação de energia e teores de umidade. Foi constatado que a variação do teor de umidade influencia na interação entre as cargas elétricas da água e dos minerais argilosos do solo. Do mesmo modo, diferentes estruturas do solo são resultantes da quantidade de água adicionada ao material para o processo de compactação. Foi verificado que a amostra em seu estado mais úmido apresenta vazios de menores dimensões em relação às amostras compactadas mais secas.

### **2.1.1 SOLOS LATERÍTICOS**

Segundo Nogami *et al.* (1985) e Marangon (2004) solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvidos sob atuação de clima tropical úmido. Possuem sua fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio o que confere a estrutura poros e agregações altamente estáveis. Estes solos têm tendência a possuírem uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro e em alguns locais podem apresentar, inseridos consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos e que tem sido muito aproveitada como materiais de construção rodoviária.

De acordo com Nogami e Villibor (1995), por meio de análises de ensaios de microscopia eletrônica, concluíram que a parcela fina dos solos lateríticos é agregada, formando uma massa de aspecto esponjoso, o que provoca a formação de solos altamente porosos com alta permeabilidade e de comportamento colapsível.

Na Figura 2.3 apresenta a ocorrência de solos lateríticos e saprolíticos no território brasileiro (Nogami *et al.*, 2000).

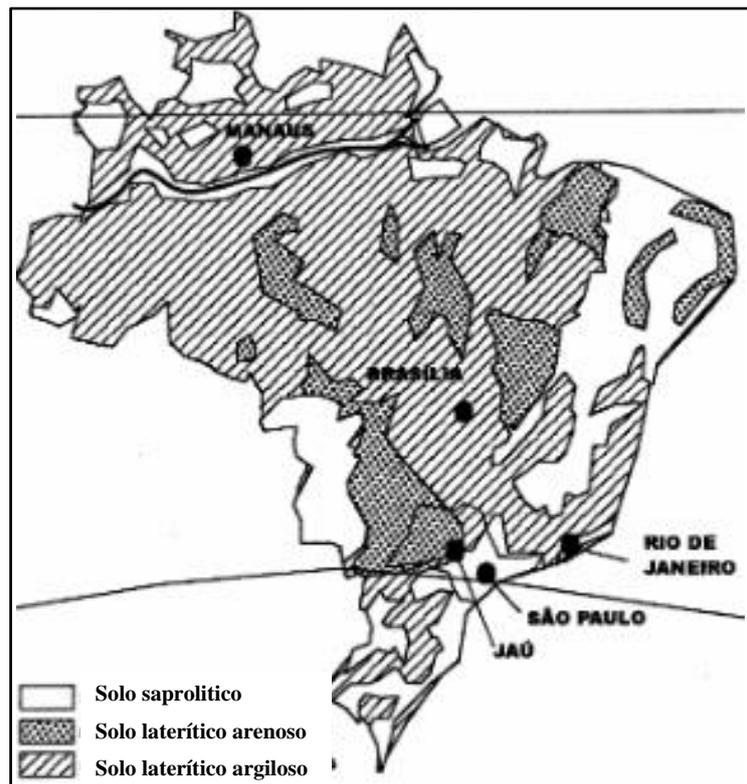


Figura 2.3 – Ocorrência de solos lateríticos e saprolíticos no território brasileiro (Nogami *et al.*, 2000)

Camapum de Carvalho *et al.* (2009) verificaram que a massa específica dos grãos, principalmente dos solos lateríticos, pode variar de maneira significativa em função da granulometria considerada, destacando o fato de a fração grossa ser constituída por concreções resultantes da cimentação por óxido e hidróxido de ferro e/ou alumínio, o que propicia uma significativa variação da massa específica dos grãos em relação a da matriz mais fina do solo.

Os principais minerais constituintes dos solos lateríticos

Latifi *et al.* (2015), ao verificar o comportamento de um solo laterítico mediante estabilização química, aponta a caulinita, um argilo-mineral de alumínio hidratado, com o principal mineral presente ( $2\theta=12.5^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 38^\circ, 46^\circ$  e  $55^\circ$ ). A presença de gibbsita (hidróxido de alumínio) é apontada nos ângulos  $2\theta=18.5^\circ, 20^\circ$  e  $38^\circ$ . Os autores relatam a existência de quartzo ( $2\theta=27^\circ, 36.5^\circ, 42.5^\circ$  e  $50^\circ$ ), e goethita ( $2\theta=21.5^\circ, 36.5^\circ, 41^\circ$  e  $53^\circ$ ).

Lovato (2004) identifica nos seus estudos em um solo similar um pico de quartzo com posição  $2\theta=26.5^\circ$ . O material analisado indica também a presença de hematita com distância interplanar de 2.70 Å e ângulo  $2\theta=33^\circ$ .

Outros autores que estudaram a mineralogia de solos lateríticos e apresentam em suas análises similaridades ao que se trata dos componentes presentes em seus materiais são Medeiros (2017) e Ferreira (2019).

Os solos lateríticos são quase sempre formados por associação de argilominerais 1:1 com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, sendo geralmente não expansivos. Solos lateríticos em processo de formação têm os primeiros metros bastante lixiviados e as partículas em grande parte encontram-se em estado agregado, o que geralmente os conduz a um estado poroso.

Uma característica fundamental da plasticidade em solos lateríticos é a mudança irreversível na desidratação. Solos que contêm hidróxidos de ferro e alumínio podem se tornar menos plásticos, exibir valores dos limites de Atterberg mais baixos sob secagem. Isto é em parte devido a à desidratação dos hidróxidos que cria uma ligação mais forte entre as partículas e resiste à penetração pela água. O processo não pode ser revertido pela re-umidificação. O efeito é observado durante a secagem ao ar, mas é mais evidente na secagem em estufa à alta temperatura (Camapum de Carvalho *et al.*, 1985).

Da mesma forma que nos solos lateríticos, os saprolitos e solos saprolíticos têm características que permitem inferir suas propriedades. Isso é possível porque esses solos guardam as estruturas da rocha e porque, dentre os minerais que os compõem estão argilominerais do tipo 2:1 ou 2:1:1 sendo alguns deles expansivos. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), os aspectos físicos destes solos são muito dependentes da rocha de origem e do tipo de intemperismo que esta sofreu.

A partir das características destes tipos de solo, é de interesse particular o entendimento dos solos de comportamento laterítico como material de construção da estrutura de pavimento em rodovias de baixo custo. Faz-se necessário destacar, no entanto, a presença com certa frequência dos solos saprolíticos no subleito rodoviário, em áreas de corte (Ayala, 2020).

### **2.1.2 SOLOS SAPROLÍTICOS**

Constituem a parte subjacente à camada de solo superficial laterítico aparecendo somente na superfície do terreno através de obras executadas pelo homem ou erosões. São mais heterogêneos e constituídos por uma mineralogia complexa, contendo frequentemente minerais ainda em fase de decomposição. São designados também solos residuais jovens, em contraste com os solos superficiais lateríticos que seriam maduros.

Segundo Conciani *et al.* (2015), os solos saprolíticos tem uma evolução recente, ou seja, a alteração da rocha promoveu a criação de um material pulverulento, inconsolidado. Esse material ainda conserva a estrutura da rocha, porém, com baixa coesão. A exposição desse material ocorre em regiões tropicais onde o regime de chuvas é intenso, promovendo a erosão de modo mais rápido que a alteração. Alguns solos podem continuar a evoluir para solos residuais jovens e até maduros. Os solos saprolíticos ou residuais jovens são incluídos pela pedologia como neossolos.

Da mesma forma que nos solos lateríticos, os saprolitos e solos saprolíticos têm algumas características que permitem inferir suas propriedades. Isso é possível porque esses solos guardam as estruturas da rocha e porque, dentre os minerais que os compõem, estão muitos argilominerais primários, do tipo 2:1 ou 3:1.

Uma propriedade frequentemente observada nos solos saprolíticos é a expansão. Os argilominerais primários presentes nesses solos têm um alto potencial de expansão. De outro lado, ao serem expostos às intempéries, esses solos podem liberar as pressões que continham as suas partículas. Essa pressão é suficiente para gerar tensões de expansão no solo.

A erodibilidade é um fator importante nos solos saprolíticos. Os mesmos argilominerais que geram a expansão servem, também, para facilitar o destacamento das partículas. O processo é mais intenso se os solos são expostos à chuva. Nesse caso, a água atua como agente que promove o destacamento e o transporte das partículas. É comum que taludes rodoviários exibam

uma capa dura mais próxima ao topo que resista à erosão. Contudo, logo abaixo dessa capa, ocorrem solos residuais jovens e saprolitos, que são erodíveis e mostram profundas escavações pela ação de chuvas e ventos.

O perfil de resistência a penetração dos solos (NSPT) saprolíticos pode ser bastante variável. Isso se deve ao fato de que o intemperismo ocorre de forma variada, sendo mais intenso onde ocorrem os fluxos preferenciais de água. Assim, formam-se regiões onde o solo está muito alterado e regiões onde o solo está pouco alterado. Isso se reflete diretamente no comportamento do solo. Esse comportamento errático foi elucidado por Futai *et al.* (1998).

Os solos saprolitos são muito susceptíveis a corridas de lama e deslizamentos. Muitos solos saprolíticos são oriundos de rochas lamelares como os xistos, filitos, ardósias, etc. Ao sofrerem alteração, as estruturas se mantêm, mas a coesão se acaba. Logo, formam-se planos preferenciais de deslizamento. Outra situação comum é em encostas, quando se formam superfícies de diferentes permeabilidades e resistências. Nesse caso, ao ocorrerem chuvas intensas, a água se acumula nessas superfícies, promove a sua saturação, perda de resistência e, em seguida, a corrida de lama.

Cardoso *et al.* (1995) mostram a análise de um solo saprolítico colapsível, coletado sob os taludes do Metrô de Brasília. A descrição micromorfológica mostrou que uma parte expressiva das frações argilosas se encontravam sob a forma de agregados, e o índice de vazios era de 1,0, ou seja, elevado para um material com esta gênese. De modo semelhante a argila porosa, o solo saprolítico possui uma quantidade importante de gibbsita e Al em estado amorfo.

## **2.2 SOLOS NÃO SATURADOS**

O comportamento do solo na condição não saturada exige a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações, as quais o solo pode estar sujeito. Essas situações podem ser de ordem mecânica ou ambiental. A água pode mover-se para dentro ou para fora do solo, por alteração no estado de tensão externo e/ou por questões ambientais, tais como infiltração e/ou evaporação ou ainda simplesmente apresentar variações volumétricas em consequência de variações térmicas. A condição não saturada predomina nos solos de regiões tropicais, com os quais ou sobre os quais são construídas as obras de engenharia. Isso amplia

regionalmente a importância do entendimento do comportamento hidráulico e mecânico do solo nesta condição (Camapum de Carvalho *et al.* 2009).

Diversos fatores podem vir a influenciar a curva de retenção de água também conhecida como curva característica ou curva característica de retenção de água. Entre eles pode-se citar: a composição granulométrica, a mineralogia, a química do meio e do próprio solo, a estrutura e a temperatura. Além destes fatores merece destaque a história de tensões a que o solo foi submetido, incluindo tanto as variações de tensões efetivas, bem como as trajetórias de secagem e molhagem do próprio solo, aumentando e reduzindo a sucção, respectivamente (Queiroz, 2015).

Para Delgado 2007 e Bento 2017, os efeitos da variação no grau de saturação poderiam ser melhores estudados dividindo os intervalos do grau de saturação em conjunto de cinco elementos. São eles:

a) Extremadamente seco ( $S_r < 5\%$ ):

A fase ar é contínua através da massa de solo e alguma água está em forma altamente viscosa adsorvida firmemente ao esqueleto sólido. Como os vazios de ar estão interconectados, apenas ar será expelido com o adensamento do solo e, como o grau de saturação é muito pequeno, o valor da tensão efetiva,  $\sigma'$ , pode ser tomado como igual a tensão aplicada menos a pressão do ar ( $\sigma - u_a$ ). Todavia, a pressão do ar é geralmente a pressão atmosférica e, neste caso, pode ser suposta como zero, fazendo  $\sigma' = \sigma$ .

b) Na condição seca (ramo seco –  $S_r$  de 5% a 90%):

Quanto mais água é acrescentada a um solo, mais o comportamento do solo torna-se afetado pela água livre que pela água adsorvida, numa transição gradual. Com o adensamento, embora o ar seja expulso, o valor de  $u_w$  raramente ficará positivo e o valor de sucção ( $u_a - u_w$ ) ainda é suficientemente alto, assegurando que pouca água flua através do solo.

c) Na condição ótima ( $S_r = 90\%$ ):

Para este valor, que é um estágio de transição para a saturação completa, o valor da sucção cai para  $u_w$ . Se isso acontece, apenas a água pode drenar do solo.

Da condição úmida em relação a ótima ( $90\% < S_r < 95\%$ ):

O ar já não pode existir num estado livre, mas pode estar ocluso, isto é, ocorrer na forma de bolhas isoladas. Não existe meio de medir  $u_a$  e o ar remanescente está preso ao esqueleto, sendo incapaz de ser removido pelo fluxo de água. Todavia, se algum ar permanecer no solo na forma de bolhas, estas podem tornar o fluido do poro altamente compressível, apesar de terem pouco efeito sobre o valor de  $u_w$ .

d) Na condição saturada ( $S_r > 95\%$ ):

Para solos argilosos com grau de saturação relativamente alto, o ar neste solo está ocluso. Pode-se, então, supor que este ar tem pouco efeito sobre a poropressão de água. Nesses casos, o solo não saturado tende a se comportar como se fosse saturado e a tensão efetiva pode ser assumida como igual a  $\sigma - u_w$ .

### 2.2.1 SUCCÃO COM TEMPERATURA

Nos solos finos, particularmente os solos argilosos, o mecanismo de junção entre as partículas se deve à energia adsorvida. Embora o termo geralmente adotado seja a sucção, a distinção é importante, pois enquanto na capilaridade predomina o aspecto físico (tamanho dos poros), na sucção predomina o aspecto químico-mineralógico (Albaniza, 2016).

A sucção varia inversamente com a quantidade de água presente no solo, ou seja, embora outras forças continuem a atuar entre as partículas a sucção tende a zero quando o solo atinge o estado de total saturação ( $S_r = 100\%$ ), e um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero. A relação entre a quantidade de água contida no solo e a sucção nele atuante é como já indicado definida como curva característica do solo como será tratada no presente texto. Quando a sucção é quantificada em função da umidade relativa, determina-se a chamada sucção total. Os seus componentes, conforme geralmente indicado (Camapum de Carvalho, 2015), são a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção matricial embora definida como oriunda da capilaridade quase sempre também envolve nos valores determinados experimentalmente as forças de atração e repulsão atuantes interpartículas. Já a componente osmótica está relacionada à concentração química da água adsorvida.

Para Núñez *et al.* (1996), a sucção matricial é a diferença entre a pressão na fase ar e a pressão na fase água ( $u_a - u_w$ ), sendo originada pelos fenômenos de tensão superficial. Faz-se

necessário, no entanto, entender que a pressão na fase água pode ser de natureza puramente capilar ou ser também proveniente da energia de retenção atuante entre as partículas de argila, portanto, ter natureza não só física (capilaridade), mas também eletromagnética devido as forças de adsorção. A sucção mátrica ( $S_m$ ) pode então ser entendida como o somatório da sucção capilar ( $S_c$ ) com a sucção de adsorção ( $S_{ad}$ ) (Equação 2.1). Em materiais pouco ativos como as areias quartzosas praticamente só atua  $S_c$  e nas argilas  $S_{ad}$  assume relevante importância.

$$S_m = S_c + S_{ad} \quad (2.1)$$

A sucção osmótica ( $S_{om}$ ) por sua vez, encontra-se associada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos no solo. A sucção total ( $S_t$ ) é então dada pela Equação 2.2.

$$S_t = S_m + S_{om} \quad (2.2)$$

Existem muitos procedimentos para se medir a sucção em laboratório e em campo. A técnica que será usada no presente estudo é a do papel filtro. Outras técnicas mais comuns para a determinação da curva de retenção são: a placa de sucção, a placa de pressão e o método do equilíbrio de vapor, encontram-se detalhadas no capítulo de livro de Gitirana *et al.* (2015).

Segundo Lima (2018), uma das razões que poderiam estar levando à significativa influência da temperatura na sucção atuante no solo seria o impacto da temperatura na densidade e viscosidade da água sendo a influência da densidade de mais fácil verificação.

O aumento da densidade da água resulta na aproximação das moléculas de água das partículas de argila aumentando a sucção. O aumento da densidade da água poderia ainda propiciar uma diminuição dos raios dos meniscos capilares presentes no solo o que também geraria aumento de sucção.

Para avaliação da influência da temperatura por meio da alteração da densidade da água nas curvas características estas foram determinadas em função das umidades volumétricas dos corpos de provas e do papel filtro. As Figuras 2.4a, 2.4b, 2.5a e 2.5b apresentam os resultados obtidos respectivamente para as profundidades de 2 m e 9 m, com e sem a correção das umidades volumétricas dos corpos de prova e dos papéis filtro em função das alterações da densidade da água com a temperatura. Essas figuras mostram que a correção das curvas em função do efeito da temperatura na densidade da água conduz apenas a pequenas variações na

sucção gerando assim um deslocamento das curvas características quase que imperceptível o que coloca em evidência a necessidade de se estudar a influência da temperatura sobre as propriedades da água e na interação água-argila.

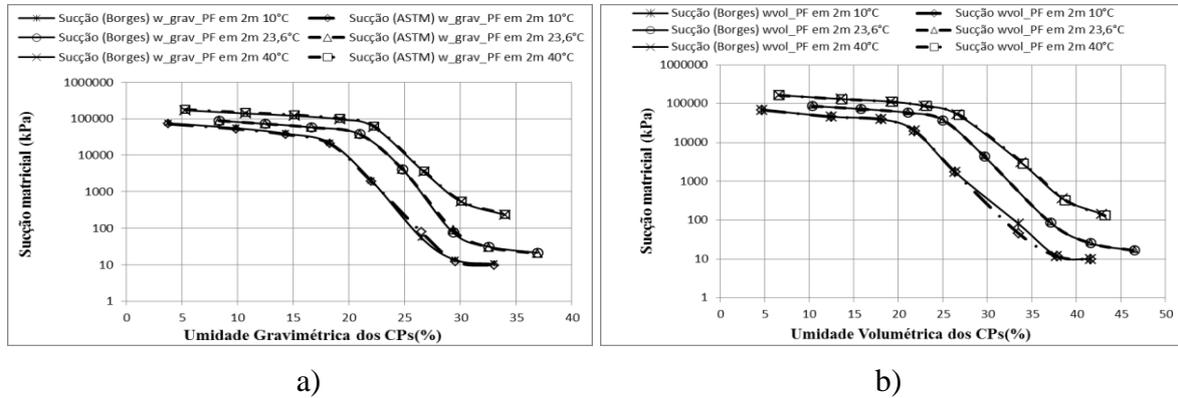


Figura 2.4 – Amostra oriunda de 2 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.

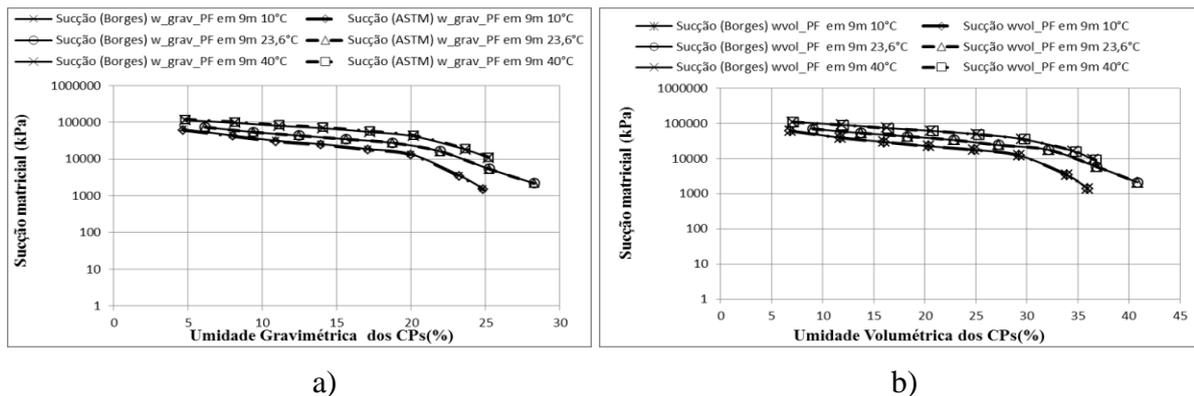


Figura 2.5 – Amostra oriunda de 9 m de profundidade: (a) Influência da temperatura na sucção em função da umidade gravimétrica dos corpos de prova; (b) Influência da temperatura na sucção em função da umidade volumétrica dos corpos de prova.

Yang *et al.* (2016), estudaram os efeitos combinados da temperatura e do teor de umidade na sucção de dois solos argilosos, os quais foram estaticamente compactados com umidades que variaram entre 5% e 20%, de modo a poder ser avaliado um amplo espectro de condições de compactação. Os autores adotaram o método do papel filtro e o psicrômetro para medir a sucção do solo, incluindo a sucção matricial e a total e temperaturas que variaram entre 10 e 60°C. Verificou-se que as sucções dos dois solos expansivos variam com os parâmetros de compactação tais como o teor de umidade ótimo e a energia de compactação, sendo também

influenciadas pela temperatura. Foi verificado que à medida que o teor de umidade aumenta, os efeitos do esforço de compactação e da temperatura na sucção tornam-se menos significativos. Os resultados dos ensaios confirmam que tanto a sucção total como a sucção matricial são significativamente influenciadas por alterações no teor de umidade tanto no caso da bentonite BH como no caso da argila Zhisin. Além disso, a sucção na bentonite BH é superior à atuante na argila de Zhisin, e a taxa de mudança na sucção com aumento do teor de umidade é mais baixa para a bentonite BH do que para a argila de Zhisin, indicando que a bentonite BH tem uma melhor capacidade de retenção de água do que a argila de Zhisin. Cabe aqui uma observação, conforme destacado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) quando se analisa o comportamento dos solos expansivo como é caso das bentonitas, faz-se necessário tratar os resultados em termos de umidade efetiva e não umidade global como geralmente ocorre.

A temperatura pode ter grande influência na curva característica do solo, uma vez que a intensidade das forças que retém a água é dependente da temperatura. A tensão superficial diminui quando aumenta a temperatura, o que produz uma redução no teor de água a um dado potencial. A temperatura também é importante para a medição dos valores de sucção. Por isso sempre se recomenda que os ensaios sejam feitos em ambientes com temperatura controlada.

Hopmans e Dane (1986) verificaram que ocorre variação nas curvas características de sucção com a temperatura, concluindo que os efeitos combinados das variações de volume de ar ocluso e da tensão superficial com a temperatura podem minimizar a variação com a temperatura.

Os efeitos da temperatura na determinação da sucção são estudados também por Campos *et al.* (1992), Marinho *et al.* (1994), Bachmann *et al.* (2002) e Lima *et al.* (2018).

Romero *et al.* (2001) estudaram os efeitos da temperatura no comportamento hidráulico de uma argila não saturada. Os ensaios foram realizados em células edométricas com à temperatura e sucção controladas com aplicação de altas temperaturas. Curvas características a diferentes temperaturas mostraram que a sucção total apresentou uma redução com acréscimo de temperatura a umidade constante. A temperatura também influenciou a permeabilidade, sendo a influência mais relevante para elevados graus de saturação. Para graus de saturação inferiores a 75% deixou-se de notar o efeito da temperatura. Qualquer mudança no volume de

um corpo de prova devido à temperatura induz a uma mudança nas forças entre partículas, sendo necessário uma reorientação ou um movimento relativo dos grãos de solo.

Na Figura 2.6 estão representados modelos de comportamento das curvas características, segundo o tipo e a estrutura do solo.

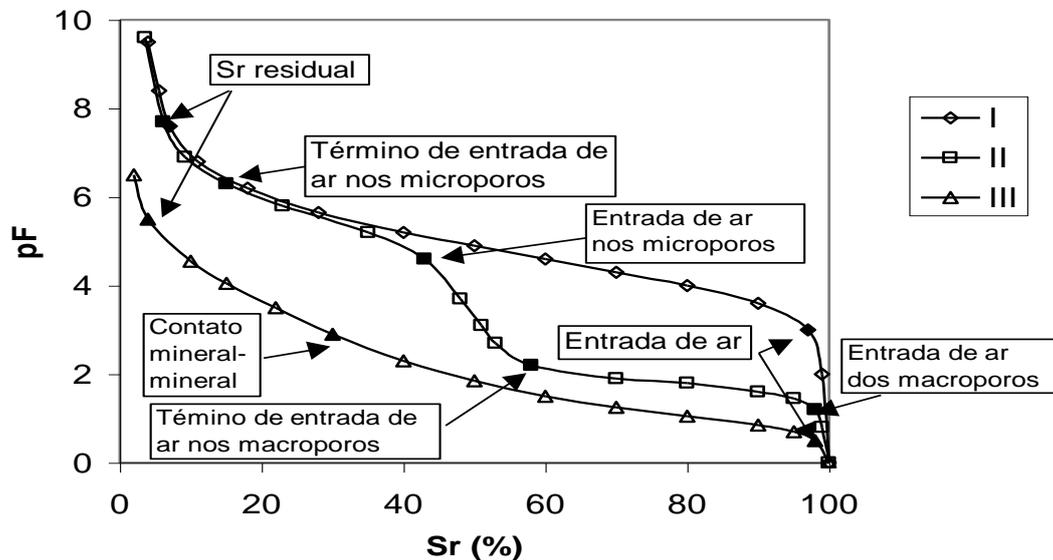


Figura 2.6 – Modelo de Curva Característica (Camapum de Carvalho *et al.*, 2009)

Percebe-se que a curva I é característica de solos pouco intemperizados.

Curva II representa a curva característica bimodal comum nos solos tropicais profundamente intemperizados. Nos solos profundamente intemperizados compactados as curvas características tendem a caminhar para a forma característica dos solos pouco intemperizados na medida em que se amplia a energia de compactação.

A curva III representa o comportamento de materiais que fluem ou que apresentam variação de volume no próprio mineral, como é o caso, respectivamente das misturas solo-emulsão e dos solos expansivos (Camapum de Carvalho *et al.*, 2009). As curvas características podem ser afetadas por fatores, como: propriedades químicas e mineralógicas, o índice de vazios e a distribuição de poros.

Para Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), a distribuição de poros bem graduados conduzem a variações gradativas de sucção com teor de umidade. Já a distribuição de poros

mais uniforme geralmente conduz a curvas mais horizontalizadas. Nos solos tropicais, entretanto, as curvas características fogem a estes formatos gerais e isso também se dá devido a distribuição de poros que é nestes solos marcada pela presença de macro e microporos que originam modelos de curvas características do tipo bimodal.

Assim, a maioria dos autores apresenta a curva característica com os valores de unidade de pressão em função do teor de umidade gravimétrica ou volumétrica ou grau de saturação. Para Bento (2006), o conhecimento da curva característica de um solo é de fundamental importância para as obras e projetos de engenharia, permitindo prever seu comportamento com a variação de umidade, expansão e demais parâmetros, uma vez que estes influenciam diretamente na sucção mátrica.

Para Delgado (2007) as curvas características podem ser afetadas por vários fatores, como: as propriedades químicas e mineralógicas, o índice de vazios e a distribuição de poros. No entanto, diferenças nas propriedades químicas e mineralógicas diferenciam apenas curvas características transformadas ou não, de dois solos distintos, não interferindo em relação ao mesmo solo. Em se tratando da distribuição de poros e do índice de vazios, por refletirem o estado do solo, o comportamento é inverso. Embora a curva característica transformada independa do índice de vazios, ela não contempla diferenças na distribuição de poros. É importante ressaltar que, o fato do  $e.pF$  variar com as distribuição de poros, não inválida a sua aplicação prática, pois em campo, trabalha-se com faixas específicas de umidade e peso específico, o que permite, na maioria dos casos, limitar o número de curvas características transformadas representativas para cada obra ou uma ou no máximo duas. Baseando-se no mesmo princípio utilizado no desenvolvimento do modelo de transformação da curva característica, pode-se analisar o comportamento mecânico de um solo considerando conjuntamente os parâmetros como índice de vazios e sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) ou ( $pF$ ).

A sucção do solo descreve o potencial com que um determinado solo adsorve e retém água nos poros, a um determinado teor de umidade. A curva característica solo – água descreve a relação entre a sucção atuante no solo e o conteúdo de umidade. Como os solos que compõem os perfis de intemperismo tropical apresentam quando profundamente intemperizados agregações em sua composição e podem apresentar argilominerais expansivos quando pouco intemperizados (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021), cabe destacar que no caso das

agregações parte da umidade do solo se encontra em seus poros e compoendo a umidade global do solo, mas quase sempre não contribuindo para o seu comportamento hidromecânico. Já nos solos pouco intemperizados, quando presentes argilominerais expansivos, a água que os hidrata deve ser excluída da umidade global do solo, assim como, ela não integra o seu volume de vazios (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021).

As curvas características de retenção de água guardam relevante relação com a porosidade e com a composição química e mineralógica dos solos e impactam diretamente no comportamento hidrodinâmico. Geralmente as duas causas de retenção de água matricial que atuam num solo são: o mecanismo capilar ou dimensão de poros e a atuação das forças de adsorção das partículas.

Estudos realizados para outros tipos de solo discutiram amplamente as influências da temperatura na curva característica solo-água (Nimmo & Miller 1986, Börgesson 2001; Romero 2003; Tang e Cui 2005; Arifin 2006). Tang e Cui (2005) verificaram na curva característica da argila MX-80 que, a um dado teor de umidade, a sucção diminuiu à medida que a temperatura aumentava. Börgesson (2001), indicou que os efeitos da temperatura na curva característica eram pequenos para a bentonita compactada por ele analisada.

Segundo Lima 2018, as curvas características determinadas para amostras de solo indeformadas coletadas no campus da UnB, para 2 m, 8 m e 9 m de profundidade e submetidas às temperaturas 10, 24 e 40 °C, indicaram um aumento da sucção com o aumento da temperatura contrariamente ao obtido, por exemplo, por Nimmo & Miller (1986). Embora a sucção matricial seja geralmente entendida como um fenômeno físico dependente do tamanho do poro, também intervêm nesse processo as forças de adsorção característica dos minerais que compõem o solo.

### **2.2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLOS**

Muitas obras de engenharia, tais como estradas e aeroportos, utilizam solos compactados na sua estrutura. Compactar um solo significa torná-lo um material mais denso e com comportamento mais adequado para os propósitos a que se destinam. O estado mais denso é obtido por meio da redução do volume de ar intersticial, com pequena ou nenhuma variação do teor de umidade de solo.

O objetivo principal da compactação de solos é a obtenção de um novo material que tenha um melhor comportamento para uma finalidade específica, gerando no mesmo deformações permanentes que modificam suas propriedades originais e causando a densificação do solo, aumento da resistência mecânica, redução da permeabilidade, aumento da rigidez, entre outros efeitos.

Segundo Sivikaya *et al.* 2013, o processo de compactação é utilizado com o intuito de melhorar o comportamento hidromecânico do solo e de evitar problemas como recalques excessivos em rodovias e aterros.

As condições ambientais podem influenciar na construção e na vida útil das rodovias, pois elas interferem na temperatura e umidade de equilíbrio do solo assim como no próprio comportamento. Tendo em vista que a mineralogia, textura e estrutura dos solos afetam os seus comportamentos.

Para Bento (2006), os fatores que afetam os solos finos compactados é que apresentam uma estrutura floclada quando compactados no ramo seco da curva de compactação e uma estrutura dispersa quando da compactação no ramo úmido. Também foi observado que a retração para um solo compactado no ramo seco é consideravelmente menor que quando da compactação no ramo úmido.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015) as teorias de compactação de solos, apresentam os mecanismos do processo de densificação de solos constituídos por partículas individualizadas, ou seja, a densificação, ocorrendo com a redução da distância entre as partículas. Nessas teorias, os fenômenos relacionados a interação solo-água e como ela interfere no processo de compactação estão associadas à natureza químico mineralógica das partículas individualizadas e ambas teorias ajudam a entender os mecanismos que levam à densificação dos solos argilosos nessas circunstâncias. No entanto, nos perfis de intemperismo presentes em regiões tropicais, essa condição de partículas individualizadas presentes no solo e em condições de serem orientadas só se faz presente em solos pouco intemperizados, solos saprolíticos. Nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, as partículas de argila encontram-se, em sua maioria, compondo agregados e sem a liberdade necessária para terem sua orientação influenciada pelo processo de compactação e nem sua condição de hidratação influenciado nesse processo.

Nos ensaios de compactação realizados no laboratório, a temperatura tem pouca influência, pois, normalmente, esses são climatizados. No campo, a temperatura exerce importante efeito no processo de compactação. Em primeiro lugar, devido aos efeitos de evaporação, retirando água do solo, em segundo, devido à condensação da umidade ambiente, acrescentando água ao solo. Mas outro efeito, quase sempre pouco lembrado e que deve ser considerado, é a influência da temperatura nas variações volumétricas da água e do ar. Por tanto, no processo em campo, as condições climáticas devem ser levadas em conta no planejamento da obra.

Em um trabalho realizado por Bernucci *et al.* (2000) em que se estudou os efeitos da sucção e da temperatura na movimentação d'água em pavimentos construídos com solos lateríticos, os efeitos do clima quente e úmido, combinados com as condições hidrológicas e de relevo do interior paulista, provocam umidades de equilíbrio de bases de solos abaixo daquelas utilizadas na compactação.

De Campos (1979) e Rabe (1998) apresentam uma revisão detalhada sobre como os parâmetros de um solo são afetados pela variação de temperatura. Foi relatado pelos dois autores a influência da temperatura nos parâmetros de permeabilidade, variação de compressibilidade do solo, mudança de poropressão e variação nos parâmetros de resistência.

O comportamento físico-químico de um sistema argilo-mineral tanto quanto as suas estruturas mineralógicas, propriedades de permeabilidade e tensão - deformação pode ser muito alterados devido ao aquecimento do solo a altas temperaturas. Ensaios normais de laboratório trabalham as amostras entre as temperaturas de 20 a 25°C.

Campanela e Mitchell (1968) afirmaram que variações de volume, devido as variações de temperatura nas condições de tensão efetiva constante em solos saturados, é resultante de uma expansão térmica do mineral sólido e da água intersticial dos poros. Estes autores afirmam ainda que qualquer mudança na estrutura do solo é resultado das variações de temperatura.

De Campos (1979) concluiu que o coeficiente de permeabilidade cresce com o aumento de temperatura. Correções para o coeficiente de permeabilidade baseados nos efeitos de variação da viscosidade da água pura com a temperatura deram bons resultados. Para o autor,

se as mudanças no índice de vazios com a temperatura são significantes estas devem ser consideradas na correção da permeabilidade. O autor propõe uma nova relação teórica levando-se em conta este parâmetro.

Marques (1996) e Towhata *et al.* (1993), ensaiando solos argilosos até a temperatura de 50 e 90 °C respectivamente, constataram um aumento na condutividade hidráulica saturada das amostras ensaiadas em função do incremento de temperatura.

Towhata *et al.* (1993) Apresenta os resultados de um estudo sobre os efeitos da alta temperatura (até 90°C) sobre as características de cisalhamento não drenado da argila tanto em estados normalmente consolidados (NC) quanto sobreconsolidados (OC). O estudo é baseado em testes triaxiais isotrópicos consolidados não drenados, realizados com um aparelho triaxial de temperatura controlada. Várias seqüências de aquecimento e consolidação foram usadas para obter uma visão dos efeitos da temperatura sobre a argila. O estudo revela que : (1) no estado NC, tanto o módulo secante inicial quanto a resistência ao cisalhamento aumentam com o aumento da temperatura, e (2) no estado OC, apenas o módulo secante inicial aumenta com o aumento da temperatura, mas a resistência ao cisalhamento não é afetada pelo aquecimento. Rabe *et al.* (2003) também constatou a redução do índice de vazios com a temperatura. Ambos autores trabalharam com temperaturas abaixo de 90 °C.

Segundo Liang e Rabab'ah (2007), verificaram a influência da umidade e do arranjo do esqueleto dos solos no comportamento mecânico de solos que compõem pavimentos.

Segundo Shu-Rong *et al.* (2016) os efeitos combinados da temperatura e do teor de umidade na sucção de dois solos argilosos, os quais foram estaticamente compactados com umidades que variavam entre 5% e 20%, de modo a poder ser avaliado um amplo espectro de condições de compactação. Depois, foi adoptado o método do papel filtro e o psicrômetro do termopar para medir a sucção do solo, incluindo a sucção total e matricial, em temperaturas que variam entre 10 e 60°C. Verificou-se que as sucções do solo de solos expansivos variam com os parâmetros de compactação tais como o teor de umidade de compactação e o esforço de compactação, e que a temperatura também é influente na sucção do solo. À medida que o teor de umidade aumenta, os efeitos do esforço de compactação e da temperatura na sucção tornam-se menos significativos. Os resultados dos testes confirmam que tanto a sucção total como a sucção matricial são significativamente influenciadas por alterações no teor de umidade da

bentonite BH compactada e da argila Zhisin. Além disso, a sucção do solo da bentonite de BH é superior à argila de Zhisin, e a taxa de mudança na sucção com aumento do teor de umidade é mais baixa para a bentonite de BH do que para a argila de Zhisin, indicando que a bentonite de BH tem uma melhor capacidade de retenção de água do que a argila de Zhisin.

Hailemariam (2022) os resultados de um estudo experimental do comportamento de resistência à fluência e ao cisalhamento de um solo argiloso normalmente consolidado do este da Alemanha. Os testes de resistência ao cisalhamento foram realizados em amostras de solo remoldadas utilizando uma célula triaxial que pode regular a temperatura da amostra. O programa experimental incluiu uma série de testes de compressão triaxial a temperaturas de 20, 40 e 60 °C. Embora o comportamento de mudança de volume do solo tenha mostrado algumas variações com mudanças de temperatura, possivelmente devido a mudanças na espessura da camada dupla da fração argilosa do solo, o comportamento de resistência ao cisalhamento (em termos de ângulo efetivo de atrito interno) do solo argiloso siltoso apresentou pequenas mudanças com variações de temperatura e pode ser assumido como independente da temperatura para a faixa considerada neste estudo.

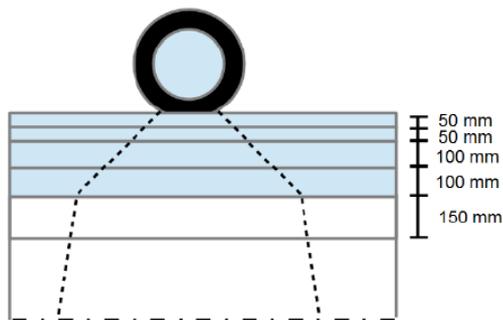
## **2.3 PROJETOS DE PAVIMENTO COM VARIAÇÕES CLIMÁTICAS**

O clima e suas mudanças ao longo do tempo são alguns dos principais fatores que afetam o desempenho dos pavimentos flexíveis, podendo provocar a sua deterioração e até chegar a sua própria inutilidade. As estruturas de pavimento representam um investimento econômico muito importante para um país, diante desta importância, os pavimentos devem ser duráveis e resistentes em toda sua vida de serviço.

Para realçar a importância do clima e das variações climáticas no desempenho das estruturas de pavimento serão de modo resumido abordadas construções rodoviárias em Camberra, Mongólia e no Peru.

### **2.3.1 RODOVIAS EM CAMBERRA**

Segundo Ferreira (2015), o relatório técnico da Austroads de 2013 apresenta valores de temperatura para a camada asfáltica de um pavimento flexível situado em Camberra (Austrália), estimados por meio de modelos em função da temperatura horária do ar, obtida a partir de dados da estação climática da região. A estrutura do pavimento estudada é ilustrada pela Figura 2.7.



Número da camada	Espessura (mm)	Material	Módulo (MPa)
1	50	Concreto Asfáltico de Graduação Densa (C320)	Variável
2	50	Concreto Asfáltico de Graduação Densa (C320)	Variável
3	100	Concreto Asfáltico de Graduação Densa (C320)	Variável
4	100	Concreto Asfáltico de Graduação Densa (C320)	Variável
5	150	Sub-base em Material Britado	400
6	-	Subleito	50

Figura 2.7 – Estrutura de Pavimento Flexível, Camberra (Austroads, 2013)

O pavimento é composto de 6 camadas, a espessura total da camada de concreto asfáltico é de 300 mm, segue a capa de sub-base de 150 mm e uma capa de subleito de 50 MPa, a fim de ter uma melhor proteção da rodovia.

Foi efetuada análise apenas na camada asfáltica, sendo considerado o valor de WMAPT em Camberra igual a 23°C, conforme indicado no manual australiano de 2012. Foram determinadas as temperaturas na superfície de pavimento, e no centro das camadas asfálticas apresentadas na figura 2.8, para um dia quente de verão.

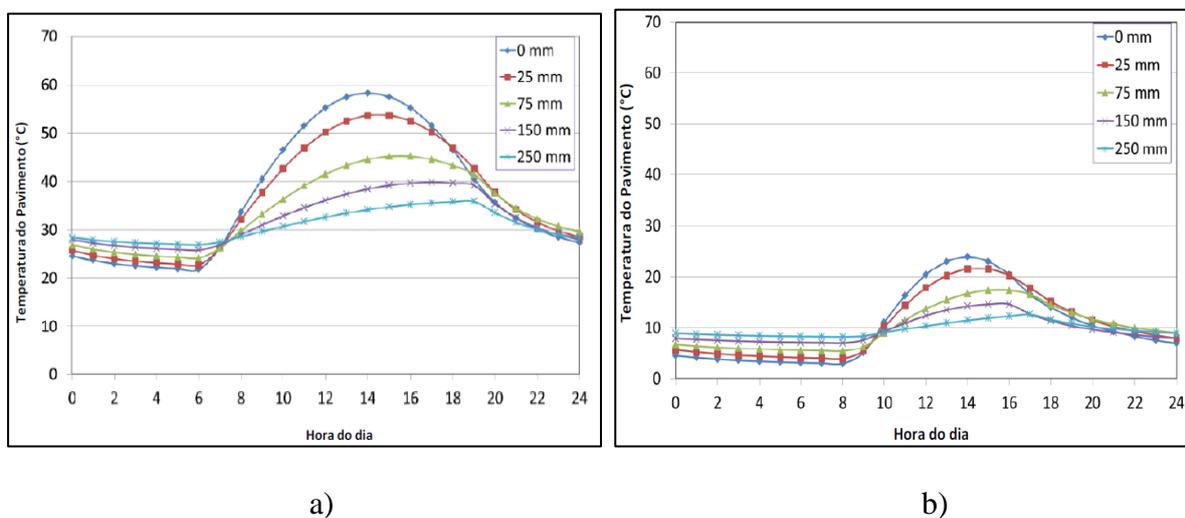


Figura 2.8 – Temperatura horária a diversas profundidades do revestimento (Camberra), a) verão e b) inverno. (Adaptado de AUSTROADS, 2013)

### 2.3.2 RODOVIAS NA MONGÓLIA

Em regiões frias como a Mongólia, mais que o tráfego em si, é o regime térmico em mudança que afeta o solo e o desempenho dos pavimentos rodoviários (Kachroo *et al.*, 2002).

As condições climáticas extremas na Mongólia variam de invernos rigorosos entre novembro e março a condições quase subtropicais de verão entre maio e setembro. As temperaturas anuais podem variar desde a baixa de  $-35^{\circ}\text{C}$  em alguns lugares do norte durante o inverno, até  $+35^{\circ}\text{C}$  no sul durante o verão. Em média, as temperaturas dentro de uma região podem variar de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $+20^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 2.9 apresenta uma descrição esquemática dos regimes térmicos com alteração sazonal do solo em regiões frias.

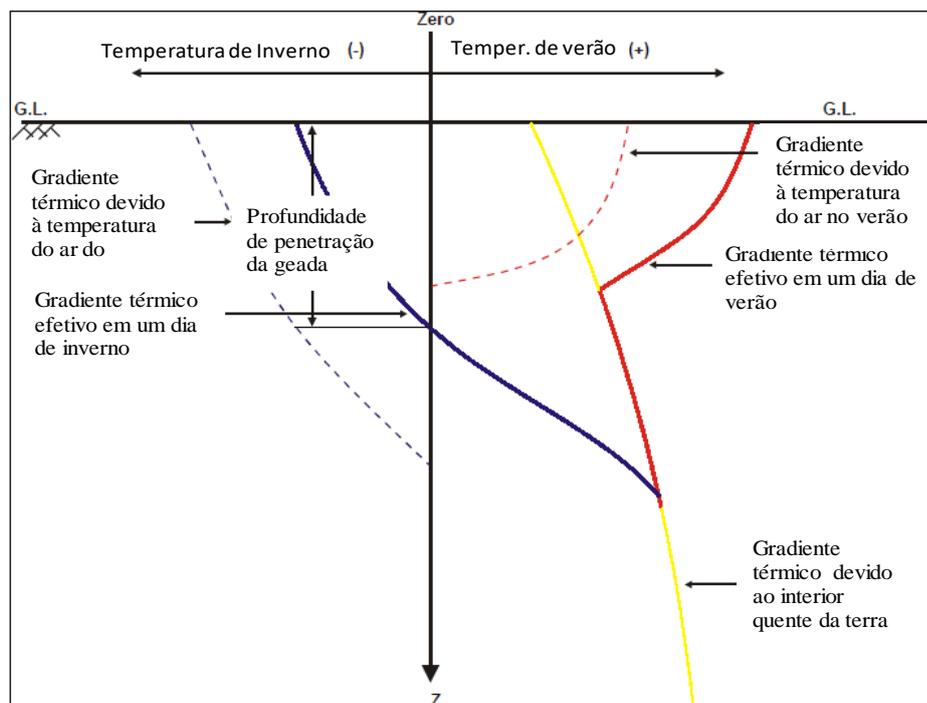


Figura 2.9 – Descrição dos regimes térmicos com alteração sazonal em regiões frias (Kachroo *et al.*, 2002).

Têm-se três tipos de regimes térmicos, que geralmente prevalecem durante as estações do ano na Mongólia:

- I. Regime térmico de inverno, durante os meses de novembro a fevereiro;

- II. Flutuação do regime térmico durante os meses de março até abril e outubro até novembro;
- III. Regime térmico de verão durante os meses de maio a setembro. Sob temperaturas abaixo de zero encontradas durante os meses de inverno, o solo até uma certa profundidade abaixo do revestimento congelará e aumentará em volume.

O pavimento será conseqüentemente sujeito a pressões de expansão. E, se o solo de subleito é silto-argiloso e o lençol freático está próximo, o pavimento será submetido ao fenômeno de *Frost Heave* (Geada). Além disso, o pavimento pode apresentar rachaduras devido às tensões de tração excessivas, produzidas sob os efeitos de temperaturas baixas ( $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) no inverno.

Sob o regime térmico flutuante durante os meses de março a abril e outubro a novembro, as temperaturas são susceptíveis de mudança pela manhã com maior intensidade e menor intensidade à noite. Essas inversões de temperatura, repetidas diariamente ao longo de meses, pode levar a danos no pavimento, particularmente nas suas camadas superiores, devido ao efeito de "Fadiga Térmica".

Sob o regime térmico de verão, a partir do mês de maio, o solo congelado começará a descongelar. Uma maior atividade de tráfego nas estradas acompanhada do degelo, pode causar danos consideráveis ao pavimento. Por conseguinte, para o volume relativamente baixo de tráfego de veículos nas estradas da Mongólia, o desempenho dos pavimentos será essencialmente afetado mais pela mudança do regime térmico do solo, do que pelas cargas por eixo. Logo, os pavimentos rodoviários na Mongólia devem ser concebidos principalmente tendo em conta as condições climáticas e geotécnicas extremamente variáveis do terreno. Sob as condições climáticas geralmente predominantes na Mongólia, o terreno em que as estradas são construídas pode ser classificado como "sazonalmente submetidos ao congelamento e descongelamento do solo".

### **2.3.3 ESTRADAS NO PERU**

O Peru apresenta regiões altas com temperaturas abaixo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  com gelo e degelo. O clima está sujeito a duas temporadas: a estação chuvosa ou verão (novembro até abril), com média de precipitação mensal acumulada entre 400 e 600 mm e a estação fria ou de inverno

(junho a setembro). A precipitação média anual característica está entre 500 e 1500 mm. As temperaturas no inverno variam de - 20 °C (noite) até 20 °C (dia).

Segundo Águila (1999), considerando-se as redes de estradas no Peru e Bolívia, existem mais de 4000 km de estradas localizados 3500 metros acima do nível do mar, requerendo muito investimento para serem asfaltadas ou reabilitadas. As estradas são afetadas por uma série de fatores climáticos, como as baixas temperaturas e o, gradiente térmico de insolação (devido os efeitos de fluxo de água na superfície e na subsuperfície), provocando a deterioração prematura e acelerada da estrutura de pavimento. Além disso, nas maiores altitudes há escassez de materiais e a limitação dos países de contar com produtos asfálticos de qualidade.

As soluções adotadas para o projeto estrutural do pavimento na rodovia San Mateo – Morococha do setor rodoviário central que atravessa os Andes a uma altitude de 4818 metros acima do nível do mar, foram desenvolvidas no âmbito de uma Cooperação Técnica Peru - Finlândia, em 1991. A estrutura de pavimento é nesse caso constituída por um geotêxtil separador do subleito, uma base granular drenante de 0,15 m de espessura, uma base asfáltica de 0,10 m e uma camada final de revestimento de asfalto de 0,05 m (Figura 2.10).

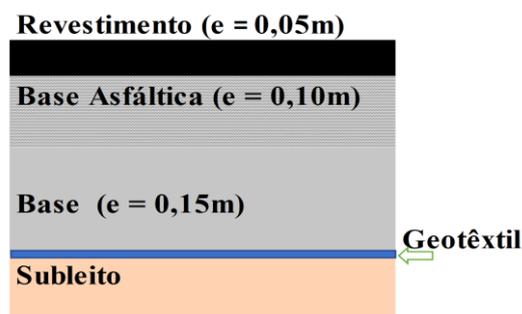


Figura 2.10 – Estrutura do Pavimento em Peru

## 2.4 CLIMA DO BRASIL E DO PERU

Brasil e Peru apresentam em áreas geográficas com climas tropicais semelhantes. Na figura 2.11a, a região da selva do Peru pode ser vista na cor verde, correspondendo a um clima tropical úmido (SENAMHI, 2022).

Para a presente pesquisa, analisou-se as temperaturas médias máximas e mínimas assim como também as precipitações médias mensais acumuladas no Brasil e no Peru. Analisou-se ainda a umidade relativa no Brasil do ano 1960 até 2018.

A Figura 2.11 apresenta a localização dos dois países na América do Sul. O Brasil está dividido em cinco regiões das quais se tem os dados meteorológicos (INMET, 2018) de uma estação por cada região que compreendem as cidades: Brasília (Distrito Federal), Porto Nacional (Tocantins), Campos Novos (Santa Catarina), São Carlos (São Paulo) e Lençóis (Bahia). Já o Peru está dividido em três regiões: Costa, Serra e Selva, das quais tem se estudado as cidades de Lima (Estação Ñaña), Loreto (Estação Mazán) e Puno (Estação Puno).

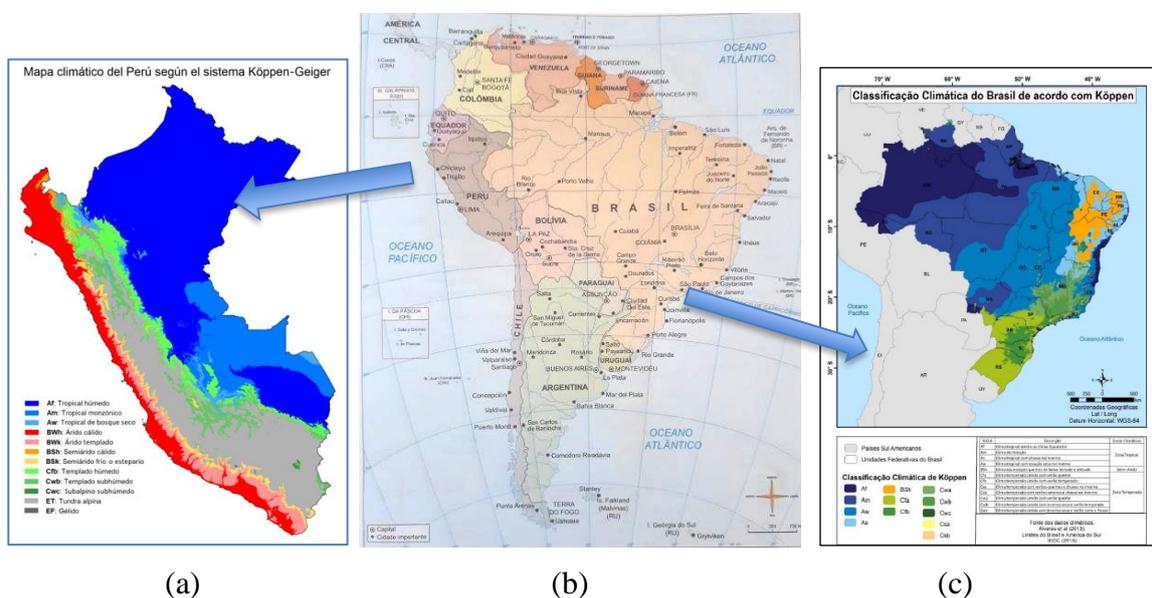


Figura 2.11 – Cartas de: a) Clima de Peru (Beck *et. al.* 2018), b) América do Sul (Atlas Riedel), c) Clima de Brasil (Alvarez, 2013)

Para a cidade de Campos Novos a temperatura média mínima é de 8,4 °C no mês de junho. A temperatura média máxima é de 35,7 °C no mês de setembro na cidade de Porto Nacional. A precipitação mensal máxima média é de 272 mm no mês de janeiro em São Carlos e a precipitação mensal mínima média é de 5,6 mm no mês de junho em Brasília. No âmbito do presente estudo as temperaturas serão consideradas entre 10 a 40 °C.

As Tabelas 2.2 e 2.3 apresentam as temperaturas médias máximas, temperaturas médias mínimas, precipitação média acumulada anual, do Brasil e do Peru, respectivamente.

Tabela 2.2 – Atributos do clima do Brasil considerando-se as médias anuais acumuladas por região entre 1960 e 2018

1960-2018	Brasília	Porto Nacional	Campos Novos	São Carlos	Lençóis
Temperatura Máx. Média (°C)	26,8	33,1	22,5	26,7	29,1
Temperatura Mín. Média (°C)	16,5	21,3	12,3	15,7	19,3
Varição térmica média (°C)	10,3	11,8	10,2	11,0	9,8
Precipitação anual (mm)	1487,4	1615,5	1927,7	1492,1	1188,1
Umidade Relativa (%)	66,4	69,9	75,2	71,7	73,0

Fonte: INMET - BRASIL 2018

Tabela 2.3 – Atributos do clima do Peru considerando-se as médias anuais acumuladas por região entre 1992 e 2014

1992-2014	Ñaña	Mazán	Puno
Temp. Máx. Média (°C)	23,8	31,5	15,1
Temp. Mín. Média (°C)	14,6	21,9	2,6
Varição térmica média (°C)	9,2	9,6	12,5
Precipitação média (mm)	1,9	2894,9	660,3
Umidade Relativa (%)	73,0	81,6	52,0

Fonte: SENAMHI - PERÚ 2014

A temperatura mínima das cidades estudadas é de 7,9 °C (Campos Novos) e no Peru (Puno) é de -0,8 °C na Serra. A variação da sucção ao longo do ano ocorre quando a precipitação modifica a umidade do solo e influência em seu grau de saturação, chegando até as camadas mais profundas. Nessa pesquisa será avaliada a influência da temperatura na sucção, uma vez que esta, em princípio, sofre ainda a influência das condições atmosféricas. Tem-se ainda, como já indicado, que o clima exerce influência no intemperismo, especialmente na umidade relativa, precipitação e temperatura. Outro efeito importante nas regiões tropicais é que a temperatura age como catalisadora das reações químicas que envolvem a água. Assim, além de haver mais água disponível para reação e percolação, o calor ajuda a aumentar a quantidade de reações químicas que ocorrem (Conciani Wilson *et al.*, 2015).

A Figura 2.12 apresenta o gráfico das temperaturas máximas médias das 5 cidades do Brasil dos anos de 1960 até 2018 e de Peru dos anos de 1992 até 2014. Já a Figura 2.13 apresenta o gráfico das temperaturas mínimas médias das 5 cidades em estudo do Brasil e das 3 cidades do Peru e a Figura 2.14, as precipitações médias acumuladas por mês do Brasil e do Peru.

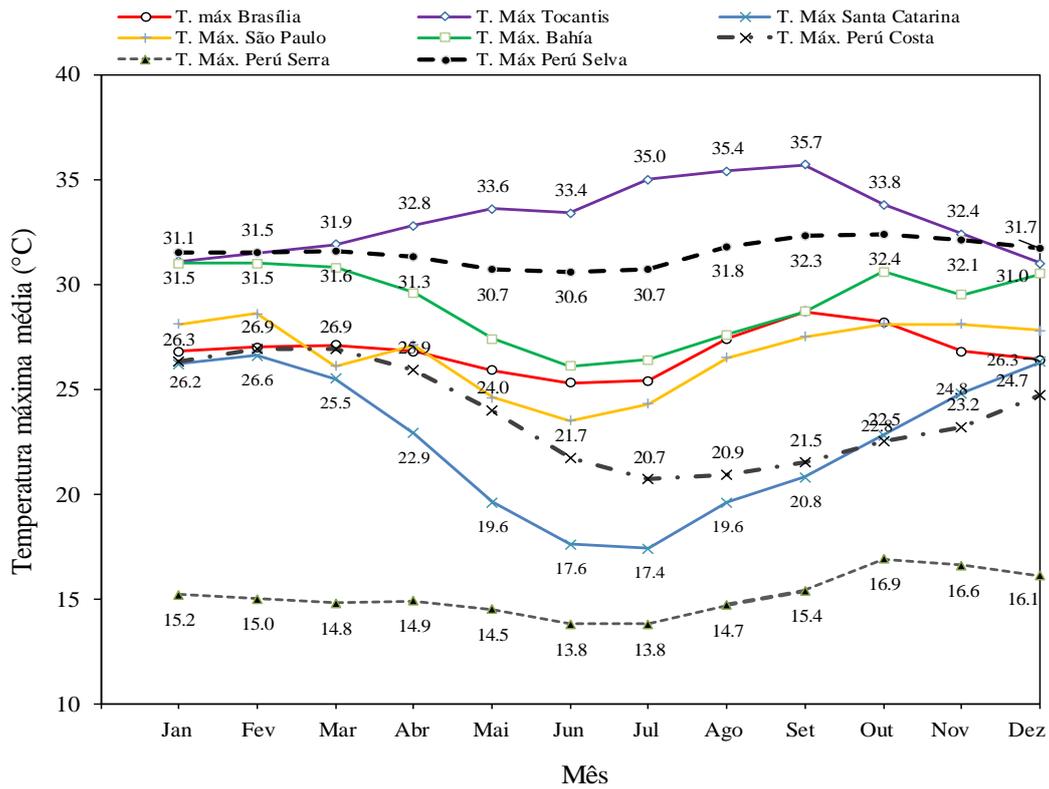


Figura 2.12 – Gráfico de temperaturas máximas médias no Brasil e no Peru

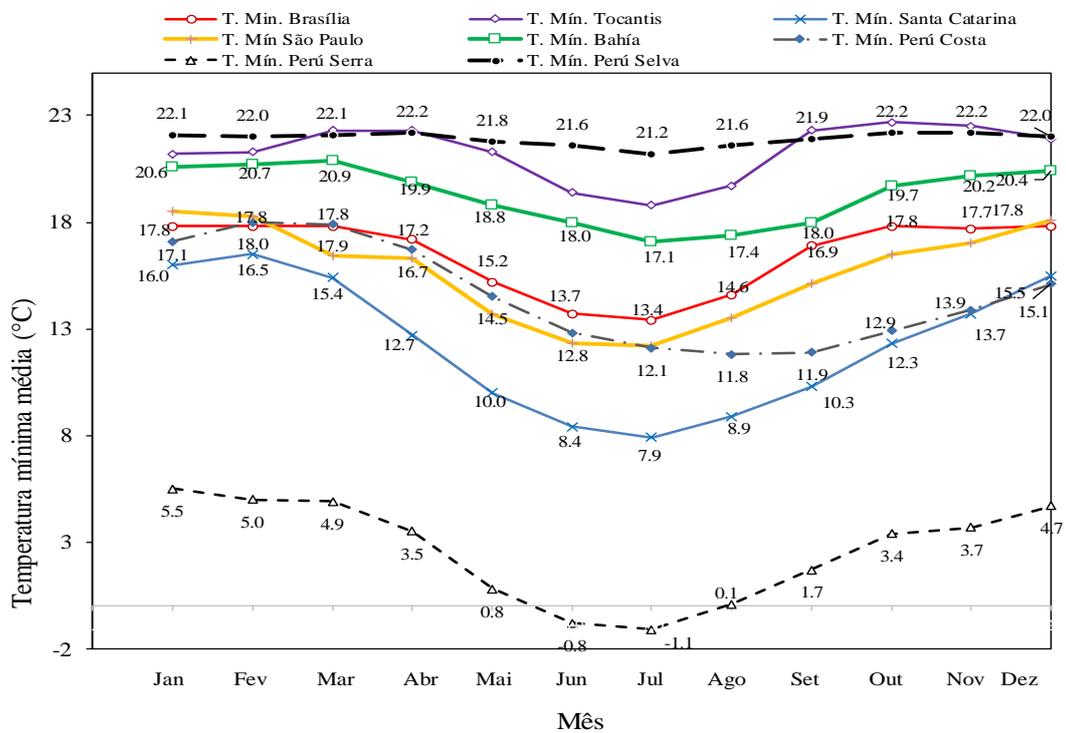


Figura 2.13 – Gráfico de temperaturas mínimas médias no Brasil e no Peru

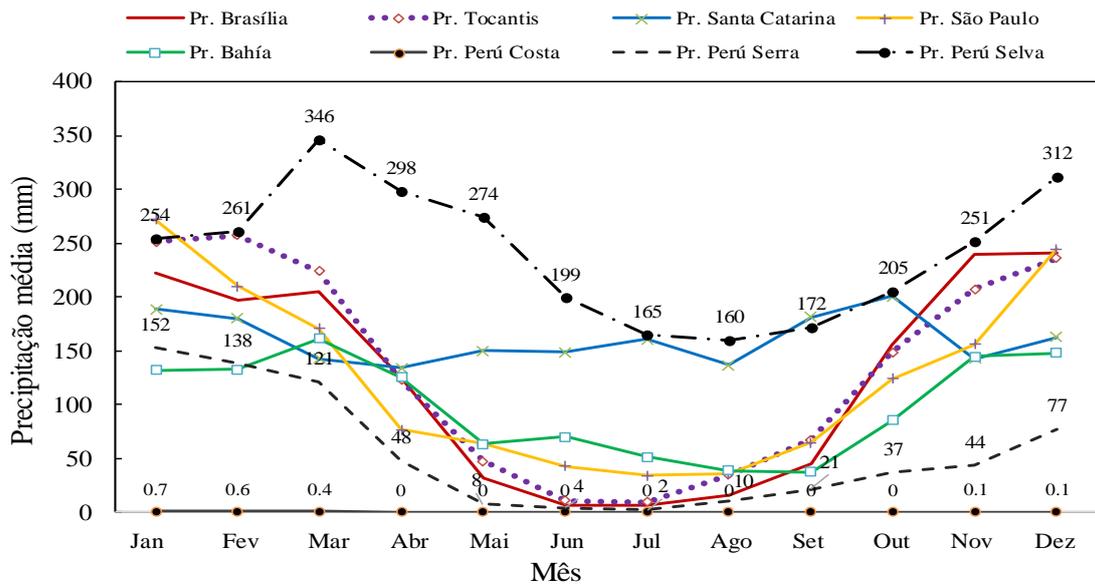


Figura 2.14 – Gráfico de Precipitação média mensal no Brasil e no Peru

Das Figuras 2.12 e 2.13 as regiões da Costa e Selva do Peru apresentam temperaturas máximas e mínimas médias similares às do Brasil (Região Sul e Norte) respectivamente. As temperaturas da região Serra do Peru são muito baixas e não se encontram na faixa de temperaturas do Brasil.

A Figura 2.15 apresenta a gráfica da umidade relativa versus mês, das cidades de Brasil e Peru no período indicado.

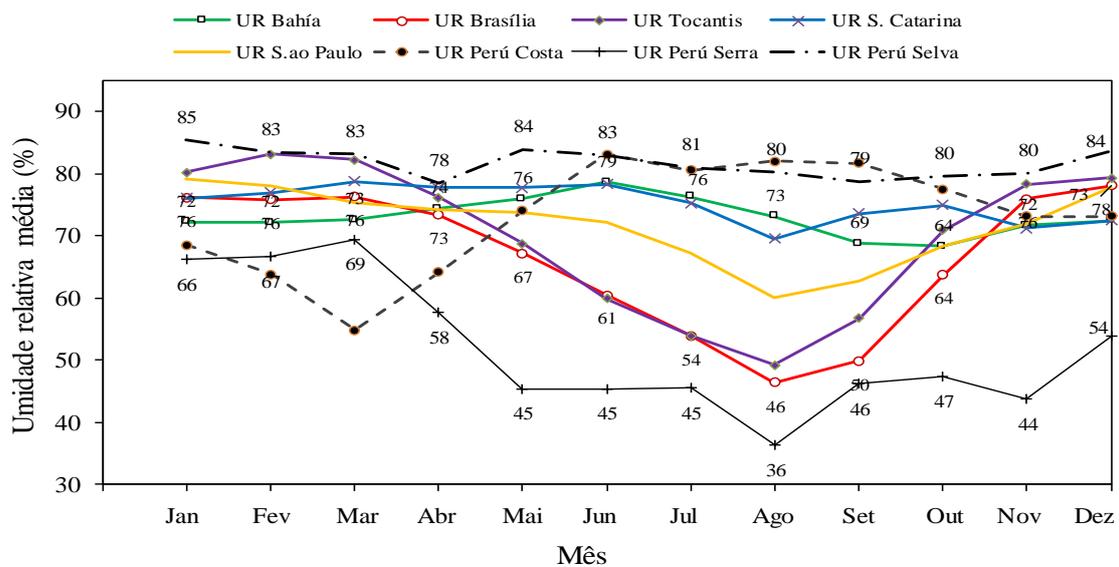


Figura 2.15 – Gráfico de Umidade Relativa média mensal no Brasil e no Peru

## 2.5 PLUVIOMETRIA E TEMPERATURA EM BRASÍLIA E PERÚ

Apresenta-se a seguir as variações e possíveis tendências dos seguintes atributos atmosféricos: precipitação acumulada e temperatura média máxima e mínima do ar. O comportamento interanual da pluviometria para a cidade de Brasília mostra variabilidade, com extremo chuvoso em aproximadamente 247,4 mm em janeiro e seco em 8,7 mm em junho. Observa-se elevada amplitude de variação pluviométrica para os dados estudados para o período 1963 até 2021. No caso da cidade de Mazán localizada na região selva de Peru, a precipitação interanual da pluviometria máxima é de 346 mm em março e a mínima é de 160 mm em agosto, observa-se pouca amplitude da variação pluviométrica para os dados estudados para o período 1992-2014.

Nas Figuras 2.16a e 2.16b, são apresentadas as gráficas das precipitações médias em modo comparativo entre Brasil e Peru, para as estações do ano: primavera (Outubro, Novembro e Dezembro), verão (Janeiro, Fevereiro e Março), outono (Abril, Maio e Junho) e inverno (Julho, Agosto e Setembro). A estação do ano de maior precipitação em Brasília é a primavera e de Mazán é o verão e de menor precipitação é em inverno nas duas cidades.

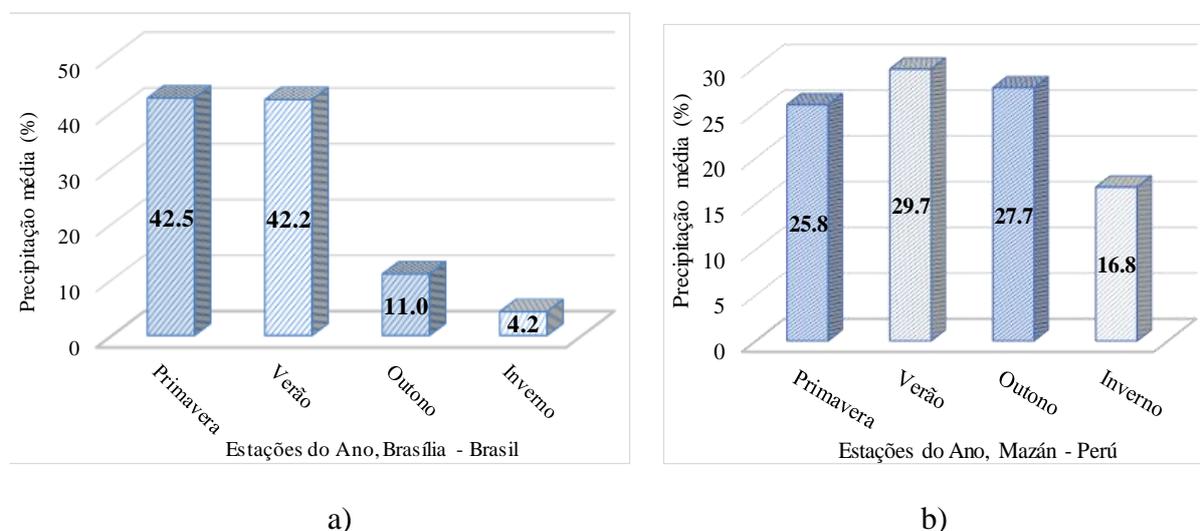


Figura 2.16 – Distribuição sazonal da precipitação em: a) Brasília - Brasil (1963-2021, INMET 2021) e b) Mazán-Peru (1992-2014, SENAMHI 2021)

Considerando a tendência do atributo precipitação para a série histórica de 1963 a 2018, o teste de regressão linear não mostra uma correlação nem tendência para os dados da série interanual e aqueles referentes às estações do ano, conforme apresentam as Figuras 2.17a e b de Brasília e Peru respectivamente.

As Figuras 2.16a e 2.16b apresentam as precipitações acumuladas para Brasília (Brasil) no período 1963 – 2021 e para Mazán (Perú) no período de 1992-2014, respectivamente.

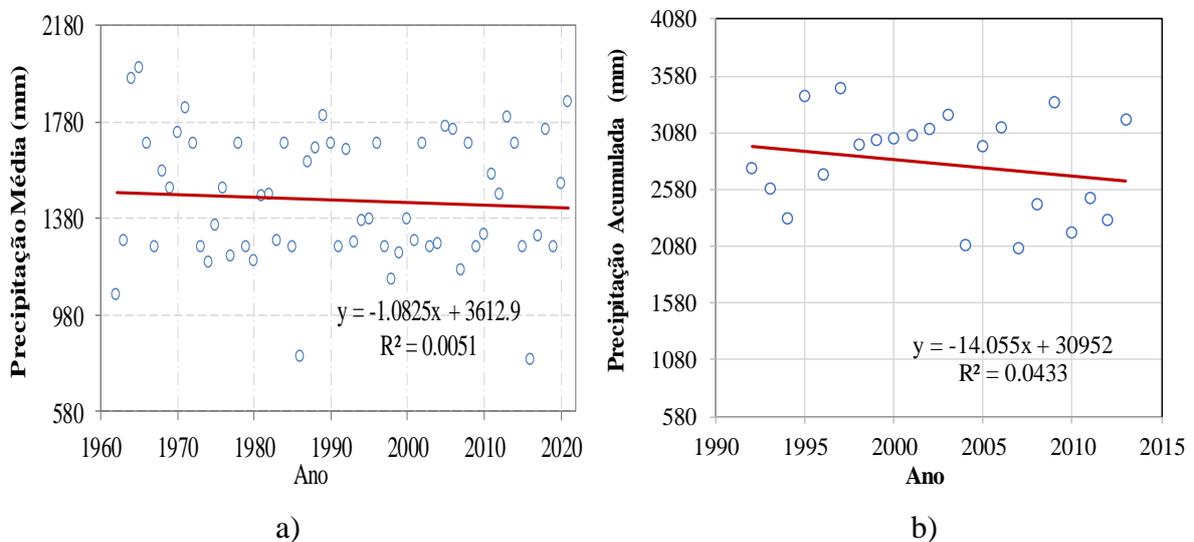
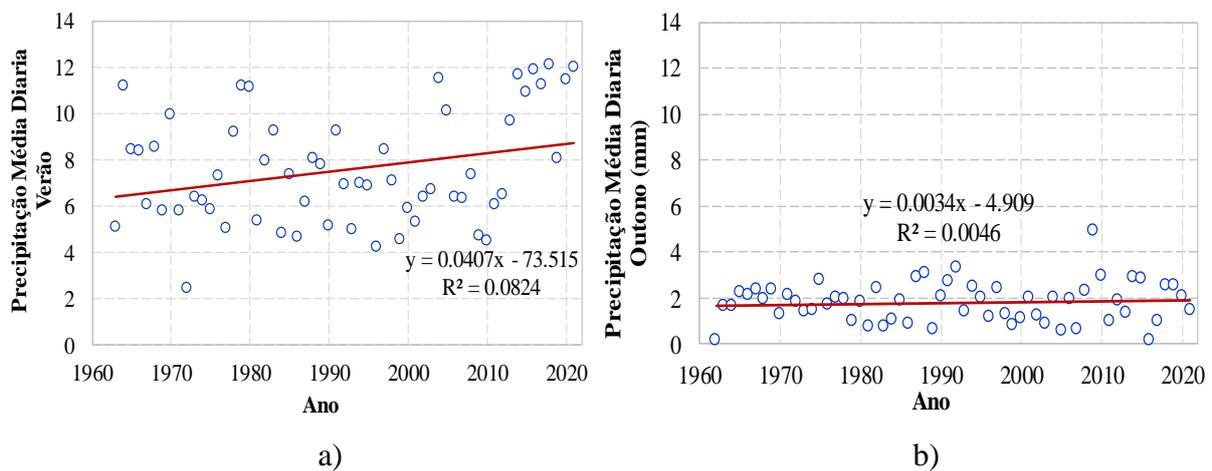
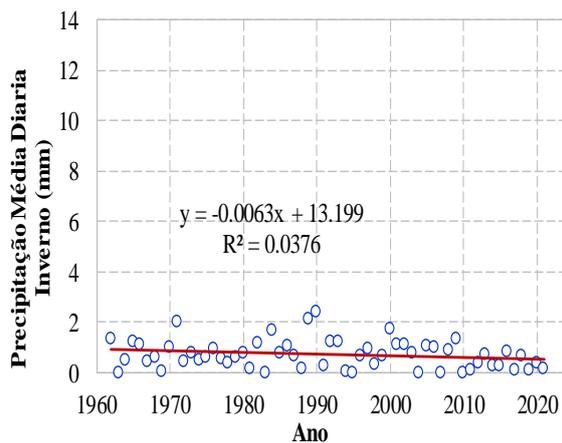


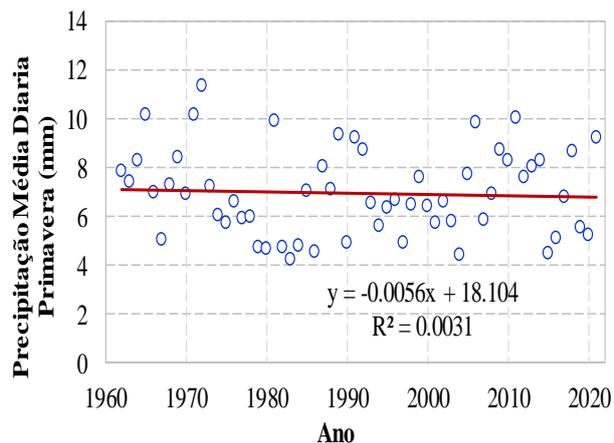
Figura 2.17 – Precipitação acumulada anual média em: a) Brasília (1963-2021) e b) Mazán (1992-2014)

Figuras 2.18a, b, c e d pode-se observar que, a pesar de ter sido positivo, exceto na primavera, o coeficiente angular não interfere nas análises, pois os valores de  $R^2$  são baixos, o que confirma a dispersão dos dados e o caráter aleatório da pluviometria para essa série temporal analisada como um atributo isolada da cidade de Brasília.





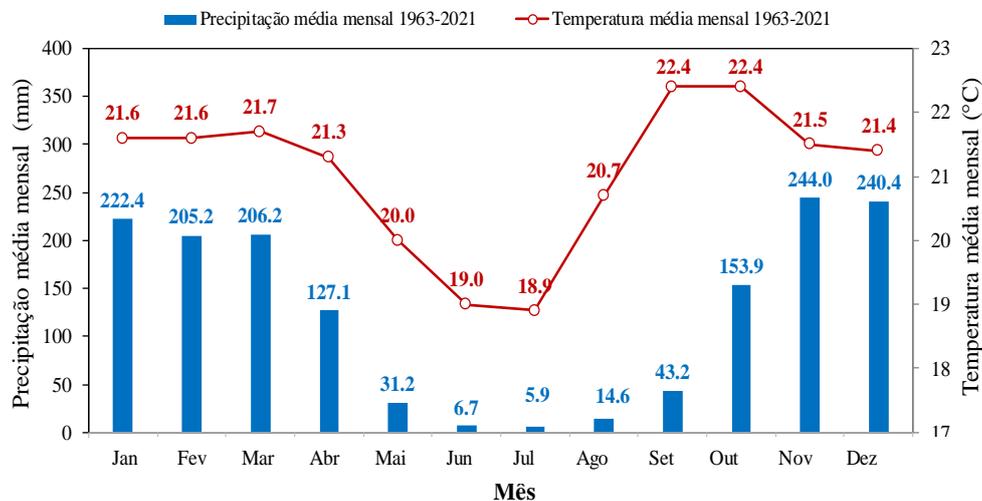
c)



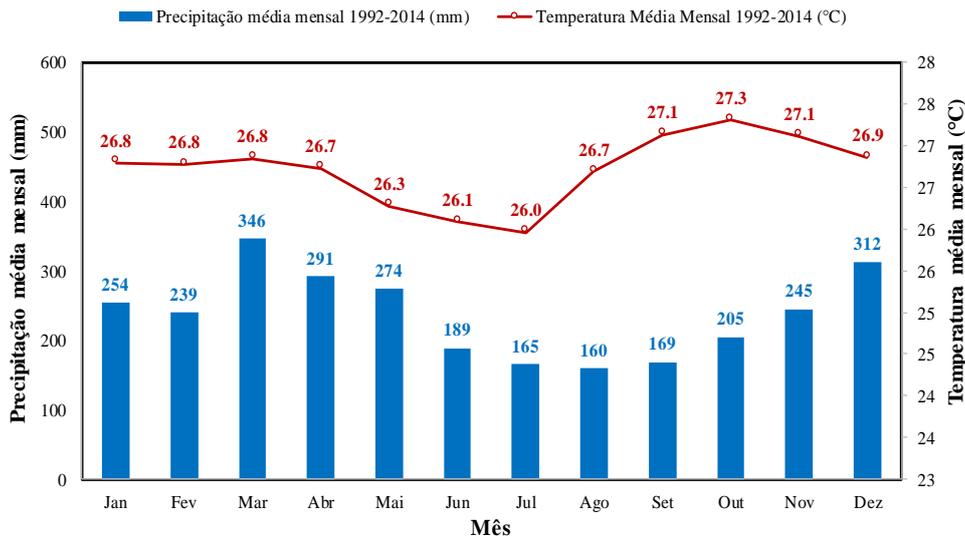
d)

Figura 2.18 – Precipitação média sazonal em Brasília: a) Verão, b) Outono, c) Inverno, d) Primavera, no período de 1963 até 2021. Fonte: INMET 2022

Nas Figuras 2.19a e 2.19b, apresentam a precipitação média mensal acumulada por mês e a temperatura média mensal para as cidades de Brasília e Mazán, respectivamente. A temperatura média máxima é de 22,4°C em Brasília (outubro) e 27,3°C em Mazán (outubro), a menor temperatura média em Brasília e Mazán ocorre no mês de julho com 18,9°C e 26,0°C, respectivamente.



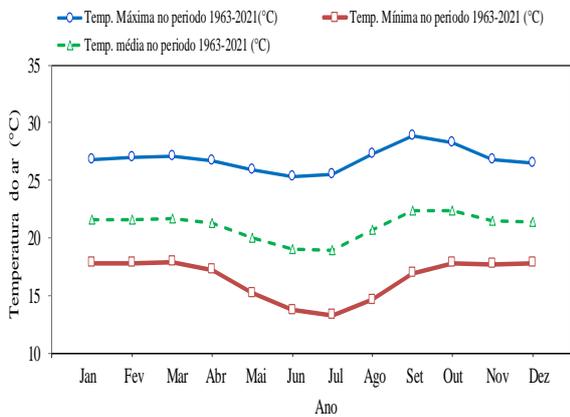
a)



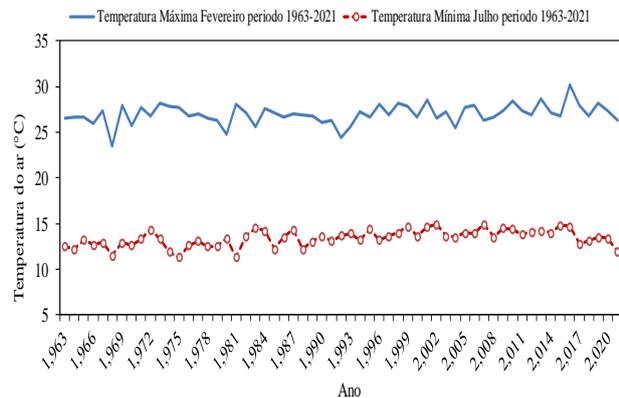
b)

Figura 2.19 – a) Precipitação média sazonal em Brasília - Brasil, no período de 1963 até 2021 e b) Precipitação média sazonal em Mazán - Peru, no período de 1992 até 2014

Na Figura 2.20 a, apresenta a variação da temperatura máxima e mínima da cidade de Brasília, também a temperatura média para todos os meses do ano, no período de 1963 até 2021. Na Figura 2.20 b, mostra a variação da temperatura máxima no mês de fevereiro e a temperatura mínima no mês de julho, para a cidade de Brasília no período de 1963 até 2021.



a)



b)

Figura 2.20 – a) Temperatura máxima, mínima e média e b) Temperatura anual máxima em fevereiro e mínima em julho, em Brasília no período de 1963 até 2021. Fonte: INMET, 2022

## 2.6 CONGELAMENTO/DESCONGELAMENTO EM PAVIMENTOS

A ação da geada é uma preocupação crítica do projeto estrutural do pavimento, nos países ou em partes dos países que experimentam regularmente o congelamento e o descongelamento do solo. A variação do teor de umidade na estrutura do pavimento é de um modo geral importante e em particular nas regiões onde a estrutura do pavimento fica susceptível ao congelamento. Conforme Janoo e Sheperd (2000), em Montana, nordeste dos Estados Unidos, no início da primavera são impostas limitações das cargas transportadas por veículos comerciais, visando a redução da severidade de danos causados ao pavimento. O estudo buscou analisar a variação sazonal do módulo de resiliência do subleito, relacionando-a com as variações do teor de umidade e da temperatura para trechos localizados em Montana, que sofriam com a ação de congelamento. Determinaram a variação do teor de umidade ao longo do ano, considerando apenas a água não congelada e os valores de módulo de resiliência. Com o objetivo de considerar o efeito da variação sazonal de temperatura e os efeitos de gelo-degelo no subleito, a AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) introduziu o conceito de perda de suporte através de um módulo efetivo no subleito, em substituição ao índice de Suporte Califórnia (CBR) a partir da versão de 1986 do guia de dimensionamento (Martins, 2007).

O congelamento da água do solo tem como consequência o inchamento (frost heaving), se alcançadas temperaturas inferiores a 0 °C por tempo considerável. O mecanismo físico está na expansão da estrutura molecular da água ao congelar ou cristalizar, lembrando que sua densidade máxima ocorre a 4 °C. A água que preenche os poros não tendo por onde escapar pode romper ou enfraquecer a massa de solo ou de camadas de pavimento. No caso dos solos parcialmente saturados como predomina em grande parte das estruturas de pavimento o congelamento e variações térmicas da água podem induzir por meio de variações volumétricas alterações na interação entre partículas.

Outra consequência do congelamento é que, diminuído o teor de umidade dos solos já que parte da água se solidificou, aumenta a poropressão negativa ou sucção (resultado da tensão superficial e das forças de adsorção das partículas coloidais) e mais água é atraída para o subleito e o pavimento congelados (Medina e Motta, 2015), o que pode tornar-se um problema quando do descongelamento.

## 2.7 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DA ÁGUA NOS SOLOS

A influência da temperatura nas propriedades e no comportamento dos solos certamente guarda relação direta com a influência da temperatura nas propriedades da água, lembrando que os próprios minerais têm suas propriedades afetadas pela temperatura sendo a variação volumétrica uma delas. Embora não se avalie diretamente a influência da temperatura nas propriedades da água intervenientes nas propriedades e comportamento dos solos, é relevante a observação da Figura 2.21, que apresenta a influência da temperatura: a) no peso específico da água; b) na viscosidade cinemática; c) na tensão superficial; d) na pressão de vapor. Observa-se nesta figura que apenas a tensão superficial se aproxima de uma relação linear com a temperatura.

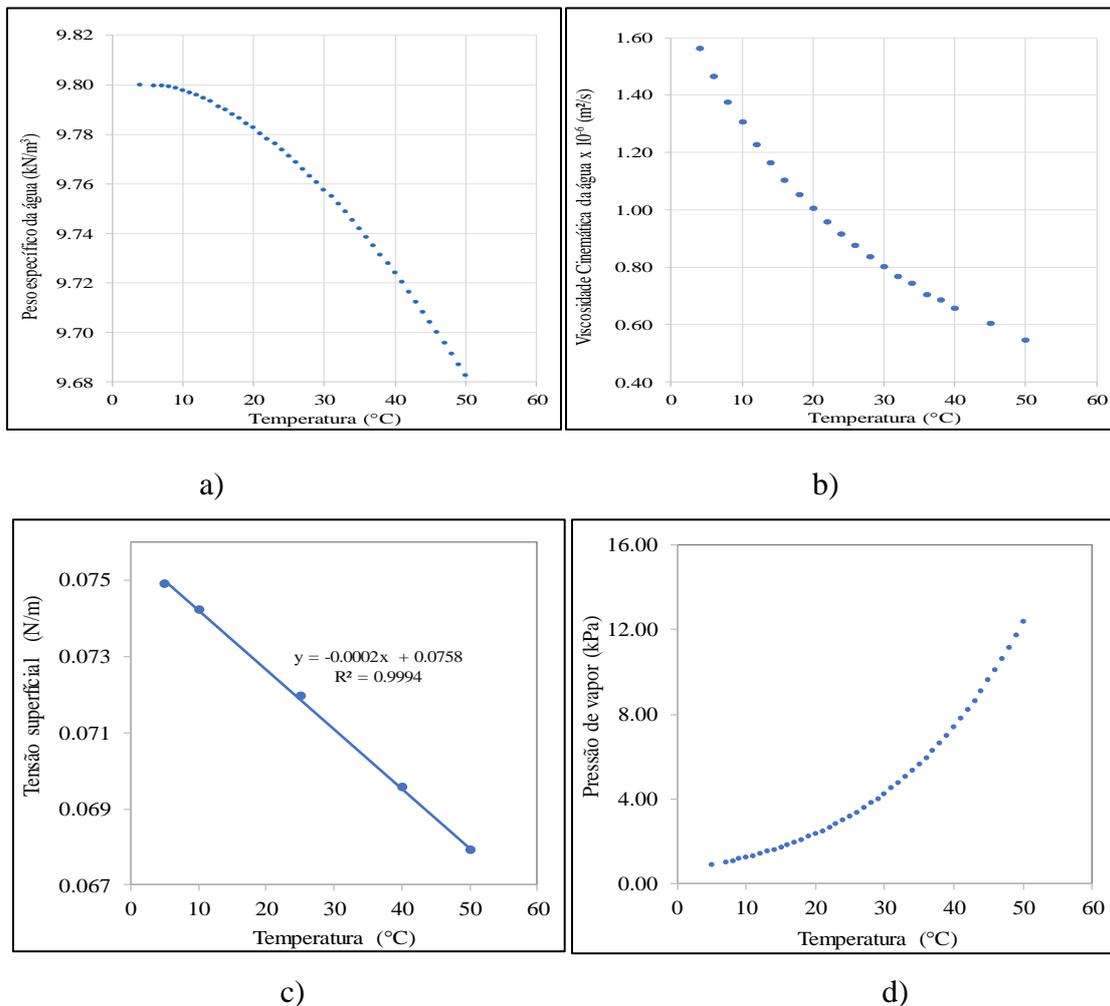


Figura 2.21 – Gráfico da influência da temperatura: a) no peso específico da água; b) na viscosidade cinemática; c) na tensão superficial; d) na pressão de vapor

No fluxo de calor no solo a transferência se dá basicamente pelo fenômeno de “condução”, através do contato direto das partículas do solo, podendo ser expresso pela Lei de Fourier (Fredlund, 2005). O quartzo é caracterizado por um baixo coeficiente de expansão térmica igual a  $5,5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ . Também excelente é a resistência do quartzo ao choque térmico: se aquecido a uma temperatura de  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  e, em seguida, resfriado imediatamente a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  por três vezes, o quartzo não apresenta sinais de ruptura. O quartzo não tem uma temperatura de fusão específica, mas amolece a cerca de  $1630\text{ }^\circ\text{C}$  se comportando como um material plástico. A caulinita tem coeficiente de expansão térmica:  $59,84 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ .

Sendo o quartzo e a caulinita dois minerais frequentemente presentes nas agregações contidas nos solos tropicais essa diferença entre a expansão térmica dos dois minerais potencializa a possibilidade de fissuramento das agregações quando da ação de variações térmicas. Faz-se relevante observar na Figura 2.20a, que o peso específico da água diminui com o aumento da temperatura de forma não linear a) o que gera uma redução no volume da fase ar em um poro com volume total admitido constante, ampliando assim, o grau de saturação e por consequência reduzindo a sucção matricial. Nesta mesma Figura 2.20, se observa que a tensão superficial diminui linearmente com o aumento da temperatura c) potencializando a redução da sucção matricial, ou seja, o seu efeito sobre a sucção matricial com a variação da temperatura é contrário ao da variação do peso específico da água. Como as formas das curvas nos dois casos são distintas, faz com que a influência dos dois fatores não seja linearmente proporcional, podendo predominar um ou outro a depender da variação térmica, e no caso da tensão superficial, da própria natureza do solo.

## **2.8 PROJETO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO**

Há vários métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos no mundo. Há uma tendência na Europa de se estabelecerem catálogos de estruturas, com base em métodos analíticos ou mecanístico – empíricos. Segundo Medina e Motta (2015), a teoria elástica linear predomina assim como os ensaios de carga repetida.

As condições ambientais são importantes para o desempenho dos pavimentos flexíveis, sendo complexa a interação dos fatores climáticos com os materiais e cargas. Os métodos baseados na abordagem empírico-mecanicista servem para dimensionar pavimentos do ponto de vista estrutural, ou seja, de modo a suportar as cargas do tráfego e as influências ambientais

ao longo da vida útil do projeto, no entanto, aspectos climáticos como as variações térmicas diárias e sazonais são quase sempre desprezadas.

Tais aspectos são relevantes para manutenção e segurança de um pavimento e não são geralmente previstos por meio de análises mecânicas ou tensionais. Estes aspectos impactam na evolução de patologias ou defeitos, que se manifestam na superfície do pavimento e que afetam o conforto ao rolamento dos usuários, além de acelerar a degradação da estrutura do mesmo (Santos, 2012).

Cabe destacar que para compor a estrutura de pavimento em regiões tropicais geralmente são utilizados apenas os solos profundamente intemperizados ou solos lateríticos. Os solos de transição e pouco intemperizados quando presentes apenas integram o subleito. Hoje, o subleito é definido em função do Módulo Resiliente (MR) obtido em ensaio triaxial de carga repetida. Porém, ainda se admite caracterizar o subleito por meio do seu valor de CBR ou pelo módulo de reação obtido no ensaio de placa. No estudo são definidas três categorias de MR que variam de 30 a 150 MPa e o tráfego é dividido em seis categorias, medida pelo número de veículos pesados na faixa mais solicitada durante o período de projeto segundo Fritzen (2016).

O pavimento é um sistema de várias camadas elásticas, dimensionando a estrutura de modo que a repetição de esforços não cause, em curto prazo, a ruptura por fadiga dos materiais. Cada camada é constituída de um material diferente (Figura 2.22).

Por definição o módulo de resiliência é determinado pela equação 2.6:

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_t} \quad (2.6)$$

Onde:

Mr = Módulo de resiliência (MPa)

$\sigma_d$  = Tensão desvio aplicada repetidamente (kPa)

$\epsilon_t$  = Deformação específica axial recuperável correspondente a um número de repetições.

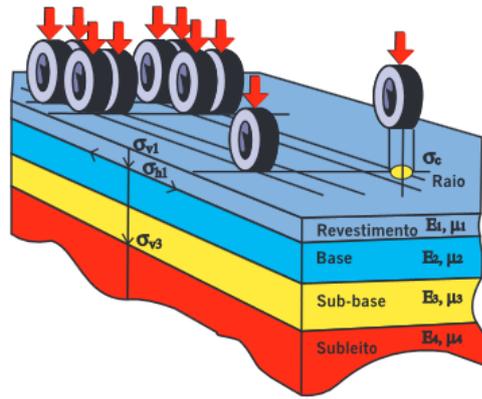


Figura 2.22 – Esquema de camadas de solos com distintos comportamentos elásticos (Bernucci *et al.*, 2010).

Os ensaios triaxiais a cargas repetidas ou cíclicas. O equipamento está composto por um dispositivo de carga pneumática e uma câmara triaxial removível. O sistema permite aplicar 15 pares de tensões de confinamento e tensões desviadoras cíclicas as quais são variáveis ao longo do ensaio assim como está indicado na norma (Tabela 2.4). Também durante o ensaio, dois LVDT são colocados no topo da amostra para possibilitar mensurar as deformações axiais do corpo de prova.

Na Figura 2.23a apresenta um esquema de aplicação de tensões no ensaio triaxial e a Figura 2.23b mostra os deslocamentos sofridos pelo corpo de prova no ensaio triaxial (Fonte: Bernucci *et al.*, 2010).

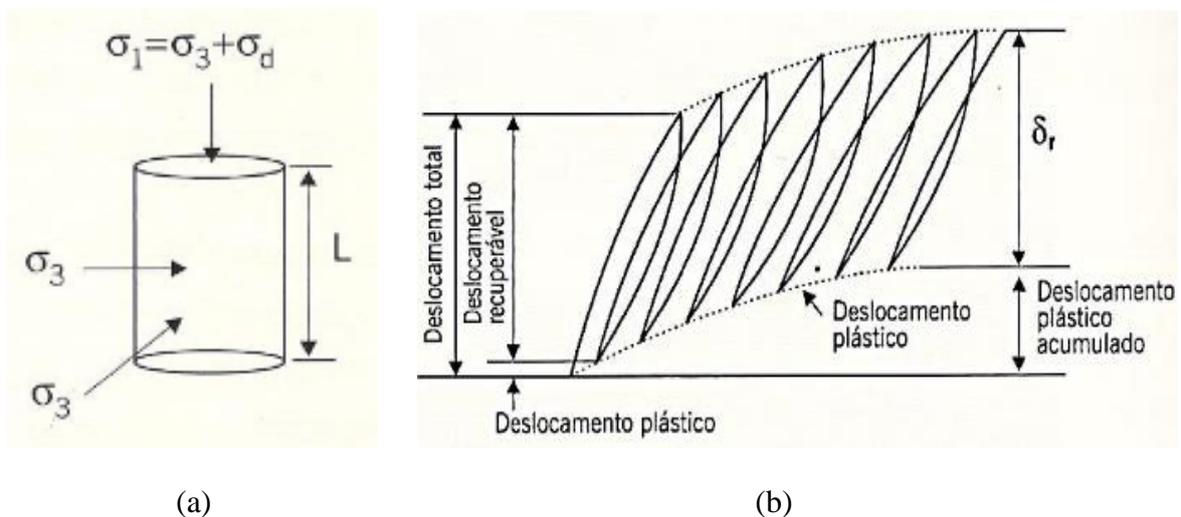


Figura 2.23 – a) Esquema de aplicação de tensões no ensaio triaxial e b) Deslocamentos sofridos pelo corpo de prova no ensaio triaxial (Bernucci *et al.*, 2010)

Na Figura 2.24 apresenta o esquema da montagem da amostra.

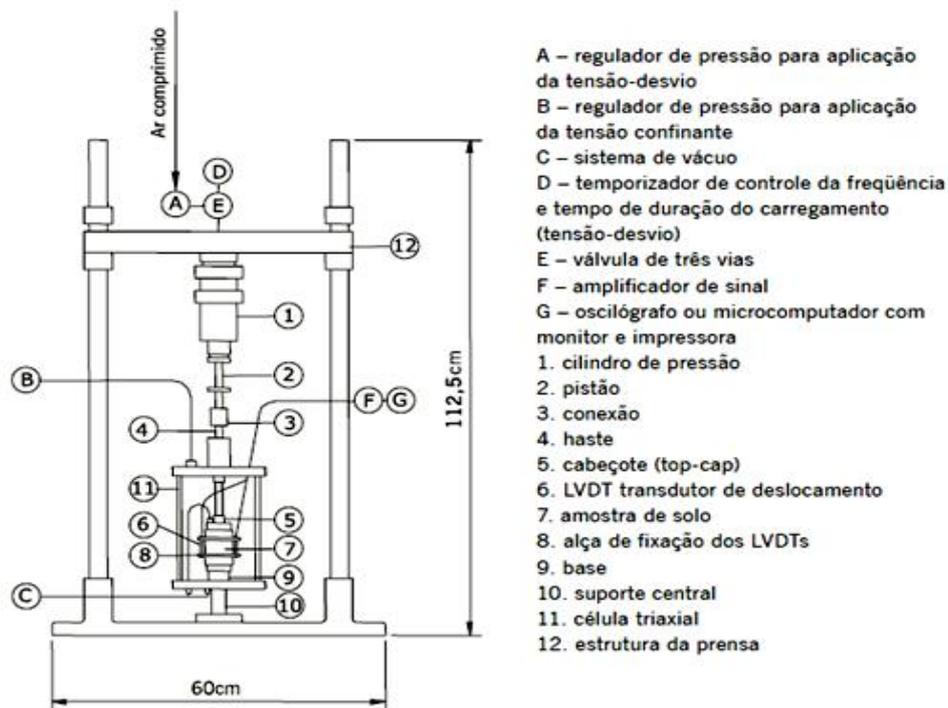


Figura 2.24 – Esquema de esquema da montagem da amostra

Tabela 2.4 – Pares e sequência de tensões para determinação de módulo de resiliência indicados pela norma AASHTO (T 307-99/2007) para solos de base e sub-base

Tensão confinante $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio $\sigma_d$ (kPa)	Razão de tensões $\sigma_3/\sigma_1$ (kPa)
20,7	20.7	2
	41.4	3
	62.1	4
34,5	34.5	2
	68.9	3
	103.4	4
68,9	68.9	2
	137.9	3
	206.8	4
103,4	103.4	1,6
	206.8	2

Tensão confinante $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio $\sigma_d$ (kPa)	Razão de tensões $\sigma_3/\sigma_1$ (kPa)
	309.0	3
137,9	137.9	1,7
	274.7	2
	412.0	3

Córdova e Guimarães (2011), relatam que as deformações resilientes são deslocamentos verticais que aparecem na superfície de rolamento do pavimento, ou ainda no interior de sua estrutura, mediante a aplicação de esforços de maneira intermitente ou transitória e possibilitam que após o cessar das solicitações, a estrutura volte ao seu estado inicial.

Segundo Carvalho *et al.* (2018), para cada material ensaiado o módulo de resiliência pode ser expresso por um modelo matemático que é função do estado de tensões ao qual foi submetido o corpo de prova. Solos arenosos tendem a se comportar segundo um modelo dependente da tensão confinante (Equação 2.7), enquanto que solos argilosos apresentam comportamento mais dependente da tensão desvio (Equação 2.8).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2.7)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2.8)$$

Onde:

$k_1$  e  $k_2$ : constantes de regressão do modelo.

Existe também um modelo, denominado composto, que relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante e tensão desvio (Equação 2.9). Este modelo tem sido muito utilizado nos últimos anos por se adaptar melhor a materiais de granulometrias diversas.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2.9)$$

O procedimento geral consiste em colocar um corpo de prova numa célula triaxial e submetê-lo a uma tensão confinante que representa o confinamento do material esperado abaixo do pavimento. Pulsos de carregamento dinâmico são aplicados no material para simular a

passagem do veículo e a deformação resultante é medida. Para os solos granulares os fatores que afetam o valor do módulo são: número de repetições da tensão desvio, história de tensões, duração e frequência do carregamento e nível de tensões aplicado. Já para os solos finos coesivos, além dos fatores citados para os solos granulares, é importante considerar a condição de compactação.

### **2.8.1 RELAÇÃO ENTRE A SUCCÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SOLO**

As condições ambientais podem influenciar na construção e na vida útil das rodovias, pois elas interferem não só nas condições de execução como na temperatura e umidade de equilíbrio do solo e, por consequência, no próprio comportamento mecânico. A umidade de equilíbrio como indica a própria forma das curvas características solo-água, interfere diretamente na sucção matricial atuante no solo, no entanto, os efeitos da temperatura em si, ainda são pouco estudados, em especial nos solos tropicais.

Vários estudos relacionados com módulos de resiliência e sucção do solo tem sido objeto de investigação, dentre eles temos: Fredlund *et al.* (1977); Motan e Edil (1982) e Philip e Cameron (1995), Gonçalves (1998), Khoury *et al.* (2003), Pintarelli, (2017).

Gonçalves (1998) avaliou a influência da sucção sobre o módulo de resiliência. Neste trabalho, a sucção foi determinada pela técnica do papel filtro, que apresentou um bom desempenho mesmo para altos valores de sucção. Os resultados obtidos indicaram que o módulo de resiliência varia com a variação da sucção. O aumento desta última conduz a um aumento do primeiro. Este crescimento é diretamente proporcional à tensão desvio, ou seja, quanto maior a tensão desvio, maior é o crescimento.

Khoury *et al.* (2003) realizaram um estudo para avaliar o efeito da sucção no módulo de resiliência de solos de subleito coletados no estado americano de Oklahoma. Foram ensaiadas um total de 18 amostras indeformadas de solos para determinação dos valores de MR e de sucção, sendo determinada pelo método do papel filtro. Os solos considerados neste estudo foram classificados de A-4 a A-7, com a classificação AASHTO, e o índice de plasticidade variou de 10 % a 32 % e o limite de liquidez de 28 % a 51 %. Verificaram que o módulo de resiliência aumenta com aumento da sucção total e matricial, revelando a mesma tendência de

variação para ambas as sucções determinadas. Como resultado concluiu-se que a sucção osmótica não apresenta efeito significativo sobre o MR.

Os pesquisadores também investigaram o efeito do teor de umidade sobre o módulo de resiliência, entretanto, não observaram nenhuma tendência específica entre estes fatores, isto pode ser devido ao fato que diferentes teores de umidades podem produzir a mesma sucção matricial, dependendo da curva característica do solo, e dessa forma o mesmo estado de tensão controladora do MR.

Eles concluíram ainda, que o módulo de resiliência se correlaciona melhor com a sucção do solo do que com o teor de umidade, e que a sucção tem um papel vital no comportamento mecânico de solos coesivos do subleito. Tal conclusão se deve certamente ao fato de que o comportamento do solo depende não só do teor de umidade como da porosidade e a sucção se relaciona de modo global com estes dois fatores.

Carregamento aplicado em 0,1 s e o descarregamento em 0,9 s com uma onda Haversine. Segundo Pintarelli, (2017). Confirmou-se também a teoria já apontada por outros autores, de que o número de ciclos correspondente à vida de fadiga da mistura asfáltica obtido a partir de ensaios com ondas haversine se equipara àquele obtido em ensaios realizados com ondas sinusoidais com metade da deformação inicial estabelecida para os primeiros.

Concluiu-se que ensaios realizados com ondas haversine resultam em valores errôneos e superestimados de vida à fadiga de misturas asfálticas. A aplicação destes resultados equivocados ao dimensionamento de pavimentos pode implicar em camadas de revestimento que não suportarão o tráfego previsto sem apresentar danos relativos ao fenômeno da fadiga.

## **2.8.2 INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE SOLOS**

A condição de umidade no subleito dependerá do clima da região em estudo, do equilíbrio entre a precipitação local e a evapotranspiração, da permeabilidade do solo e das condições de drenagem.

O grau de saturação do solo do subleito pode sofrer alterações com o tempo. Estas alterações são provocadas pelos fatores externos, tais como: períodos intensos de chuvas, infiltração de água superficial ou subterrânea e ressecamento do solo (Rodrigues, 1997).

O NCHRP 1-37A (2004) mostra que se todas as outras condições são iguais, quanto maior o teor de umidade menor é o valor do módulo dos materiais não tratados. Entre tanto, a umidade pode atuar de duas formas, sendo elas:

- a) Pode afetar o estado de tensão através da sucção, sendo possíveis que materiais grossos e finos apresentem um aumento de mais de cinco vezes no módulo devido a secagem dos solos;
- b) Pode afetar a estrutura do solo através da destruição da cimentação entre as partículas do solo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os solos, a metodologia e os métodos de ensaio usados nesta pesquisa. Foram utilizados nos ensaios de laboratório seis (6) tipos de solos de um perfil de intemperismo tropical de Brasília com 11 m de profundidade.

#### 3.1 MATERIAIS

Os estudos foram realizados sobre amostras provenientes de um perfil de intemperismo tropical conforme descrito nos itens que seguem.

##### 3.1.1 LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM

As amostras foram coletadas em forma manual de um poço de 12 m de profundidade no ano 2016, localizado no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, em Brasília, Distrito Federal, região Centro-Oeste de Brasil, nas coordenadas geodésicas  $15^{\circ}45'58,8''$  Sul e longitude  $47^{\circ}52'22,5''$  oeste, na altitude de 1051 metros. A Figura 3.1 mostra a localização do poço P realizado para coleta das amostras.

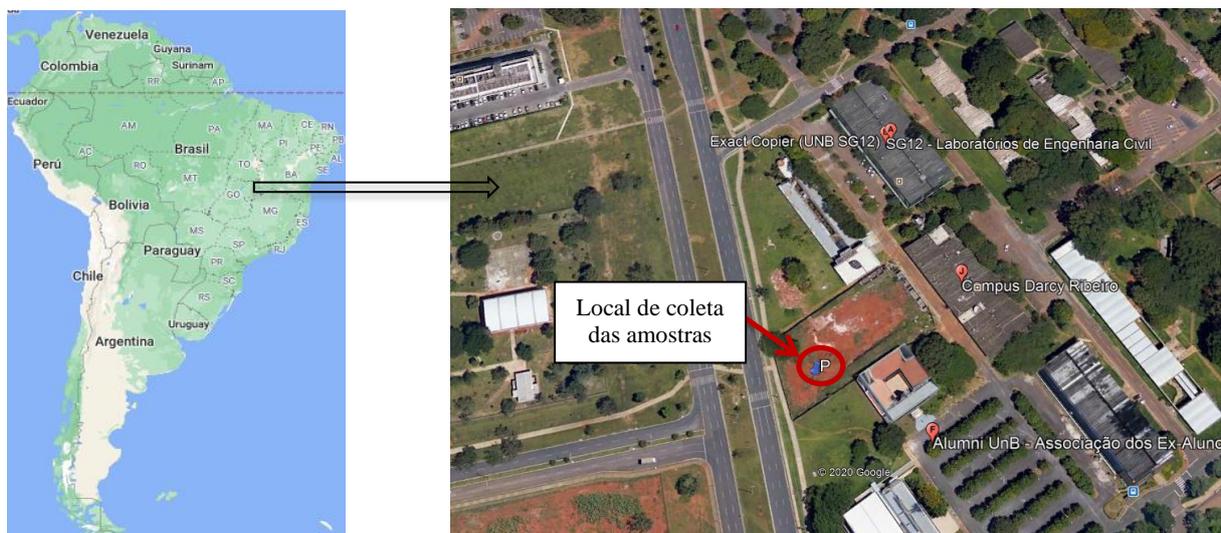


Figura 3.1 – Localização do poço P realizado para coleta das amostras (modificado, Google Earth, 2020)

O perfil de intemperismo no local do poço P em estudo, foi realizado para conhecer os tipos de solos existentes e estudar suas propriedades geotecnicas. As amostras usadas na presente pesquisa foram identificadas pela profundidade de coleta em relação ao topo do poço. Foram elas: 1 m, 3 m, 5 m e 7 m as camadas de solo profundamente intemperizado ou solo

laterítico, 9 m a camada de solo de transição e 11 m a camada de solo pouco intemperizado ou saprolítico. A Figura 3.2 mostra o poço em execução a 1 m de profundidade, onde predomina o solo laterítico.



Figura 3.2 – Poço a 1 m de profundidade, solo profundamente intemperizado.

### 3.1.2 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE SOLO EM ESTUDO

Os solos utilizados nesta pesquisa foram estudados em outras pesquisas (Guimarães 2002, Mascarenha 2003, Mota 2003, Pérez 2017, Rodrigues 2017, Pérez 2018). No presente estudo são utilizadas amostras de solo deformadas e compactadas objetivando fazer um elo com o uso dos solos tropicais em estruturas de pavimento.

Guimarães (2002), concluiu a partir de análises microestruturais por meio do MEV que o subsolo do campo experimental apresentava microestrutura composta na zona mais intemperizada por agregados possuindo macroporos entre eles e microporos no interior deles, estrutura bimodal, e na zona menos intemperizada a distribuição de poros se tornava mais homogênea, estrutura unimodal. O perfil de intemperismo foi dividido em:

- Camada de 0,0 a 3,5 m composta por areia argilosa-siltosa porosa, com predominância de gibbsita, macroporos, e muitos agregados, com alto índice de vazios (entre 1,27 e 1,60), peso específico dos sólidos em torno de  $26,5 \text{ kN/m}^3$  e IP médio de 10.
- Camada de 3,5 a 8,5 m de argila areno-siltosa, zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e macroestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o residual mais jovem a 8,5 m.

- A partir da camada de 8,5 m o solo assume textura mais siltosa, caracterizada por índice de vazios variando entre 0,96 e 1,08, peso específico dos sólidos em torno de 27,4 kN/m<sup>3</sup> e IP médio em torno de 17.

Mascarenha (2003) concluiu que para o perfil de solo analisado não foi encontrado nível d'água freático até 14 m de profundidade. O índice de vazios diminui com a profundidade até 8 m e a partir dessa profundidade tende a aumentar. O perfil de solo apresenta de modo aproximado a mesma plasticidade até 8 m, verificando-se um acréscimo a partir desta profundidade. Esta tendência verificada para o IP mostra que as variações de  $w_p$  e  $w_l$  até a profundidade de 8 m são semelhantes para os dois parâmetros, sendo que para as profundidades de 9 e 10 m  $w_p$  diminui enquanto  $w_l$  sofre um pequeno aumento.

A análise mineralógica caracteriza bem o perfil de intemperismo. O teor de gibbsita diminui com a profundidade até desaparecer na profundidade de 10 m e o teor de caulinita, ao contrário, aumenta com a profundidade (Rodrigues, 2017). O paralelismo entre os teores de gibbsita e de quartzo aponta para o fato de nesse perfil de intemperismos ele ser predominantemente neoformado (Senaha 2019, Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021).

O perfil de solo característico do campo experimental da UnB é mostrado na Figura 3.3.

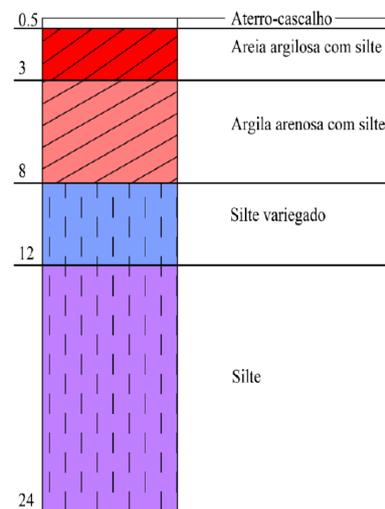


Figura 3.3 – Perfil de solo do campo experimental da UnB (Modificado de Mota, 2003)

A Figura 3.4 sintetiza a subdivisão do perfil de intemperismo estudado em solo laterítico, de transição e saprolítico.

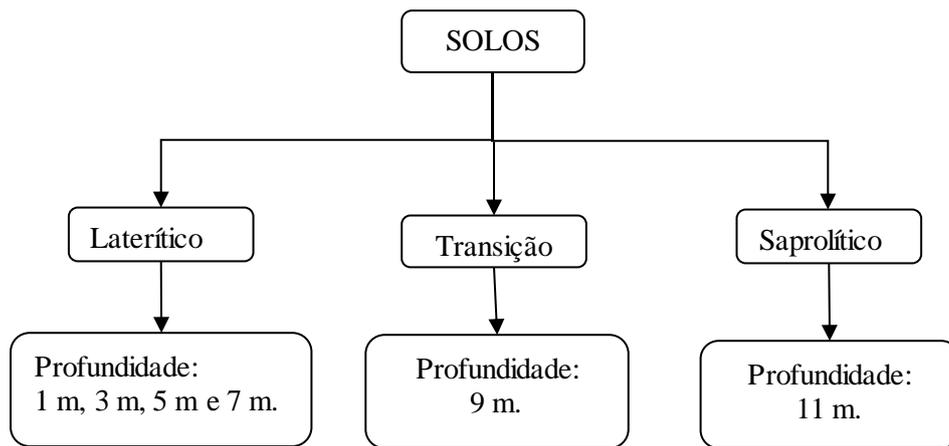


Figura 3.4 – Esquema de solos utilizados e suas características

A Figura 3.5 apresenta imagens dos solos estudados para as seis profundidades analisadas, 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m. As imagens mostradas nesta figura para amostras dos solos compactadas na energia equivalente ao Proctor intermediário foram obtidas por meio de lupa eletrônica adotando-se o aumento de 50 x. Elas indicam alterações texturais ocorridas no solo com o intemperismo atuante ao longo do tempo nas profundidades analisadas nesta tese.

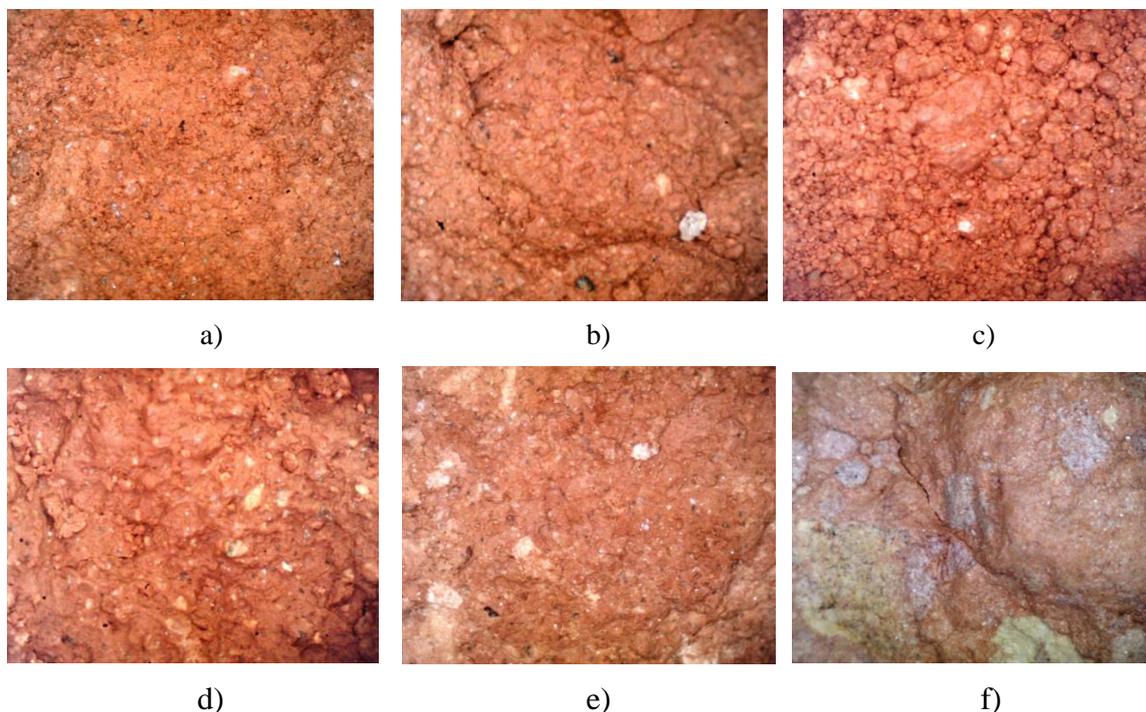


Figura 3.5 – Solo na condição compactada, aumento 50x: a) 1 m, b) 3 m, c) 5 m, d) 7 m, e) 9 m e f) 11 m

A Figura 3.6 mostra o mapa geológico do DF e segundo ele a área em estudo (poço P) encontra-se inserida na unidade ardósia.

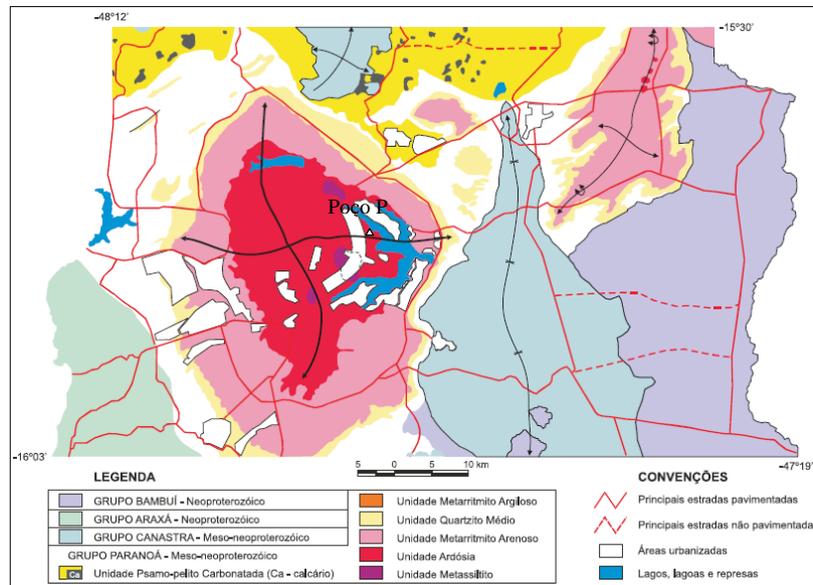


Figura 3.6 – Mapa geológico do Distrito Federal e ponto de coleta da amostra (Modificado, Freytas-Silva e Campos, 1998)

Segundo Pérez (2017), o Distrito Federal apresenta-se em grande parte recoberto por um manto de solo detritolaterítico de idade Terciária – Quaternária formado principalmente de latossolos vermelhos amarelos, conforme a Figura 3.7 onde está o poço P em estudo.

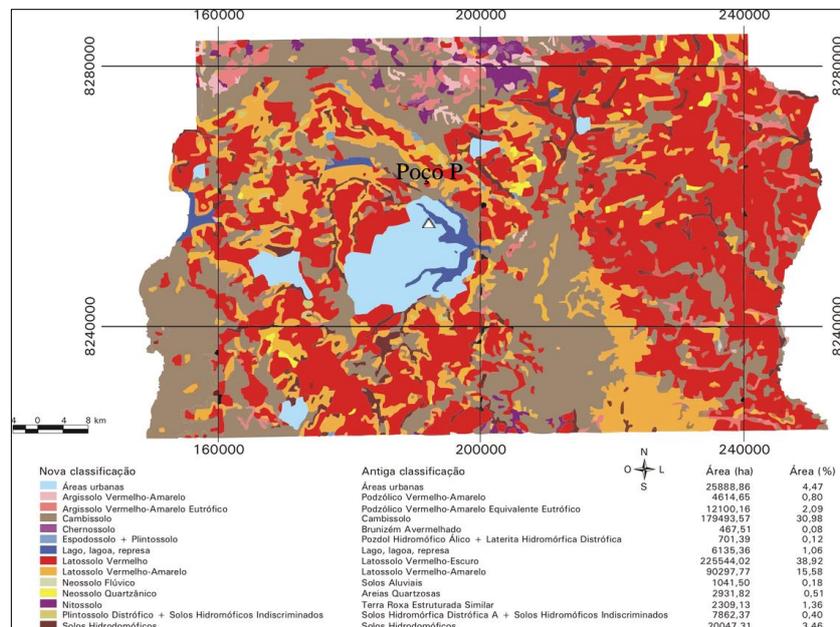


Figura 3.7 – Localização do poço P no mapa de pedológico do Distrito Federal (Modificado, EMBRAPA, 2004)

### **3.2 METODOLOGIA DE ESTUDO**

Nesta seção são apresentadas as metodologias adotadas e principais aspectos dos procedimentos realizados para a execução do programa experimental em laboratório para as seis amostras coletadas a 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m de profundidade.

Para atender aos objetivos da pesquisa e se ter um melhor conhecimento sobre as características geotécnicas dos solos estudados foram analisadas: granulometria, plasticidade, umidade, massa específica dos grãos, compactação mini MCV, resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência, curvas características matricial e total, microscopia de varredura, fluorescência de raios X e difração de raios X.

As amostras foram utilizadas a partir do estado natural, sem secagem prévia. Os solos compactados a temperatura ambiente (25° C) do laboratório, foram submetidos nos ensaios a tratamentos térmicos (Figura 3.8) usando-se câmara climatizada do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília regulada nas temperaturas de 10 °C, 25 °C (temperatura ambiente) e 40 °C a fim de se verificar as mudanças ou não das características geotécnicas dos solos compactados na energia intermediária com as variações de temperatura indicadas.

Ao utilizar-se amostras coletadas a diferentes profundidades em um mesmo perfil de intemperismo pretendeu-se colocar em evidência as influências da temperatura no comportamento geotécnico dos solos submetidos a diferentes graus de intemperização. A Figura 3.8 apresenta o organograma resumo dos ensaios realizados nesta pesquisa.

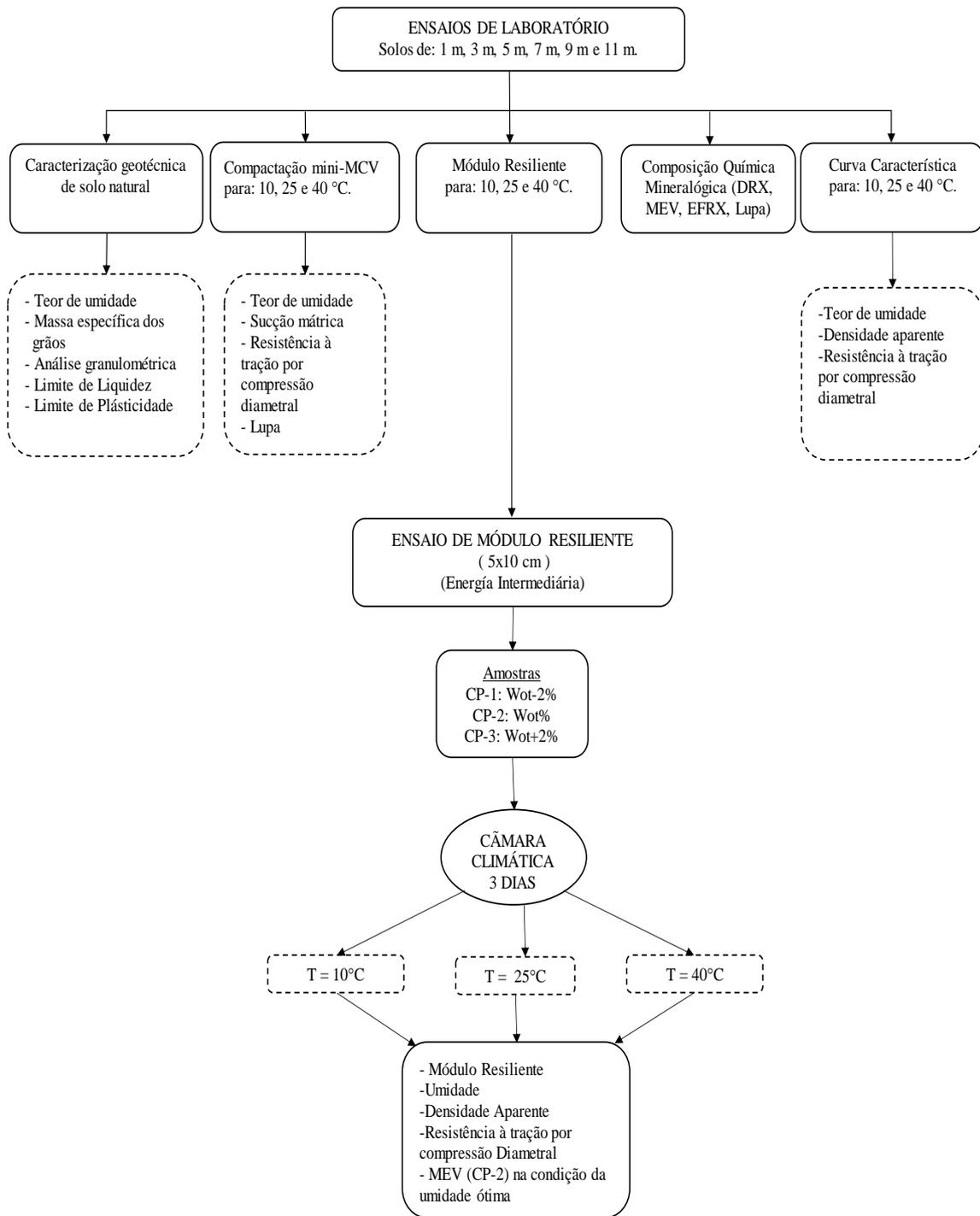


Figura 3.8 – Organograma dos ensaios de laboratório realizados na tese

### 3.3 MÉTODOS DE CURA NA CÂMARA CLIMÁTICA

Para o cumprimento do programa experimental no desenvolvimento da presente pesquisa e para a simulação da variação da temperatura foi usada uma câmara de climatização

com controle de temperatura com as seguintes regulagens: 10 °C, 25 °C e 40 °C. Sendo a primeira e a última temperaturas adotados como valores considerados extremos para os solos da região e 25 °C como temperatura média mais frequente. Na Figura 3.9 apresenta a câmara climática utilizada.



Figura 3.9 – Câmara Climática do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB

A câmara teve como função nesta pesquisa possibilitar a determinação dos ensaios de curvas características de amostras submetidas a diferentes temperaturas (10, 25 e 40 °C), para os solos provenientes de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m de profundidade. Ela foi também utilizada na preparação das amostras para os ensaios de compactação mini MCV, módulo resiliente e resistência a tração por compressão diametral.

As descrições dos principais componentes do equipamento câmara climatizada (Modelo: BASS – UUC 400: 2006), são: a câmara possui sistemas de controle de aquecimento, resfriamento (opcional), umidificação e desumidificação (não foi usado) possibilitando assim controlar as variáveis escolhidas de temperatura e umidade relativa. As faixas da temperatura de trabalho da câmara climatizada usada são: mínima 10 °C a máxima 60 °C.

Nos ensaios triaxiais a cargas repetidas usados na avaliação do módulo resiliente, as amostras foram compactadas nas temperaturas 10 °C, 25 °C e 40 °C, e nos ensaios de resistência à tração a câmara climática foi utilizada apenas para condicionar o estado inicial das amostras

nas temperaturas pretendidas. Os corpos de prova utilizados nos ensaios, foram previamente colocados na câmara climatizada por um período de 15 dias nos casos de determinação da curva característica utilizando-se a técnica do papel filtro sendo em seguida utilizados na determinação da resistência à tração. As amostras submetidas aos ensaios de módulo resiliente foram após compactadas mantidas na câmara climática por um período de três dias (para ter uma temperatura de equilíbrio). As amostras nas umidades pretendidas para realização dos ensaios de mini compactação foram mantidas na câmara climática por um período de 6 horas (só para ter uma temperatura de ensaio).

A Figura 3.10 apresenta o esquema dos tempos de cura na câmara climatizada dos solos estudados, para os diferentes ensaios realizados.

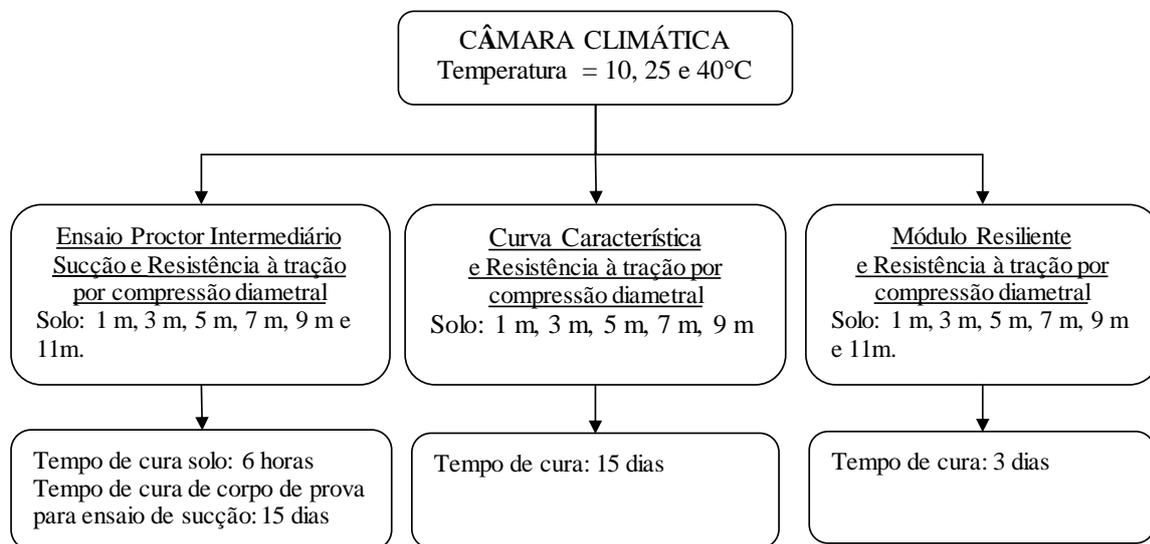


Figura 3.10 – Esquema de cura de solos e/ou corpos de prova

### 3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios de caracterização física das amostras de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m, envolveram a determinação da umidade natural e higroscópica, análise granulométrica pelos métodos do peneiramento mecânico e sedimentação, massa específica real dos grãos ( $G_s$ ), limites de Consistência e avaliação microestrutural por meio de lupa eletrônica. Os ensaios de caracterização (Tabela 3.1) foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB).

Os ensaios de caracterização física (Tabela 3.1) foram realizados com amostras deformadas e secas ao ar até atingir a umidade desejada.

No caso da umidade higroscópica o solo foi seco ao ar nas condições de temperatura ambiente do laboratório até obter a massa requerida e as umidades naturais foram determinadas para todas as amostras no estado em que se encontravam.

O ensaio de densidade real dos grãos ( $G_s$ ) foi realizado com o emprego do penta picnômetro, modelo Pentapyc TM 5200e, da fabricante “*Quantachrome Instruments*”.

A preparação das amostras para realização dos ensaios de densidade real dos grãos ( $G_s$ ), foi realizada fazendo-se uso do ultrassom UP400S marca HIELSCHER para ter uma melhor desagregação dos solos por um período de três minutos. Após esse período os solos eram secos em estufa a 110 °C por 24 horas até seu secado e então submetidos aos ensaios de densidade real dos grãos. Para cada amostra de solo foram efetuadas cinco determinações considerando-se a média dos resultados com a finalidade de se ter um valor representativo.

O penta picnômetro adota o princípio de Arquimedes (deslocamento de fluido) e a lei de Boyle (expansão de gás) para encontrar o volume real do material sólido e com o auxílio de uma balança com precisão de 0,00001 g obtém-se a massa de solo viabilizando-se assim a determinação da massa específica dos grãos do solo. O uso do gás garante uma maior acurácia nos resultados, e embora possam ser usados vários tipos deles, é recomendável usar o gás Hélio devido ao fato que este apresenta um menor tamanho atômico permitindo a penetração em fissuras e poros menores (“*Quantachrome Instruments*”, [s.d.]). O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos da norma ASTM D5550 (2014): “*Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*”.

Tabela 3.1 – Ensaios de caracterização de solos

ENSAIO	NORMA
Determinação do teor de umidade natural e higroscópica.	- NBR 6457 (ABNT, 2016)

Densidade real dos grãos ( $G_s$ )	- ASTM D5550 (2014)
Solo – Análise Granulométrica	- ABNT NBR 7181(2016)
Limite de Liquidez ( $w_l$ )	- ABNT NBR 6459 (2016)
Limite de Plasticidade ( $w_p$ ).	- ABNT NBR 7180 (2016)

### **3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA**

A caracterização química e mineralógica foi realizada nas 6 amostras por meio de análises de Fluorescência de raios X por energia Dispersiva (FRX/EDX), o que depende da sensibilidade da detecção da radiação emitida para cada um dos elementos e utilizando-se a técnica de difratometria de raios X.

Objetivou-se com o estudo a caracterização mineralógica com a finalidade de identificação dos minerais presentes nas seis amostras dos solos estudados de modo a subsidiar as análises das propriedades e comportamentos que apresentam.

#### **3.5.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)**

A análise química por fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada por meio de uma técnica analítica conhecida por espectroscopia de fluorescência de raios-X, que analisa materiais por emissão de raios-X e determina os elementos que compõem os minerais argilosos estudados, exercendo um importante papel na caracterização geoquímica dos minerais.

O ensaio foi realizado na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ). Para a análise química utilizou-se um espectrômetro de XRF/EDX da marca SHIMATZU, modelo EDX 720, que analisa a faixa de elementos que vai do Sódio (11Na) ao Urânio (92U), com tubo de raios X com ânodo de ródio (Rh).

As amostras analisadas foram as seis estudadas. Pesou-se 50 gramas de cada uma delas e secou-se em estufa à temperatura de 110 °C por 24 horas. Após secar o material foi quarteadado,

separando-se a amostra que passou por processo de umedecimento e moagem para confecção de pastilhas prensadas que em seguida foram colocadas em mufla a 1000°C, por 2 horas, para a determinação da perda ao fogo. Após este processo, finalmente foram executados os ensaios por meio do espectrômetro de fluorescência de raios-X.

### 3.5.2 ANÁLISES MINERALÓGICAS DOS SOLOS VIA DRX

O ensaio de Difractometria de Raios X (DRX) é uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos e sendo assim foi a técnica escolhida para o conhecimento mineralógico dos solos em estudo.

O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Difractometria de Raios – X, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, localizado em Brasília-DF. O modelo do equipamento é o New-X-Ray Diffractometer System Geiger Fiex D-Max-B Series Mult CPU System da Rigaku. A amplitude angular usada foi de  $2\theta$  com intervalo de medida de 2-100°, velocidade de 0,05°/min e sob voltagem de 35 kV e 15 mA.

O ensaio de DRX compreende três etapas: preparação das amostras, análises com equipamento e finalmente a identificação dos minerais no difratograma. As análises foram realizadas com amostras naturais e secas em estufa à 105°C, moídas e peneiradas na peneira #200 (0,074 mm). Após destorroamento (Figura 3.11a), os materiais foram depositados nas lâminas de vidro (Figura 3.11b) e encaminhadas para análise no equipamento. A identificação mineralógica foi feita com os padrões de referência do banco de dados do software JADE 9.0.



a)

b)

Figura 3.11 – a) Preparação de amostras com destorroamento; b) Solos em lâminas de vidro preparadas para análise no DRX

### 3.5.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL (MEV)

As análises microestruturais foram realizadas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com aumentos que podem atingir ampliações superiores a 5000 vezes a depender da amostra e qualidade da metalização.

O MEV utilizado foi um equipamento à alto vácuo e a própria metalização já impõe a necessidade de desidratação do solo o que pode perturbar a sua estrutura inicial. Utilizou-se nas análises o Microscópio Eletrônico de Varredura de marca JEOL JSM-7000F, *Field Emission Scanning Electron Microscope* (Figura 3.12a). Na Figura 3.12b, pode-se observar as amostras fixadas ao suporte metálico do equipamento de microscópio eletrônico de varredura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília (IB/LMM-UnB).

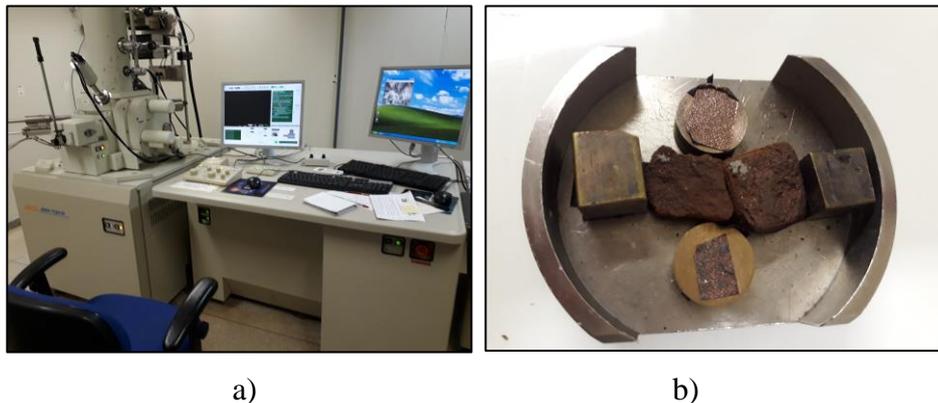


Figura 3.12 – a) Equipamento de microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Biologia da UnB; b) Amostras de MEV metalizadas.

Para o procedimento da preparação das amostras para a análise no MEV utilizou-se solos compactados, formando cubos com aproximadamente 10 mm de lado. Utilizou-se nas análises amostras provenientes de ensaios de módulo resiliência compactados na umidade ótima, com grau de compactação de 100% e previamente submetidas às temperaturas de 10, 25 e 40°C. As amostras foram previamente secas em estufa na temperatura de 40 °C por 8 horas e em seguida metalizadas. As imagens obtidas dos ensaios MEV foram analisadas qualitativamente na forma macro e micro de modo estimativo quantitativamente.

Nas análises qualitativas da forma macro foram realizadas avaliações da distribuição de poros, análises de texturas e de homogeneidade entre outros fatores estimáveis visualmente. Para isso, empregaram-se as imagens de menores aumentos do MEV.

### **3.6 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA**

A caracterização do comportamento mecânico dos seis solos estudados consistiu na realização de ensaios de compactação, módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral.

#### **3.6.1 COMPACTAÇÃO MINI-MCV**

Os ensaios foram realizados seguindo a norma DNER-ME 228/94 - Solos compactados em equipamento miniatura, utilizando-se a energia de compactação intermediária (6 golpes com o soquete pesado de cada lado do corpo de prova).

A preparação dos corpos de prova consistiu em secar as amostras naturais no ramo seco até se atingir a umidade necessária e desejada para a compactação e no ramo úmido acrescentando água 48 horas antes de fazer o ensaio de compactação. Adotou-se diferenças de umidade entre os pontos da curva de compactação de aproximadamente 2%. A fim de garantir a homogeneização da umidade dos solos, deixou-se amostras em sacos plásticos fechados na câmara climatizada por 48 horas.

As curvas de compactação foram determinadas no Laboratório de Geotecnia da UnB, onde os corpos de prova foram compactados na energia intermediária, foram aplicados 6 golpes na face superior logo, após a inversão do corpo de prova, mais 6 golpes na outra face, com auxílio de compactador manual e de acordo a norma. As dimensões aproximadas dos corpos de prova são: 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A justificativa para o emprego deste tamanho de corpo de prova está relacionada ao fato das amostras de solo estudadas se tratar de solos finos.

Foram feitas compactações de seis corpos de prova na temperatura de 25°C, seis na de 10°C e outras na temperatura de 40°C, a fim de determinar o peso específico aparente seco e a umidade ótima para as seis amostras de solo submetidos às temperaturas estudadas e com 6 horas de permanência na câmara climatizada, previa à compactação.

### 3.6.2 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de Módulo de Resiliência foi feito de acordo às normas DNIT-134/2018 (DNIT 2018b) e DNIT – 181/2018 (DNIT 2018c). A preparação das amostras foi realizada seguindo a metodologia de compactação DNER-ME 228/94 (DNER, 1994b).

No ensaio triaxial a cargas repetidas (Figura 3.13c), a tensão vertical ou tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) é aplicada no topo da amostra, sempre no sentido de compressão, de forma cíclica, promovendo carregamentos e descarregamentos repetidos, dependendo da frequência e magnitude que se deseja. Para as amostras estudadas foram moldados 3 corpos de prova na energia intermediária medindo 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura (Figura 3.13a), com massa específica aparente seca máxima na condição de umidade ótima e com umidades: ótima – 2 % e ótima + 2 %. Na Figura 3.13b, pode se observar a montagem do corpo de prova na célula triaxial.

Após cada ensaio de módulo resiliente, o corpo de prova foi dividido em três partes: para ensaio de densidade aparente e umidade e outra parte do CP foi submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Na condição ótima retirou-se amostras na análise no MEV.

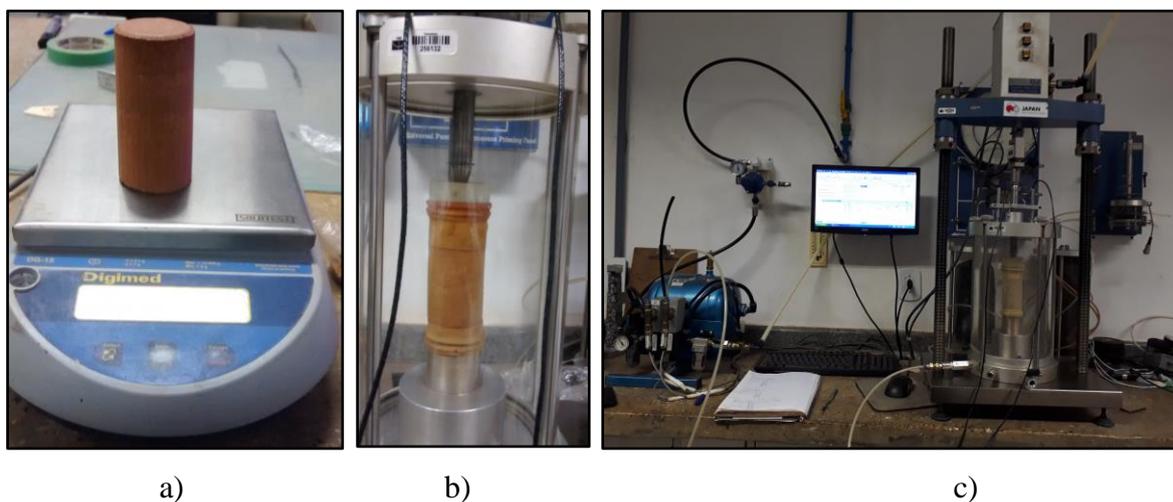


Figura 3.13 – a) Corpo de prova para ensaio MR, b) Corpo de prova na célula triaxial e c) Equipamento triaxial cíclico

Os ciclos de carregamento e as tensões e deformações são armazenados em um sistema de aquisição de dados. A frequência de aplicação de carga adotada foi 1,0 Hz. O programa para saída de resultados é UTM-41 V.2.04, *Modulus Resilient Test*, (Figura 3.14).

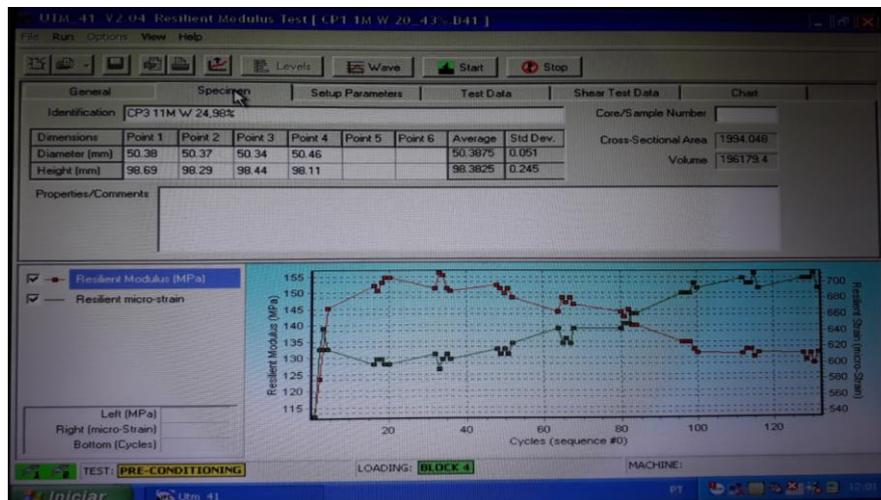


Figura 3.14 – Dados y resultados de ensaio no programa UTM-41

### 3.6.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – RTCD

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral consiste na aplicação de uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo da geratriz da amostra com a geração de um estado de tensões formado por tensões de tração e compressão, aplicadas na região do plano que contém a carga aplicada (Figura 3.15).

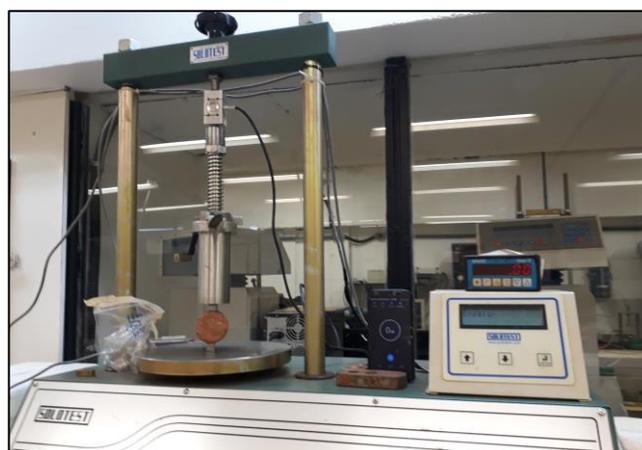


Figura 3.15 – Corpo-de-prova colocado no equipamento de Resistência a Tração por Compressão Diametral

O objetivo deste ensaio foi a obtenção dos valores de resistência à tração para solos não saturados em diferentes umidades e temperaturas.

O ensaio de resistência a tração - RTCD, foi feito seguindo a norma DNER-ME 181 (DNER, 1994c) e DNIT-ME 138 (DNIT-IPR, 2018). Os corpos de prova foram preparados seguindo a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994b).

Para ter um melhor entendimento do comportamento dos solos compactados, após realizado o ensaio de sucção para as temperaturas de 10, 25 e 40°C, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração simples indireta por meio do ensaio de compressão diametral buscando-se manter esta temperatura até a fase de montagem e execução dos ensaios.

Adotou-se no ensaio a velocidade de 1 mm/min. Para esse ensaio foram usados os mesmos corpos compactados do ensaio de compactação mini-MCV e os mesmos corpos de prova usados nas determinações das curvas características de retenção de água e de módulo resiliente. Após a ruptura foi feito o ensaio de densidade aparente com uso da balança hidrostática de acordo com a norma NBR -10838/2016.

### **3.7 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA**

Nesta pesquisa as curvas características de retenção de água dos solos estudados foram obtidas com determinações da sucção matricial pela técnica do papel filtro (contato pleno) utilizando-se corpos de provas compactados na condição ótima da energia Proctor intermediária e variando-se em seguida a umidade (secando ao ar e controlando com pesagem os corpos de prova) de modo a se obter pontos representativos da curva característica de retenção de água como um todo.

Determinou-se as curvas características de retenção de água correspondentes à sucção mátrica. Os ensaios de sucção foram realizados de forma sequencial para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C, a fim de avaliar a hipótese da influência da temperatura no ensaio de sucção desses solos.

Para determinar a sucção mátrica pelo método de papel filtro, foram usados três papéis filtro sobrepostos, o primeiro deles colocado em contato direto com o corpo de prova por ser passível de contaminação não é usado na determinação da sucção. Já os outros dois papéis são usados para determinar a sucção de cada corpo de prova, sendo o do meio o principal e o outro

usado para eventuais correções que se fizerem necessárias (Figura 3.16). No geral seguiu-se a metodologia exposta pela norma americana ASTM D 5298-10 (2016).

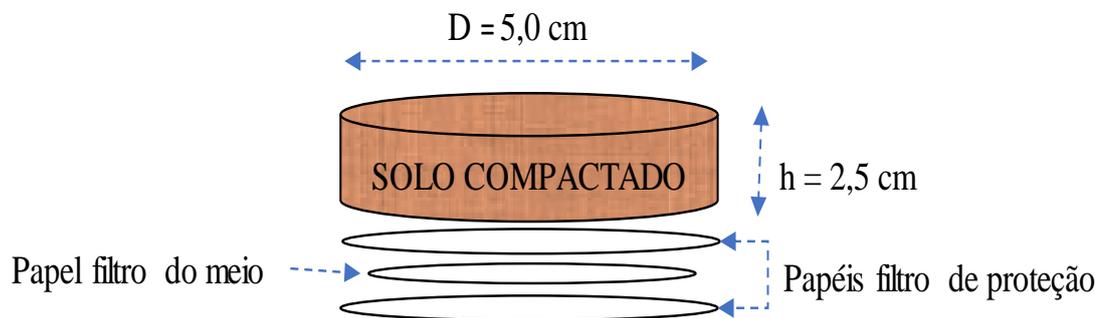


Figura 3.16 – Montagem do ensaio de determinação da sucção pela técnica do papel filtro

Inicialmente foram determinados a altura, o diâmetro e o peso do corpo de prova compactado na energia intermediária e que tem a umidade desejada. Em seguida foram colocados os três papéis filtro (Figura 3.16) e envolvido o conjunto em filme plástico e preso ao final com fita adesiva e colocadas em um recipiente metálico com tampa e as amostras guardadas na câmara climatizada por 15 dias. Após esse período, os papéis filtro foram removidos com o uso de uma pinça e pesados em balança com acurácia de 0,0001g. Os papéis foram secos em estufa por 3 horas a uma temperatura de 110 °C. Depois desse tempo, procedeu-se à pesagem de cada papel filtro seco obtendo-se as respectivas umidades dos papeis utilizadas nas determinações das sucções fazendo-se uso das curvas de calibração.

Para a realização dos ensaios de sucção foram utilizados 36 corpos de prova compactados com aproximadamente 5,0 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura (cada ponto de compactação a amostra foi dividida em duas partes iguais e colocado um separador entre elas). Os corpos de prova foram dispostos em 3 conjuntos de 12 corpos de prova, o primeiro para a temperatura de 10 °C, o segundo para temperatura de 25 °C e finalmente o terceiro para a temperatura de 40 °C. Desta forma obtiveram-se 12 pontos para o gráfico de cada curva característica de retenção de água. Os corpos de prova utilizados nas determinações das sucções pelo método do papel filtro, foram utilizados também para o ensaio de tração por compressão diametral, teor de umidade e densidade aparente.

Após compactados todos os corpos de prova com a energia intermediária e com o teor de umidade ótimo uma parte passou por secagem e outra parte por molhagem, obtendo-se assim uma curva característica do tipo mista. Para realizar a molhagem foi utilizada uma seringa de 5

ml e feito o gotejamento nas amostras até atingir a umidade desejada, já calculada previamente a partir dos índices físicos. Para o processo de secagem, os corpos de prova foram deixados ao ar até atingir a umidade desejada e seu controle foi feito por medidas de peso sucessivas. Após os corpos de prova atingirem as umidades desejadas, começou-se o processo de montagem do sistema.

Todos os ensaios de sucção foram realizados com papel filtro quantitativo JP 42 Faixa Azul “Quanty” cujas especificações técnicas são: 80 g/m<sup>2</sup> e permeabilidade ao ar de 3 l/s.m<sup>2</sup>, cinza 0,00021 g, maioria dos poros 8 µm, com procedência alemã. A condição inicial do papel é seco ao ar sendo feita a remoção direto da caixa, e os cortes preparatórios em seguida.

Para o cálculo da sucção usou-se as equações de calibração do Papel filtro Quanty obtidas por Leong *et al.* (2002) para condições de temperatura ambiente, que apresentam as equações de calibração nas quais *w* é a umidade do papel filtro mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Equações de calibração da sucção definidas por Leong *et al.* (2002)

Umidade	Equação da Sucção (kPa)	Equação da Sucção (kPa)
	Para $w > 50\%$	para $w \leq 50\%$
Gravimétrica (25 °C):	$Sucção (kPa) = e^{[(128,77 - w) / 16,48]}$	$Sucção (kPa) = e^{[(83,617 - w) / 7,017]}$

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com este estudo, pretende-se chegar a um maior conhecimento e melhor entendimento da influência térmica sobre as propriedades e comportamento dos solos tropicais e assim melhor entender a influência das mudanças de temperatura no desempenho em estruturas de pavimento de diferentes tipos de solos tropicais estudados na condição não saturada.

Este capítulo tem por objetivo apresentar e analisar os resultados dos ensaios realizados para caracterização química, mineralógica e física, para o estudo do comportamento mecânico com ensaios de módulo resiliente, resistência à tração por compressão diametral e para a definição da curva característica de retenção de água matricial de solos coletados em um perfil de intemperismo tropical nas profundidades de: 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m quando submetidos a temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C.

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

#### 4.1.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Os resultados das análises químicas e os elementos encontrados nesta pesquisa para o perfil de solo em estudo considerando-se todas as profundidades (Figura 4.1).

Na Figura 4.1, pode-se observar que de 1 m até 5 m tem um maior conteúdo médio de Alumínio (41,5%), Ferro (31,1%) e Sílica (23,3%). Para 7 m e 9 m o conteúdo de Sílica aumenta (35%) e diminui os conteúdos de Alumínio (32,1%) e Ferro (26,1%). A 11 m o solo continua aumentando o teor de sílica (39,1%) e diminuindo o de Alumínio (24,2%) e de Ferro (17,7%). O potássio que surge de modo mais notório aos 5 m, seu teor é ampliado para (14,4%) na profundidade de 11 m.

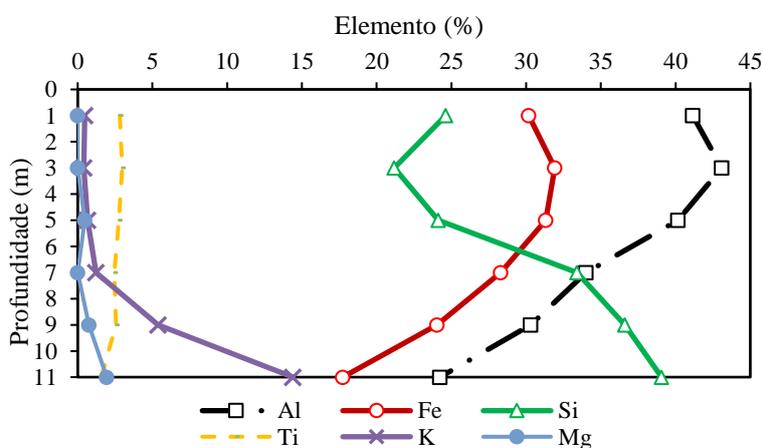


Figura 4.1 – Composição Química dos Solos

Constata-se na Figura 4.2a que o teor de ferro se relaciona diretamente ao teor de alumínio o que conduz à hipótese de que o Fe presente no solo advém dos argilominerais e provavelmente não passou por processo de lixiviação. Já a Figura 4.2b mostra que o teor de silício aumenta com a diminuição do teor de alumínio, vinculando os dois elementos as transformações mineralógicas sofridas pelo solo.

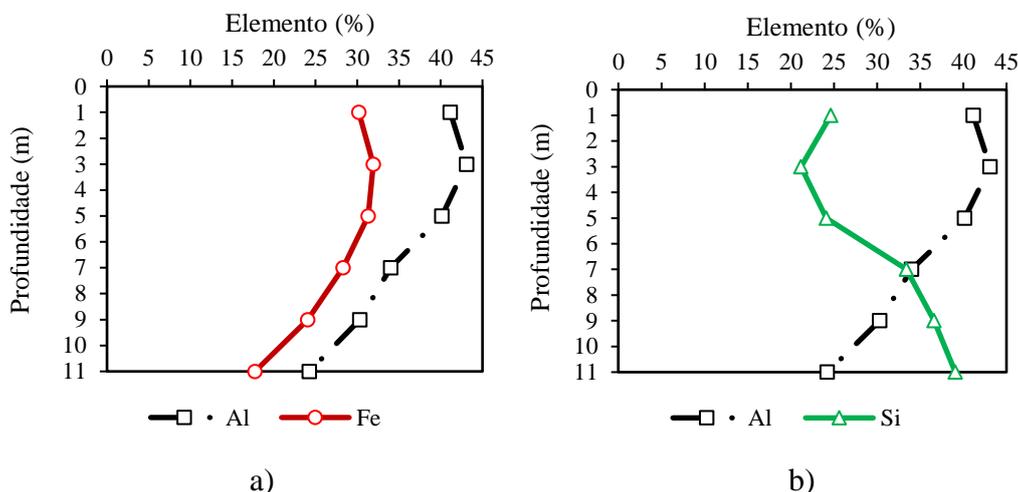


Figura 4.2 – Gráfica: a) Ferro e Alumínio, b) Alumínio e Silício

Estes resultados além de guardarem coerência com a mineralogia do perfil de solo (Guimarães 2002, Rodrigues 2017, Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021).

#### 4.1.2 ANÁLISES MINERALÓGICA DRX

A técnica usada foi o método do pó. Os resultados do ensaio de DRX estão nas Figuras 4.3 a 4.9 para as amostras de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m respectivamente. Nestas Figuras constam os resultados obtido para a fração total (tot); fração argila orientada (n); solvatação da fração argila com etileno glicol (eg); Solvatação da fração argila com glicerol e aquecimento (gl). Pode-se observar que a intensidade de pico e por consequência o teor de caulinita e de gibbsita (Figuras 4.3, 4.4 e 4.5) nos solos está relacionada aos teores de silício e alumínio (Figura 4.1), observando-se que maior o teor de alumínio e menor o de silício maior o de gibbsita e menor o de caulinita (Figura 4.2b).

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram que o teor de gibbsita diminui com o aumento da profundidade do perfil de intemperismo e já não se faz presente no solo saprolítico. Ao contrário

a intensidade do pico da caulinita aumenta com o aumento da profundidade e a ilita que apenas se fazia presente como traço na profundidade 7 m se apresenta em quantidade significativa à 11 m de profundidade.

Resalta-se ainda as variações nas intensidades dos picos de quartzo que tendem a diminuir com o aumento da profundidade já se fazendo pouco presente na profundidade de 11 m no solo saprolítico confirmando as análises realizadas por Rodrigues (2017) e o fato apontado por Senaha (2019) e exposto em Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) de que o quartzo presente no perfil é sobretudo neoformado. Estes resultados de mineralogia são, portanto, coerentes com o processo de intemperização que diminui em intensidade na medida em que se aprofunda no perfil.

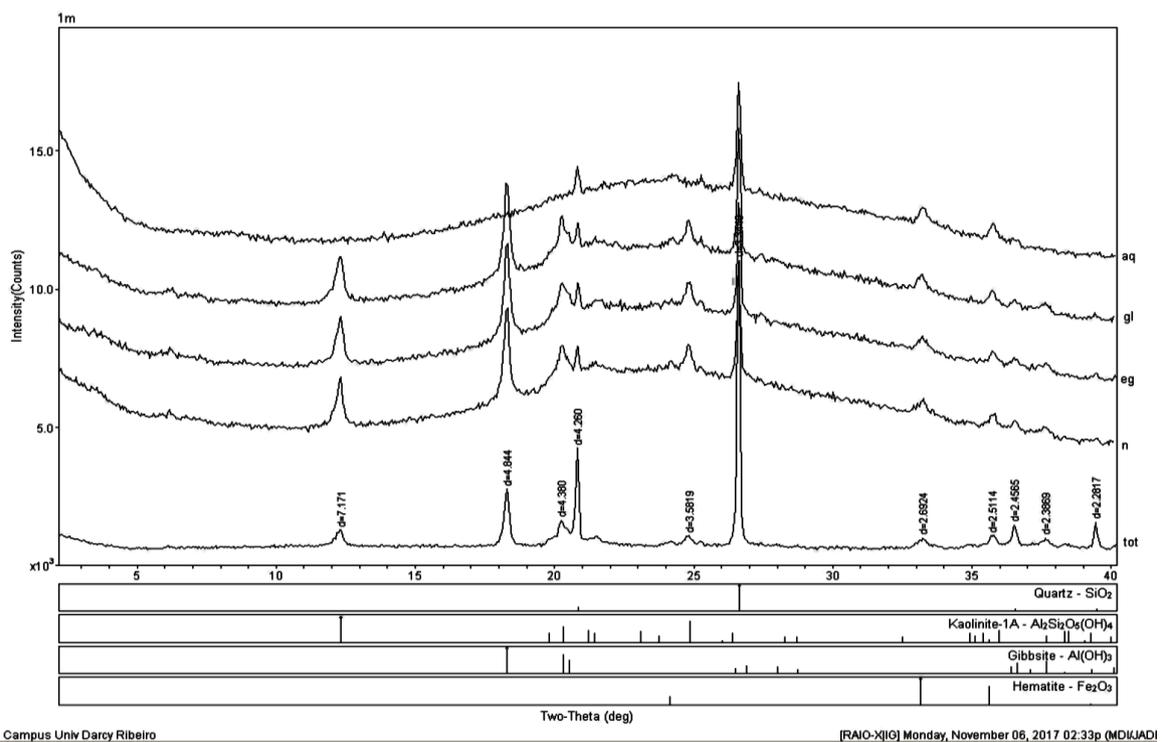


Figura 4.3 – Difratoograma para a profundidade de 1 m, solo laterítico

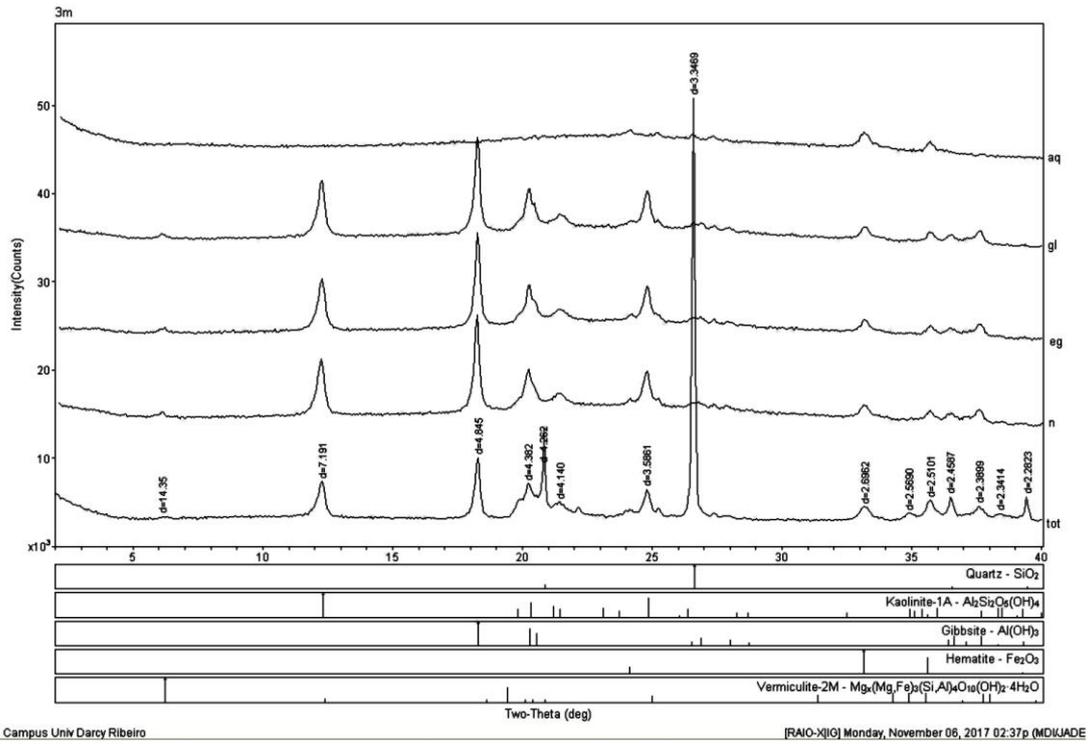


Figura 4.4 – Difratoograma para uma profundidade de 3 m, solo laterítico

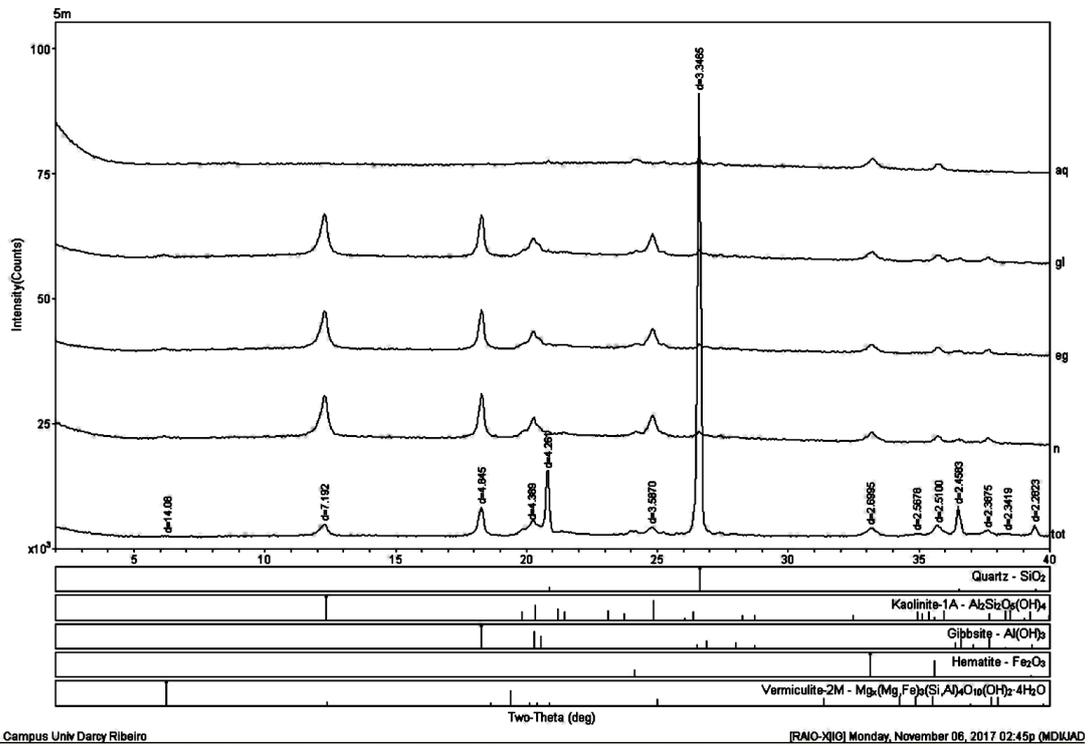


Figura 4.5 – Difratoograma para uma profundidade de 5 m, solo laterítico

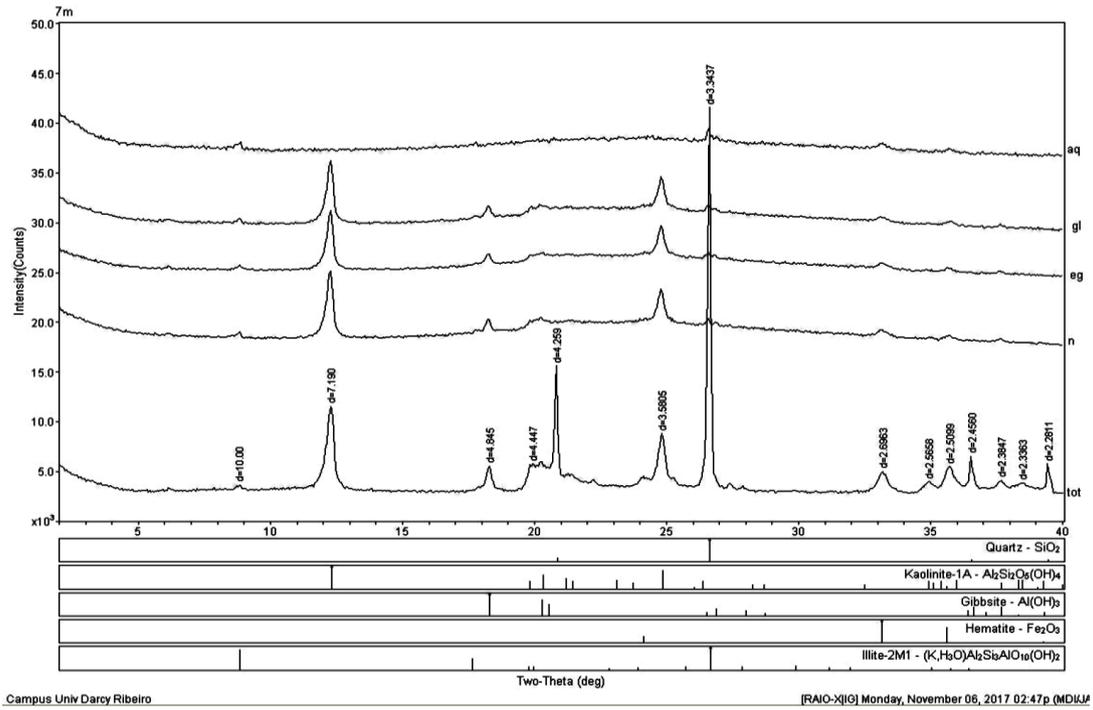


Figura 4.6 – Difratoograma para uma profundidade de 7 m, solo laterítico

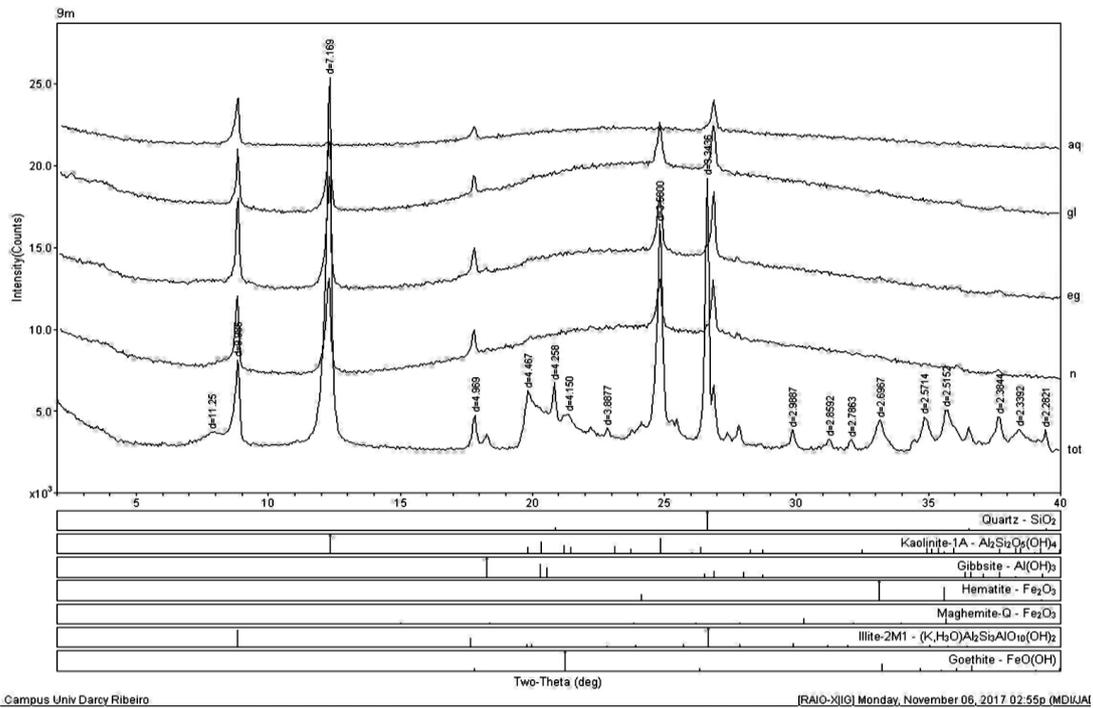


Figura 4.7 – Difratoograma para uma profundidade de 9 m, solo de transição

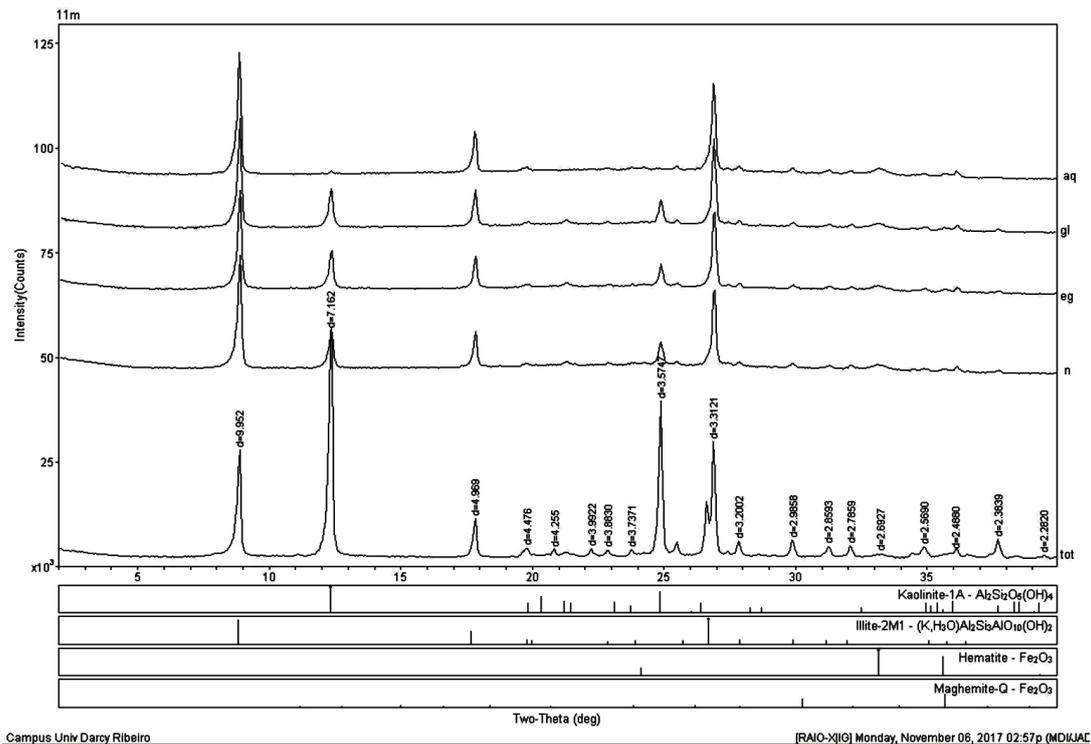


Figura 4.8 – Difratoograma para uma profundidade de 11 m, solo saprolítico

Altos teores de gibbsita e hematita favorecem a agregação do solo na forma de estrutura granular fina e muito estável (Campos *et al.*, 2008) com distribuição de poros bimodal.

A Tabela 4.1 sintetiza as composições mineralógicas ao longo do perfil de intemperismo tropical analisado.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de DRX

Profundidade (m)	Principais minerais encontrados
1	Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Gibbsita Al(OH) <sub>3</sub> , Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).
3	Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Gibbsita Al(OH) <sub>3</sub> , Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) e Vermiculita 2M.
5	Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Gibbsita Al(OH) <sub>3</sub> , Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Vermiculita 2M.
7	Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Gibbsita Al(OH) <sub>3</sub> , Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Ilita (KH <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
9	Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Gibbsita Al(OH) <sub>3</sub> , Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Maghemita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Ilita (KH <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> , Goethita FeO (OH).
11	Caulinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Ilita (KH <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> , Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y Maghemita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .

Observando-se os resultados de análise mineralógica tem-se como sequência evolutiva no processo de intemperização:

**Ilita =====> Caulinita =====> Gibbsita e Quartzo**

#### **4.1.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS APÓS ENSAIO MÓDULO DE RESILIENCIA ÀS TEMPERATURAS 10, 25 E 40°C**

A MEV é usada para a análise microestrutural dos materiais sendo possível diferenciar os solos profundamente intemperizados (solos lateríticos) dos pouco intemperizados (solos não lateríticos). Para Nogami e Villibor (1985), na microestrutura dos solos lateríticos os grãos individualizados são difíceis de serem distinguidos, mesmo com aumento de 5000 vezes no MEV. Na fase de preparação após a permanência por três dias na temperatura desejada e serem submetidas aos ensaios de módulo resiliente as amostras foram secas ao ar por dois dias e depois metalizadas. Serão apresentadas nesse item as imagens obtidas na MEV para um aumento de 5000 x complementadas com outras ampliações considerando-se os planos horizontais e verticais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de módulo resiliente.

De um modo geral percebe-se um certo fechamento dos poros com o aumento da temperatura em especial para os solos profundamente intemperizado coletados à 3 m (Figuras 4.11 e 4.12), 5 m (Figuras 4.13 e 4.14) e 7 m de profundidade (Figuras 4.15 e 4.16), o que sugere uma modificação na interação entre os agregados presentes nos solos profundamente intemperizados em consequência das variações térmicas apesar de tal modificação não ficar tão claro para a amostra coletada a 1 m de profundidade com o aumento de 5000 x (Figuras 4.9a, b, c e 4.10a, b, c), no entanto, ela se torna mais evidente para a ampliação de 500 x (Figura 4.10d, e, f).

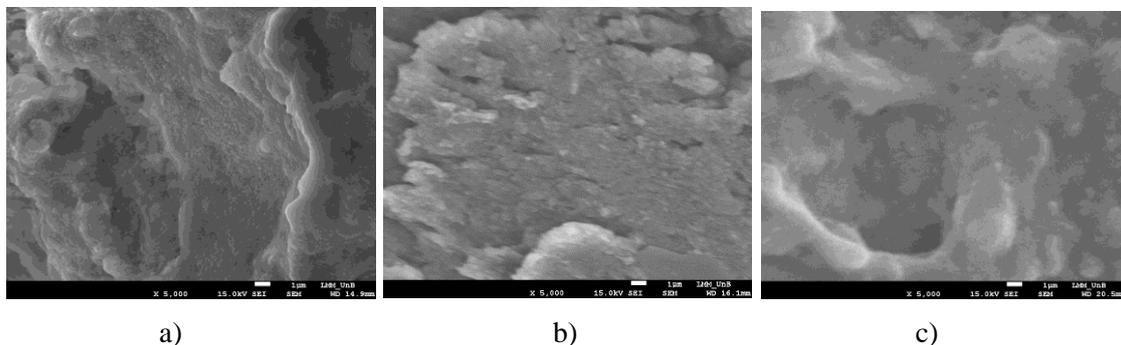
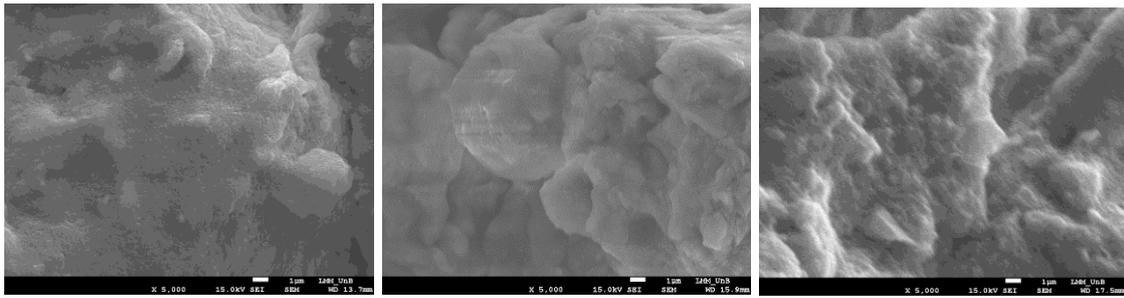


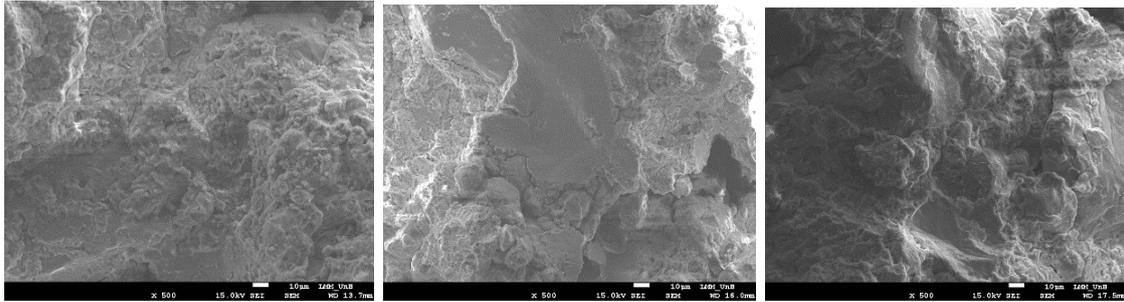
Figura 4.9 – Solo de 1 m, MEV (5000x), vista horizontal: a) 10 °C, b) 25 °C e c) 40 °C



a)

b)

c)

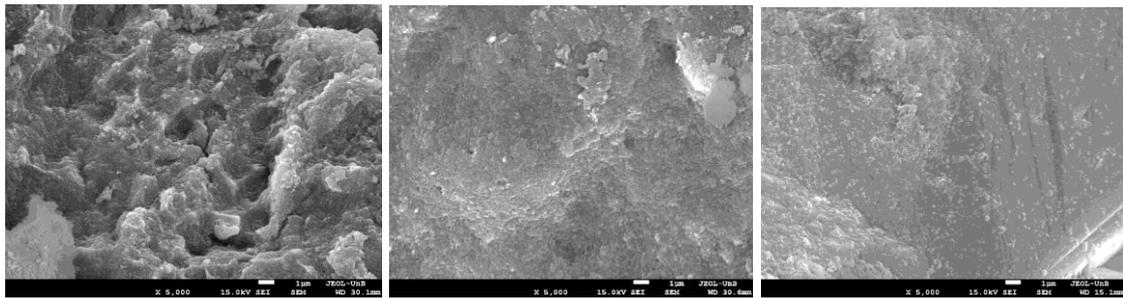


d)

e)

f)

Figura 4.10 – Solo de 1 m, MEV (5000x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C e 1 m, MEV (500x), vista vertical: d) 10°C, e) 25°C e f) 40°C

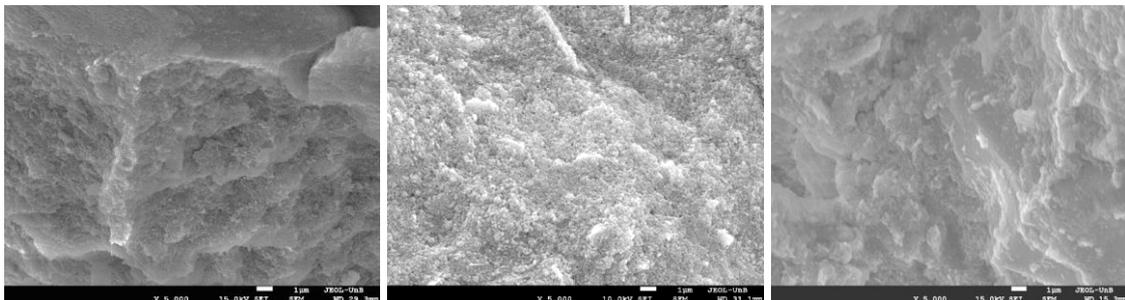


a)

b)

c)

Figura 4.11 – Solo de 3 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C



a)

b)

c)

Figura 4.12 – Solo de 3 m, MEV (5000x), vista vertical : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

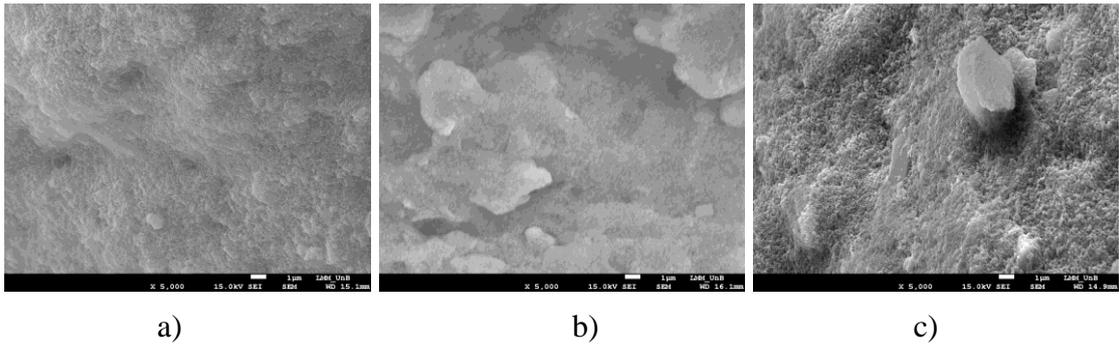


Figura 4.13 – Solo de 5 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.

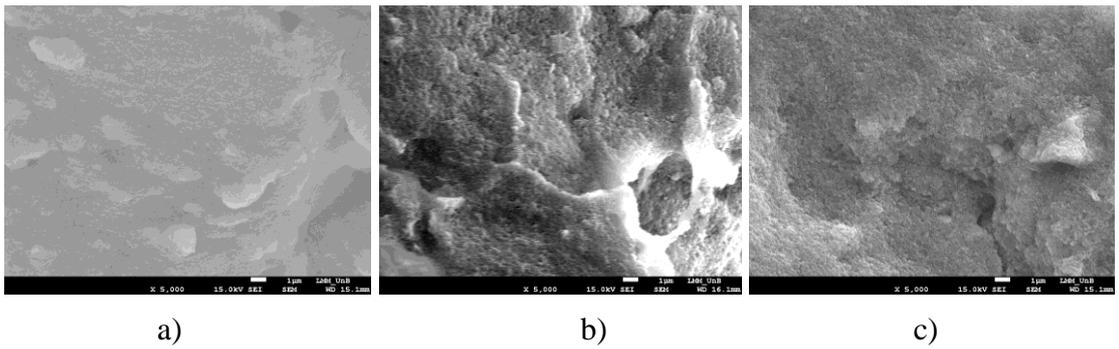


Figura 4.14 – Solo de 5 m, MEV (5000x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

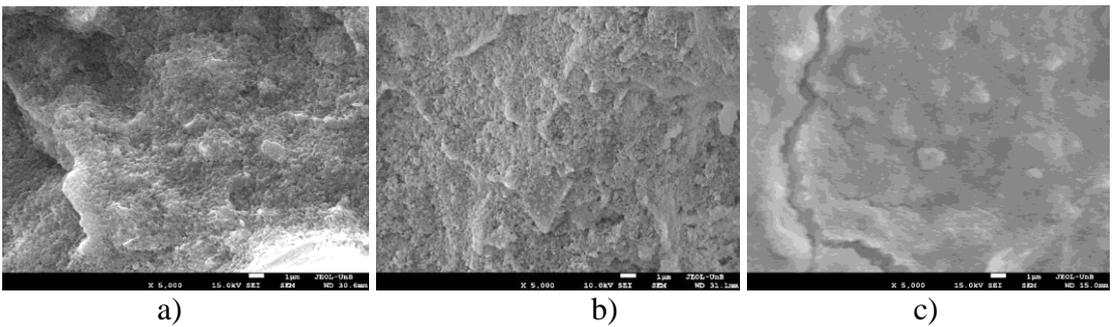


Figura 4.15 – Solo de 7 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C.

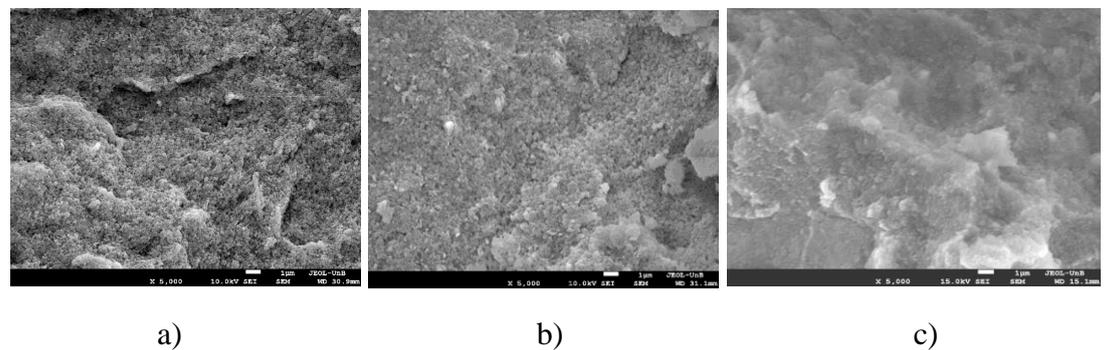


Figura 4.16 Solo de 7 m, MEV (5000x), vista vertical : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

Percebe-se no solo coletado a 9 m de profundidade, solo de transição, alterações no estruturais com o aumento da temperatura no mesmo sentido, porém de forma menos intensa (Figuras 4.17 e 4.18).

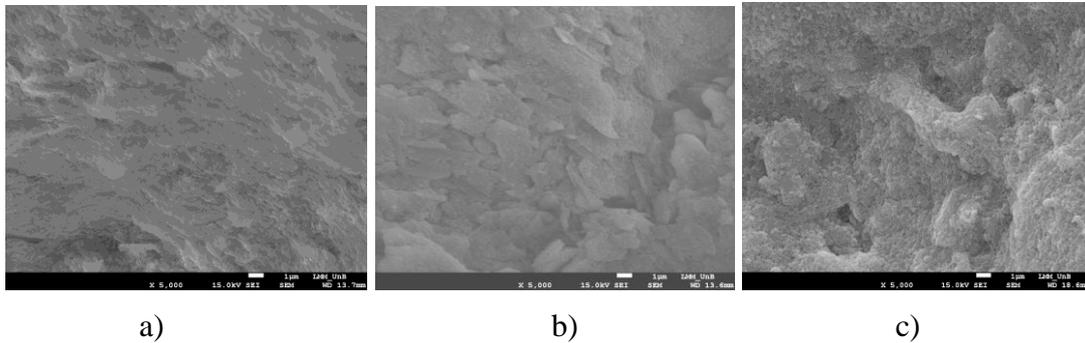


Figura 4.17 – Solo de 9 m, MEV (5000x), vista horizontal: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

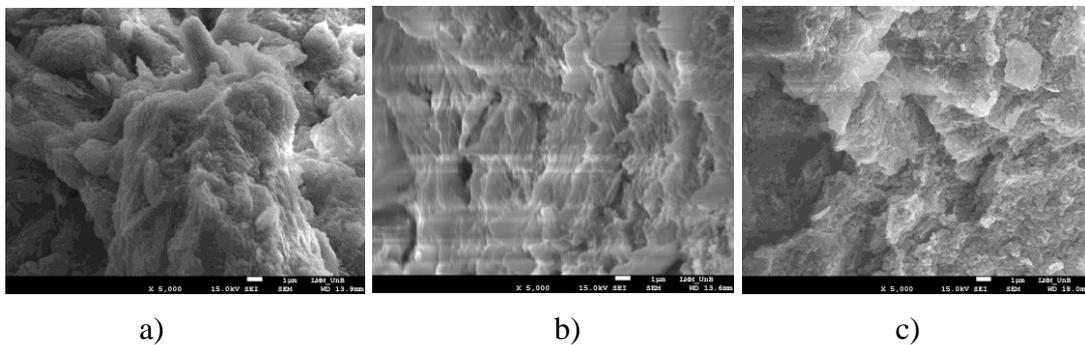


Figura 4.18 – Solo de 9 m, MEV (5000x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

Para o solo proveniente da profundidade de 11 m (Figuras 4.19 e 4.20) a maior uniformidade na distribuição granulométrica como se verá mais adiante, embora reduzindo o impacto da temperatura na estrutura ela ainda se mantém na mesma direção, ou seja, tendendo a ocorrer um fechamento dos poros com o aumento da temperatura. Ao se adotar a ampliação de 700 x em lugar de 5000 x se percebe com maior clareza esta tendência (Figuras 4.21 e 4.22).

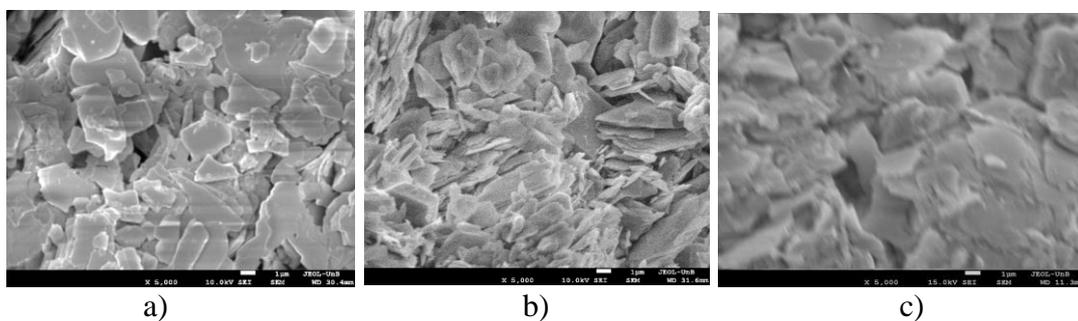


Figura 4.19 – Solo de 11 m, MEV (5000x), vista horizontal : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

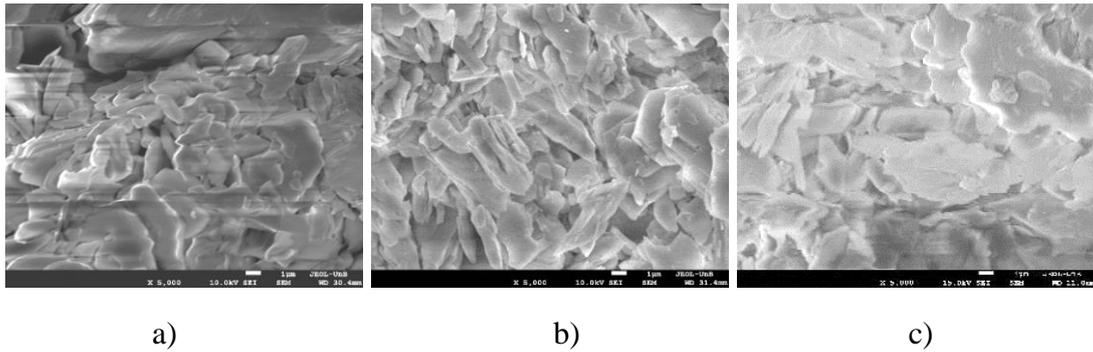


Figura 4.20 – Solo de 11 m, MEV (5000x), vista vertical : a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

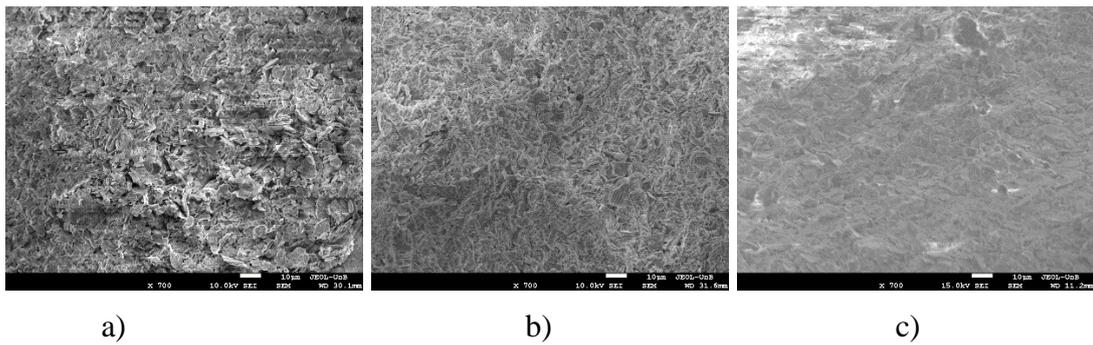


Figura 4.21 – Solo de 11 m, MEV (700x), vista horizontal: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

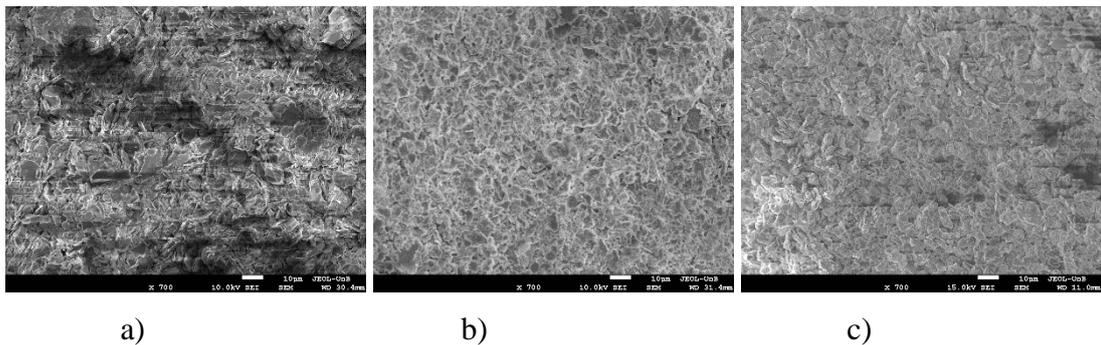


Figura 4.22 – Solo de 11 m, MEV (700x), vista vertical: a) 10°C, b) 25°C, c) 40°C

As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), com aumentos de 200x e 500x foram analisadas semi quantitativamente, de modo estimativo, no aspecto macro. O programa Imagej com livre acesso na internet foi usado para determinar a porosidade dos solos. Esse programa permite observar as áreas e magnitudes de determinadas componentes de uma imagem. No presente estudo observaram-se as áreas de vazios, distinguidas pela cor preta e ausência de brilho, característica que se faz presente nos minerais, que no programa estão identificadas pela cor vermelha. Na maioria das profundidades da Tabela 4.2 o valor da porosidade vai diminuindo com o aumento da temperatura.

Tabela 4.2 – Porosidade com temperaturas de 10, 25 e 40 °C

Profundidade (m)	%n10	%n25	%n40
1	8.0	3.2	2.5
3	7.8	3.4	3.5
5	6.6	3.1	2.8
7	10.3	5.4	2.4
9	9.6	5.3	3.8
11	9.7	6.1	3.8

## 4.2 ENSAIOS DE UMIDADE NATURAL Y DENSIDADE DOS GRÃOS

A Figura 4.23a apresenta o perfil de umidade natural correspondente à data de coleta em julho 2016. Lopera (2016) mostra que esse perfil de umidade varia de 27,6% para 1 m de profundidade e de 32,0% para 11 m de profundidade.

Os resultados de densidade dos grãos foram obtidos por meio do uso do equipamento penta picnômetro. Os resultados obtidos para o perfil de solo estudado estão apresentados na Figura 4.23b. O valor de  $G_s$  está aumentando com a profundidade. Até 9 m esse aumento pode ser associado à diminuição no teor de gibbsita, mas a partir dessa profundidade faz-se necessário outros minerais para dar continuidade ao aumento (Rodrigues, 2017) mostra a presença significativa de moscovita a 10 m e 12 m de profundidade o que pode explicar o aumento da densidade dos grãos nesta profundidade.

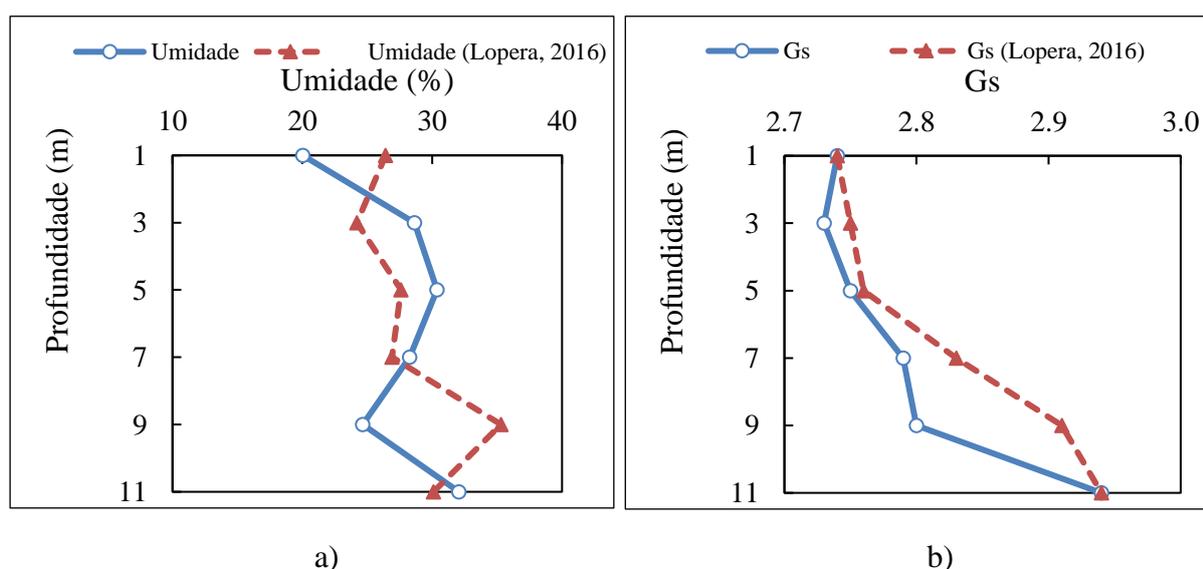


Figura 4.23 - a) Perfil de umidade no momento da amostragem atual e de Lopera, 2016 e b) Densidade dos grãos ( $G_s$  atual) e de Lopera, 2016

### 4.3 GRANULOMETRIA DOS SOLOS ESTUDADOS

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram respectivamente para as profundidades de 1 a 7 m e para as profundidades de 9 m e 11 m, que as distribuições granulométricas obtidas para os solos provenientes das seis profundidades analisadas sem o uso de defloculante são distintas enquanto curvas refletindo a influência do processo de intemperização ao longo da profundidade, guardando, no entanto, algumas similaridades.

Observa-se quando do uso de defloculante que o teor de finos menor que 0,074 mm entre as profundidades 1 m e 7 m aumenta com a ampliação da profundidade apontando para duas possibilidades que podem inclusive serem cumulativas: a ocorrência de processo de lixiviação mais acentuado na medida em que o solo se situa mais próximo ao topo do perfil (Figura 4.24); a maior estabilidade dos agregados na medida em que se torna mais susceptível à intemperização ao se aproximar da superfície do terreno. Cabe destacar que Roseno e Camapum de Carvalho (2007) mostraram que existem agregados que resistem à ação química do defloculante e outros a ação mecânica do ultrassom casos em que só o uso dos dois agentes levará a avaliação mais realista da distribuição granulométrica das partículas individualizadas.

Ainda na Figura 4.24 verifica-se que quando da realização dos ensaios sem o uso de defloculante os resultados mostram um desnível nas curvas granulométricas obtidas para 5 m e 7 m de profundidade no trecho compreendido entre 0,008 e 0,015 mm apontando para a presença de agregados estáveis. O mesmo comportamento se repete para a profundidade de 9 m (Figura 4.25), sendo, no entanto, que quando do uso de defloculante a curva deste material de transição tem melhor graduação que a obtida para o solo profundamente intemperizado situado nas profundidades 1 m, 3 m, 5 m e 7 m. Para a profundidade de 1 m a variação granulométrica tende a ser contínua ocorrendo apenas um pequeno desnível da ordem de 15% entre 0,01 e 0,015 mm e para 3 metros ocorre continuidade com um teor de argila mais acentuado, aproximadamente 22 %. Esse maior teor de argila a 3 m de profundidade quando do ensaio realizado sem o uso de defloculante pode estar ligado ao fato de que essa profundidade corresponde ao limite da zona ativa podendo esse maior teor ser fruto de acumulação de lixiviados.

Para a profundidade de 11 m a redução do tamanho dos grãos com o uso do defloculante pode ser atribuído à destruição dos pacotes de minerais que se fazem presentes nos solos saprolíticos locais sem que, no entanto, amplie de modo significativo o teor de argila propriamente dito ( $d < 0,002$  mm). Para esta profundidade observa-se ainda que quando do uso

do defloculante hexametáfosfato de sódio a fração igual a 0,001 mm determinada no ensaio de sedimentação foi inferior ao registrado sem que se fizesse uso dele. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2002) isso ocorre provavelmente devido ao efeito floculador do hexametáfosfato sobre a ilita presente no solo.

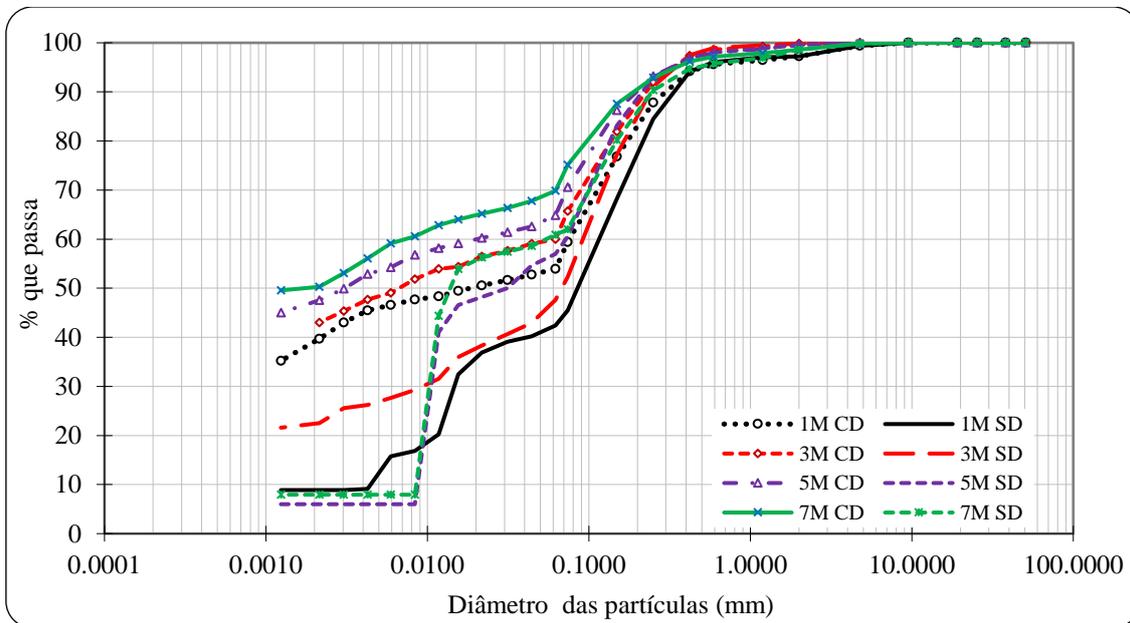


Figura 4.24 – Curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante na sedimentação para as amostras provenientes de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m de profundidade

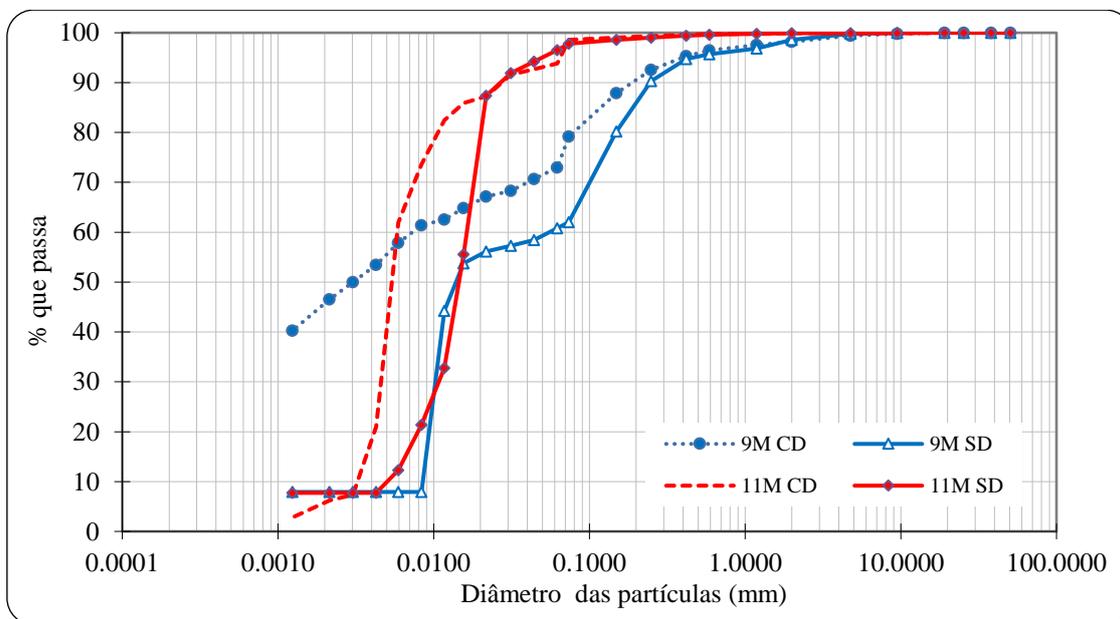


Figura 4.25 – Curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante na sedimentação para as amostras provenientes de 9 m e 11 m de profundidade.

A Figura 4.26 apresenta uma síntese comparativa entre os teores de argila, silte e areia ao longo do perfil considerando-se os ensaios realizados sem uso de defloculante, onde predomina o silte (Figura 4.26a) e com uso de defloculante, onde predomina a argila (Figura 4.26b).

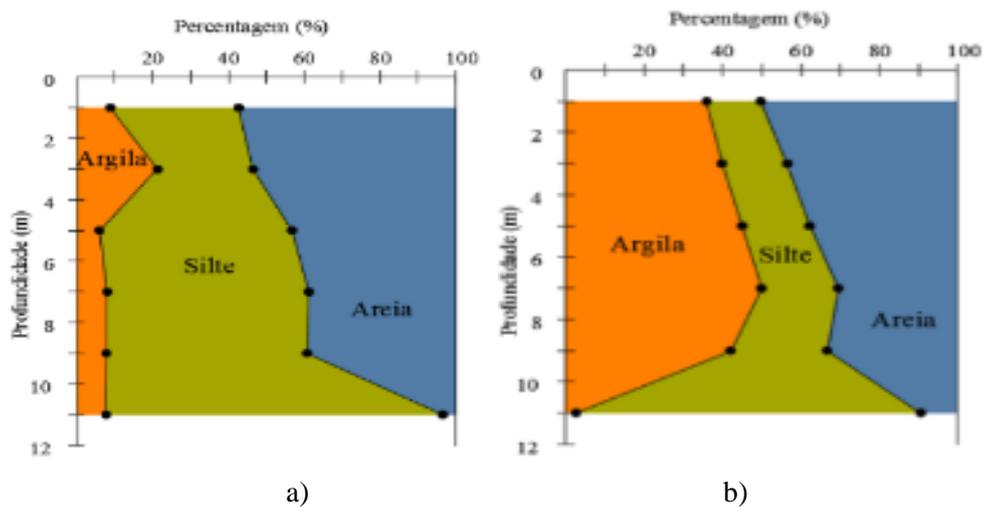


Figura 4.26 – Variação das frações granulométricas argila, silte e areia ao longo do perfil. a) Análise granulométrica sem uso de defloculante e b) Análise granulométrica com uso de defloculante

#### 4.4 RESULTADOS DE LIMITES DE ATTERBERG E CLASSIFICAÇÃO DO PERFIL DO SOLO

Os resultados de  $w_l$ ,  $w_p$  e  $IP$  estão apresentados na Tabela 4.3. De posse desses resultados e da granulometria com e sem defloculante, as amostras dos solos foram classificadas segundo a carta de Casagrande.

Tabela 4.3 – Resultados de umidade natural, limites de Atterberg, índices de plasticidade, índice de consistência e índice de liquidez e da classificação na Carta de Casagrande dos solos coletados

Amostra	W (%)	$w_l$ (%)	$w_p$ (%)	IP (%)	Il	Ic	Carta de Casagrande CD	Carta de Casagrande SD
1 m	20,0	40	29	11	-0,82	1,82	ML	SM
3 m	28,6	40	28	12	-0,95	0,95	ML	ML

Amostra	W (%)	wl (%)	wp (%)	IP (%)	II	Ic	Carta de Casagrande CD	Carta de Casagrande SD
5 m	30,4	39	28	11	-0,22	0,78	ML	ML
7 m	28,3	40	33	12	-0,39	0,97	ML	ML
9 m	24,7	44	34	10	-0,93	1,93	ML	ML
11 m	32,1	38	27	11	0,46	0,54	ML	ML

Os resultados de limites de liquidez e de plasticidade apresentados na Tabela 4.2 são similares aos obtidos por Guimarães (2002) para o mesmo perfil de intemperismo ao analisar amostras coletadas até a profundidade de 10 m. Considerando-se a média das umidades de entrada de ar dos microporos encontradas por esse mesmo autor ( $w = 18,6\%$ ) para amostras naturais coletadas de 1 m a 8 m de profundidade e deduzindo-a dos limites de liquidez e plasticidade conforme proposto por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) remete-se a classificação dos solos profundamente intemperizados considerando-se a carta de plasticidade de Casagrande apresentada por Vargas (1977) e os resultados de análise granulométrica sem o uso de defloculante para solos areno-argilosos a areno-siltosos, o que é mais condizente com a realidade dos solos analisados.

Considerando-se que a água que compõe a microporosidade do solo não integra em termos efetivos nem o wl, nem o wp e nem a umidade natural tanto o Índice de Liquidez (II) como o Índice de Consistência (Ic) mostrados na Tabela 4.2, podem ser usados e se constituírem em um indicativo da condição de resistência ou comportamento do solo em estado natural caso este sofra perturbação estrutural. Ao relacionar os limites de Atterberg com sua umidade natural verifica-se que os solos profundamente intemperizados se encontram em campo em condição não moldável ( $II < 0$ ) e com resistência mais elevada (Terzaghi e Peck, 2009). Quanto ao Ic, considerando-se a classificação apresentada em Vargas (1977), os solos profundamente intemperizados estudados se enquadram como de consistência plástica rija e o de transição

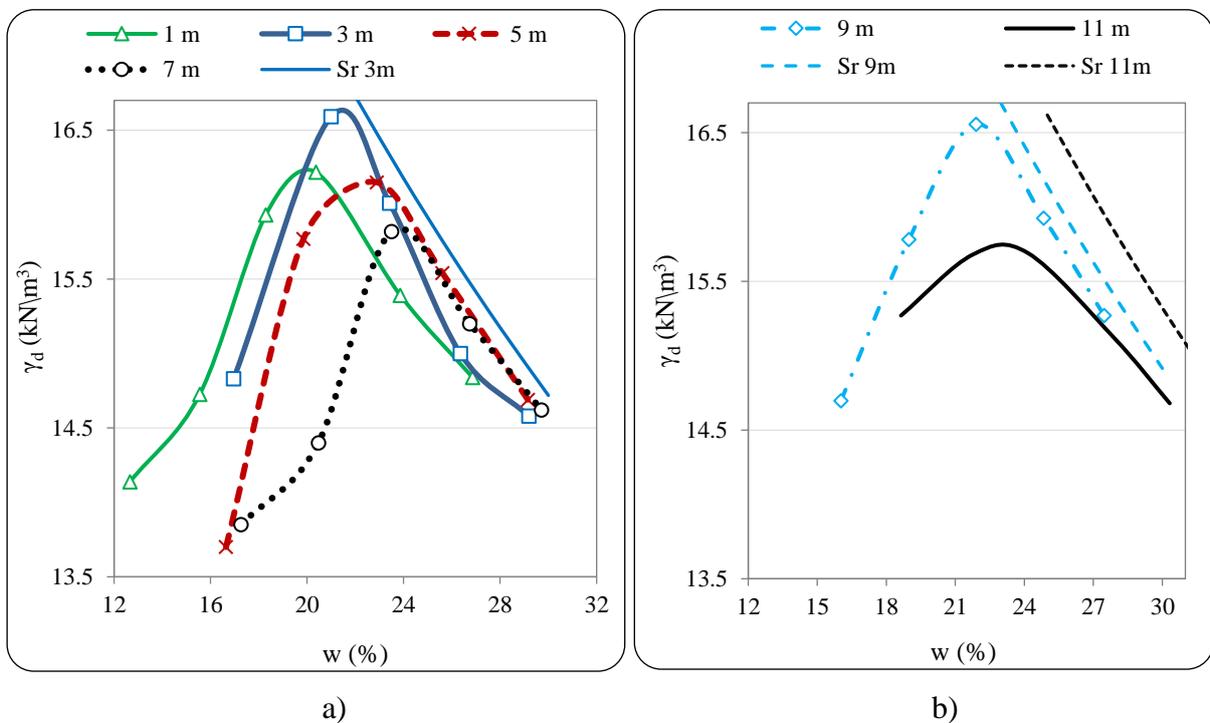
como de consistência dura enquanto o saprolítico se situa na classe consistência plástica mole. Destaca-se que considerando-se as particularidades dos solos tropicais esses índices merecem sempre muita atenção ao serem considerados.

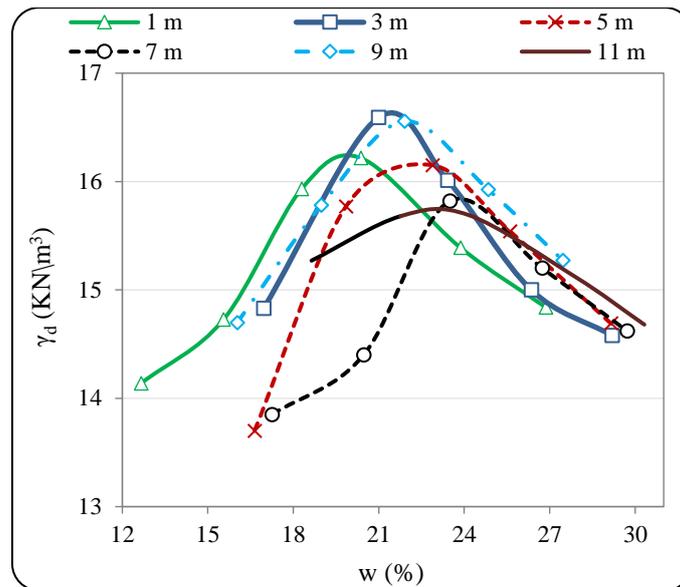
#### **4.5 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, SUCCÃO E RTCD**

Os ensaios realizados de Compactação mini MCV na energia intermediária, objetivaram obter as curvas de compactação representativas dos solos correspondentes ao perfil de intemperismo estudado. Foram incluídos nos gráficos as curvas de saturação considerando-se os valores de  $G_s$  obtidos. Os resultados de compactação foram obtidos nas condições ambientes do Laboratório de Geotecnia da UnB (temperatura e umidade relativa) para as amostras coletadas à 1 m, 3 m, 5 m, 7 m de profundidade (Figura 4.27a) e amostras oriundas de 9 m e 11 m de profundidade (Figura 4.27b). O conjunto de resultados encontra-se na Figura 4.27c. No conjunto observa-se que para a profundidade 1 m a curva se desloca das demais apresentando umidade ótima menor e os ramos seco e úmido se deslocando para a esquerda. Observa-se ainda que os resultados no ramo seco apresentam curvatura no início das curvas obtidas para 1 e 7 m. Também tendem a apresentar curvatura os resultados obtidos para 1 e 3 m no ramo úmido. As discussões a seguir ajudarão a ter um melhor entendimento dos resultados obtidos.

Até 7 m de profundidade os solos lateríticos apresentam material agregado e macro poroso no início do processo de compactação. Para umidades inferiores a entrada de ar dos microporos as variações de sucção não são muito significativas e mesmo sendo, como elas atuam predominantemente no interior dos agregados, intervêm pouco no resultado da compactação. Entre a entrada de ar dos microporos e o término da entrada de ar dos macroporos a variação da sucção é mais relevante geralmente intervindo de modo significativo no resultado da compactação. Na zona de macroporos a sucção não só é geralmente pequena como varia pouco com a umidade intervindo pouco na compactação. Um outro fator relevante para a compactação no ramo seco desses solos profundamente intemperizados é a eventual quebra de agregados. No ramo úmido, a geração de pressão neutra positiva vai estar ligada à drenabilidade da água. Sendo assim, os trechos curvos iniciais obtidos para 1 e 7 m de profundidade pode estar ligado a baixas intervenções das sucções. Já a elevada declividade do ramo seco das curvas de 1 a 7 m de profundidade pode estar ligado a variações significativas de sucção ou quebra de agregados.

O solo de transição, a depender do nível de agregação já presente em seu estado de intemperização pode se aproximar desse comportamento ou passar a apresentar variação significativa de sucção no ramo seco e maior geração de pressão neutra positiva no ramo úmido. Já o coletado a 11 m de profundidade (solo saprolítico), tem maior independência e uniformidade no tamanho das partículas conforme mostrado nas Figuras 4.19 e 4.20, o que tende a gerar menores variações de sucção no ramo seco horizontalizando a curva. No ramo úmido a pressão neutra gerada estará ligada ao volume de água incorporado ao solo e a sua drenabilidade.

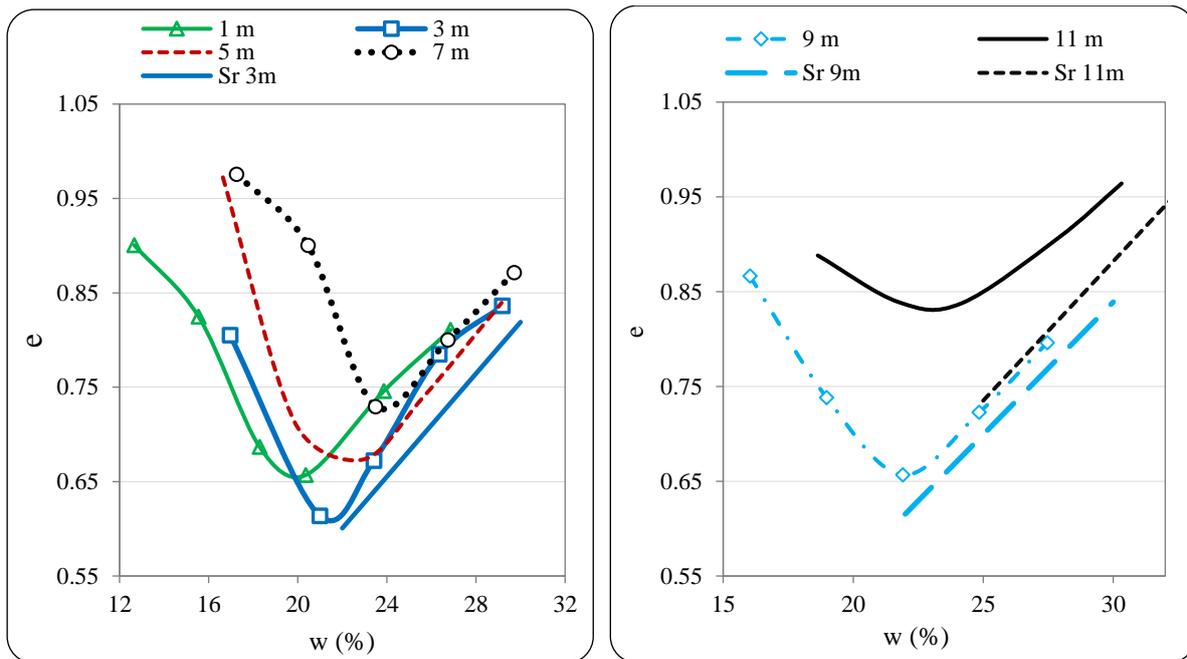




c)

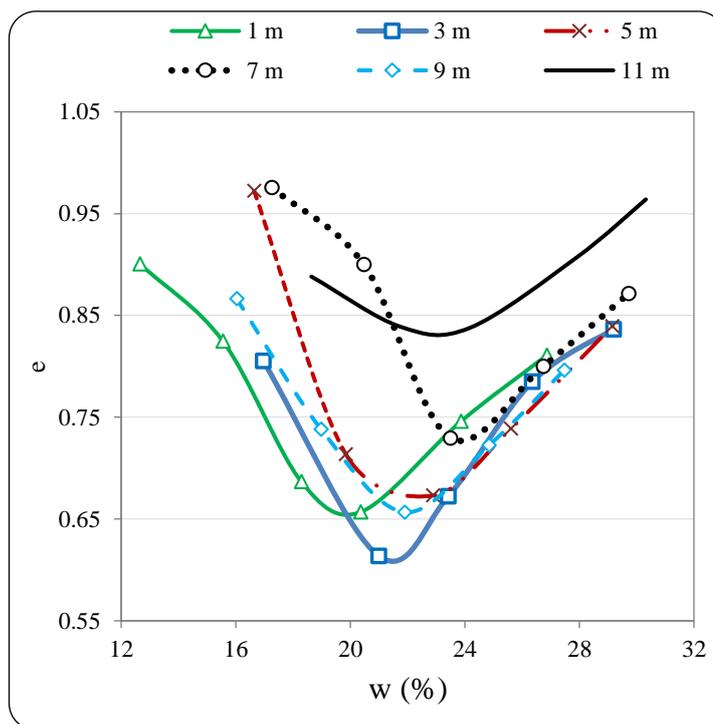
Figura 4.27 – Curvas de Compactação dos solos. a) Amostras de 1, 3, 5, e 7 m, b) Amostras de 9 e 11 m e c) Todas as amostras

Considerando-se o fato de que o peso específico aparente seco não possibilita a avaliação da influência da densidade real dos grãos na porosidade do solo optou-se por avaliar as curvas de compactação para as profundidades 1 m, 3 m, 5 m e 7 m (solo laterítico, Figura 4.28a), 9 m (solo de transição) e 11 m (solo saprolítico) na Figura 4.28b em termos do índice de vazios. Na Figura 4.28c são apresentados todos os resultados conjuntamente. Para as profundidades 1, 5 e 7 m adotou-se a densidade real média no cálculo da curva correspondente ao grau de saturação 100%. Analisando-se os resultados obtidos em função dos índices de vazios se observa que os ramos das curvas de compactação assim como a linha ótima para 3 m a 9 m de profundidade são coincidentes deslocando-se para a esquerda as curvas obtidas para 1 m e 11 m de profundidade. Observa-se ainda que o índice de vazios na condição ótima aumenta com a profundidade entre 3 e 7 m e volta a diminuir para a profundidade 9 m. A Figura 4.29b mostra que o solo coletado a 11 m de profundidade apresenta o ramo úmido afastado da curva de saturação indicando a presença de quantidade substancial de ar ocluso.



a)

b)



c)

Figura 4.28 – Curvas de compactação em termos do índice de vazios e umidade dos solos: a) amostras de 1, 3, 5, 7 m de profundidade; b) amostras de 9 e 11 m de profundidade e c) todas as amostras

Depreende-se destas análises a importância de se considerar as variações de densidade real quando se trabalha com solos tropicais sobressaindo igualmente a relevância de se considerar o índice de vazios nas análises da compactação.

Nas Figuras 4.29a e 4.29b estão apresentados respectivamente em função da umidade e do grau de saturação os resultados de sucção determinados para os pontos que compõem as curvas de compactação para as profundidades 1 m a 7 m. A Figura 4.30 apresenta os resultados obtidos para as profundidades de 9 m e 11 m. Os resultados apresentados nestas Figuras convergem para as análises feitas anteriormente sobre os ramos secos das curvas de compactação ao mostrarem que o índice de vazios diminui nas curvas de compactação em consequência das reduções das sucções com o aumento da umidade. Estas figuras mostram ainda que para o ramo seco até o primeiro ponto do ramo úmido a sucção varia pouco para o solo oriundo da profundidade 11 m, solo saprolítico. Esse comportamento guarda relação com a pequena variação da sucção registrada para esse solo com a variação da umidade. A presença de sucção ainda significativa no ramo úmido dos solos em geral, estão a indicar, se observados os graus de saturação, que quando da compactação a oclusão da fase ar em consequência do esforço de compactação estaria a gerar pressão neutra positiva do solo reduzindo a energia efetiva de compactação.

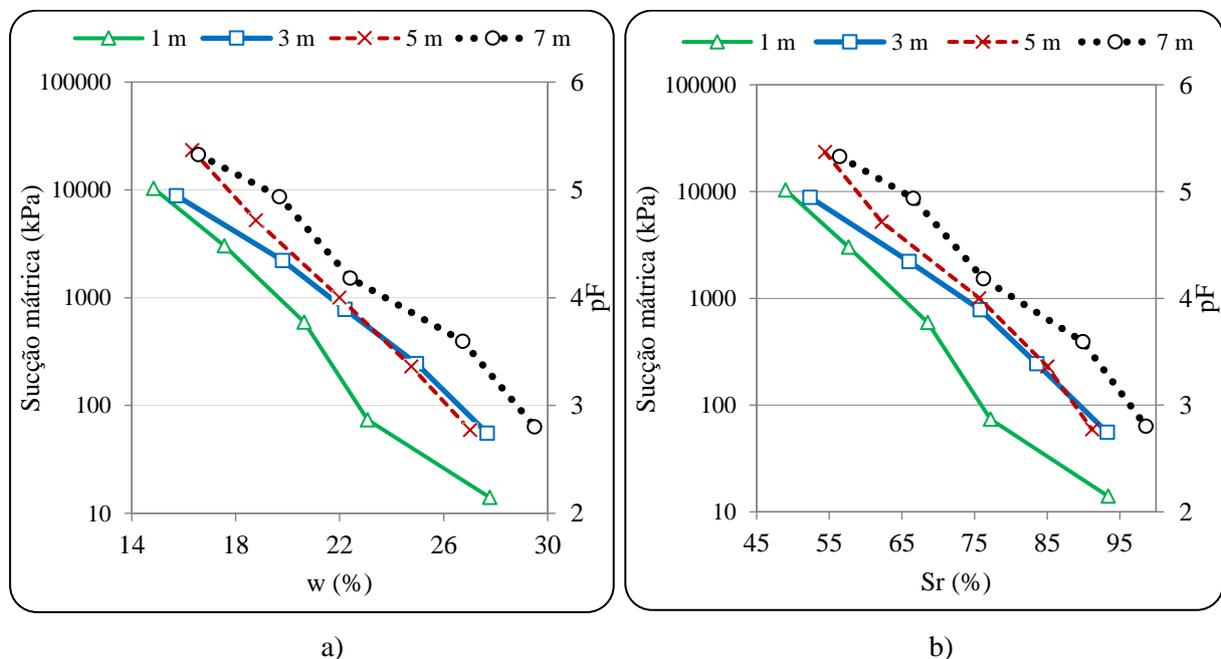


Figura 4.29 – Gráfico de solos de 1 m, 3 m, 5 m e 7 m a) Sucção vs. Umidade e b) Sucção vs. Saturação

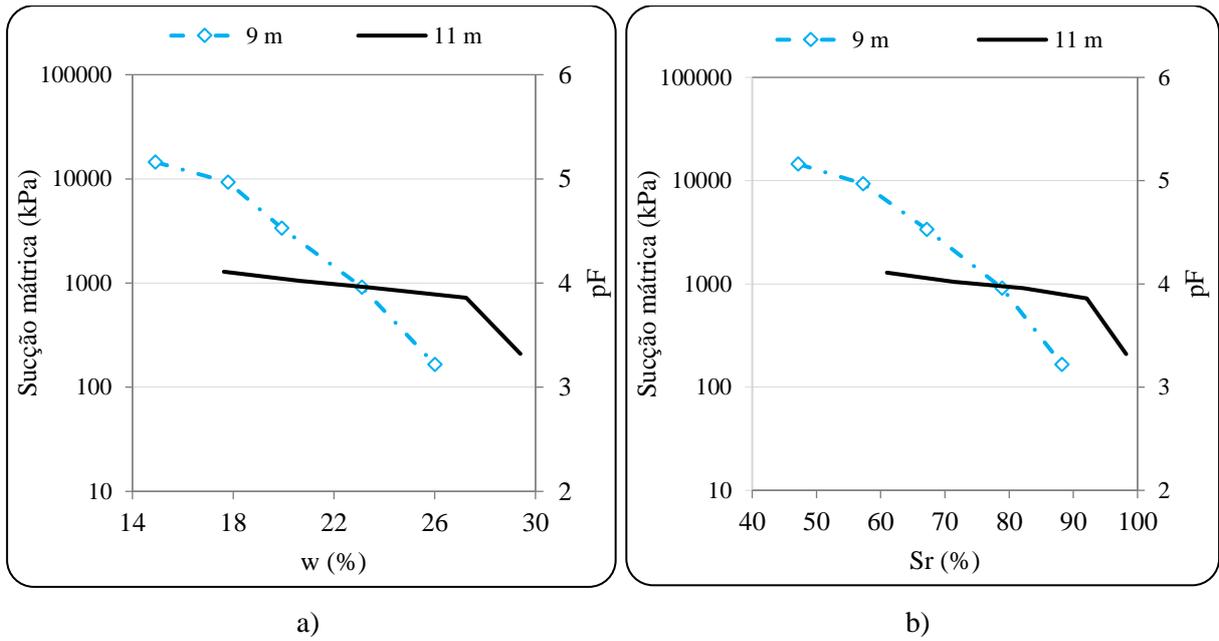


Figura 4.30 – Gráfico de solos de 9 m e 11 m a) Sucção vs. umidade e b) Sucção vs. Sr.

Na Figura 4.31 pode-se observar todas as amostras estudadas sendo o solo de 11 m com uma variação mínima da sucção até a umidade de 27%. A análise do conjunto de resultados mostra compatibilidade com as curvas de compactação obtidas em função do índice de vazios (Figura 4.28c).

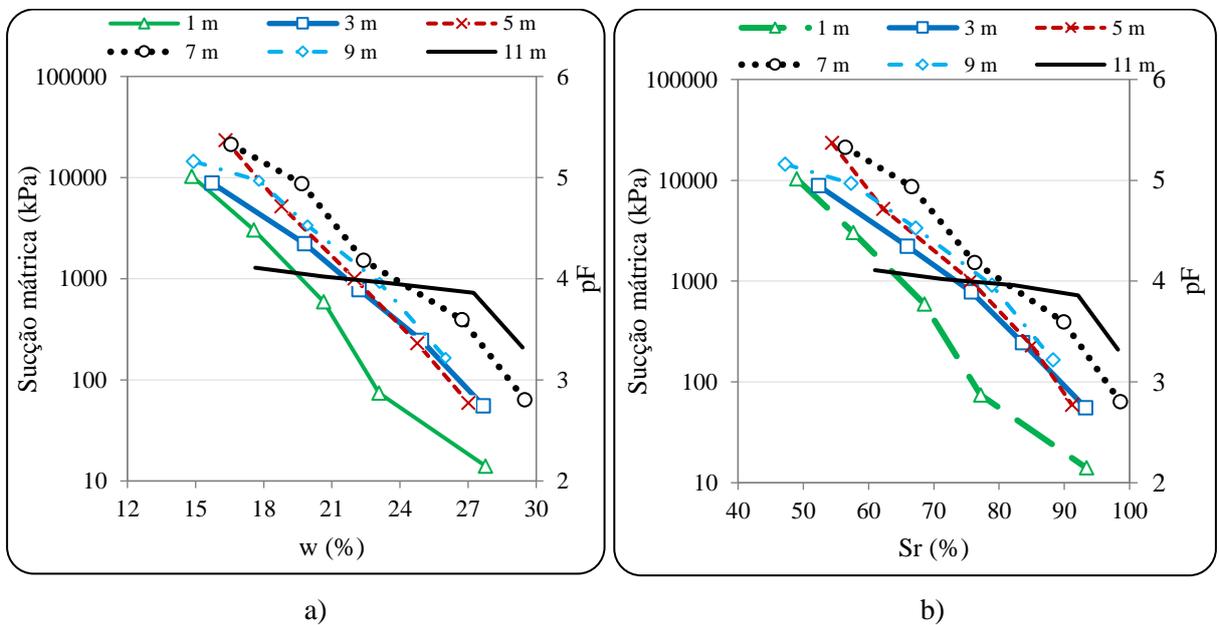


Figura 4.31 – Gráfico de solos de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m: a) Sucção vs. Umidade e b) Sucção vs. Saturação

Nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 são apresentados os resultados obtidos para a resistência à tração em função da umidade (a) e do grau de saturação (b) a partir dos corpos de prova oriundos das curvas de compactação. Apesar de certa variação entre os solos três comportamentos são evidenciados: os resultados obtidos para 1 m e 3 m apresentam a resistência diminuindo com o aumento da umidade e do grau de saturação; os solos coletados a 5 m, 7 m e 9 m tendem a assumir a mesma tendência de aumento da RTCD até um pico nas curvas, para logo diminuir com a umidade e com o grau de saturação; o solo oriundo da profundidade 11 m apresenta o resultado não esperado de aumento da resistência com a umidade e com o grau de saturação.

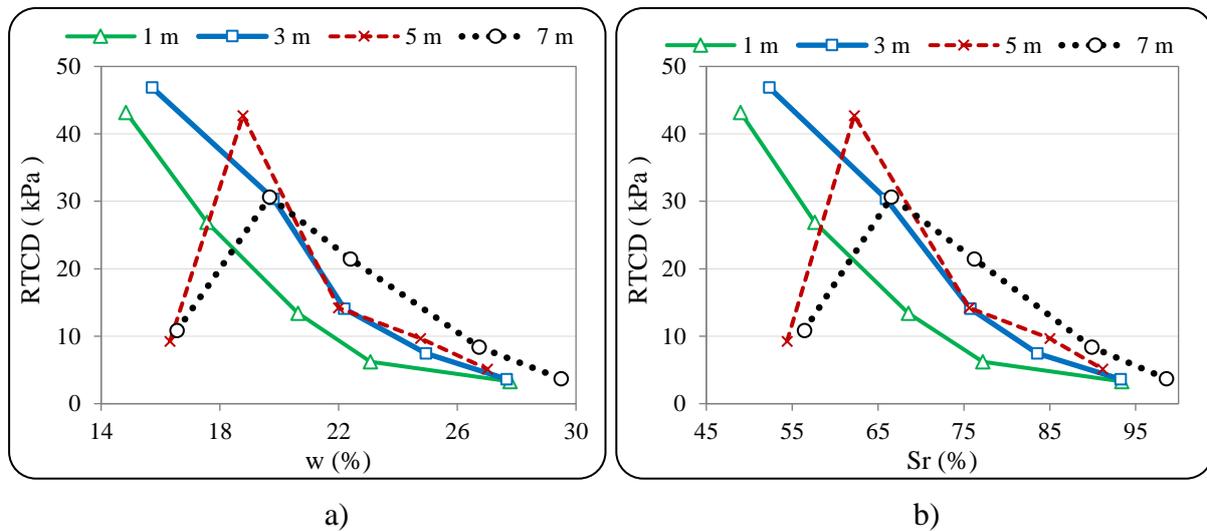


Figura 4.32– a) Resistência à tração de 1 m, 3 m, 5 m e 7 m vs. Umidade e b) Resistência à tração de 1 m, 3 m, 5 m e 7 m vs. Saturação

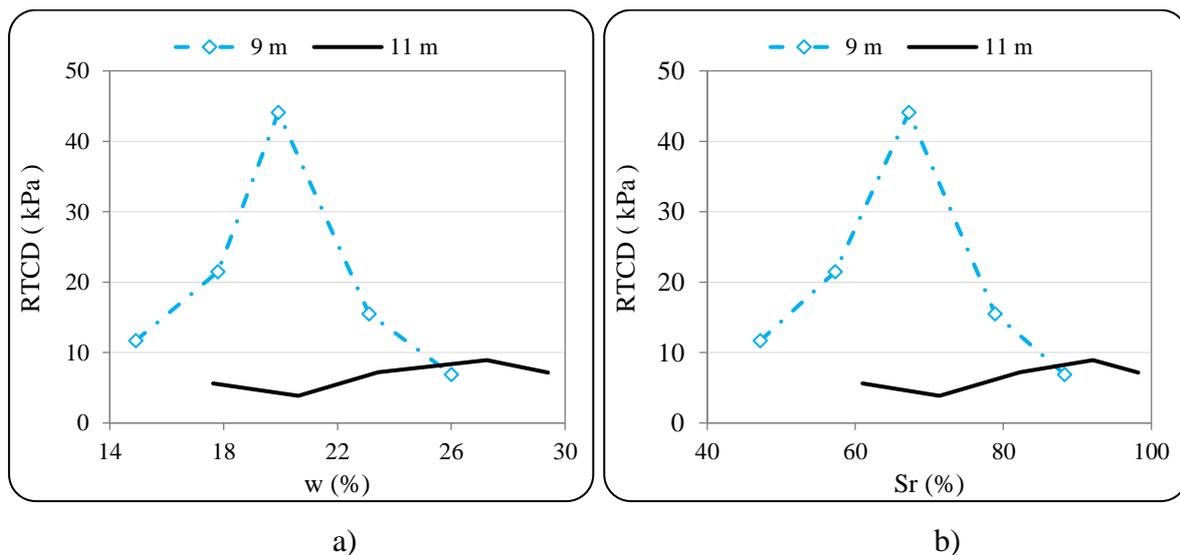


Figura 4.33 – a) Resistência à tração de 9 m e 11 m vs. Umidade e b) Resistência à tração de 9 m e 11 m vs. Saturação

Na figura 4.34 apresenta os ensaios de Resistência à tração em função da umidade de compactação a) e do grau de saturação b), obtidos para todas as amostras analisadas (6).

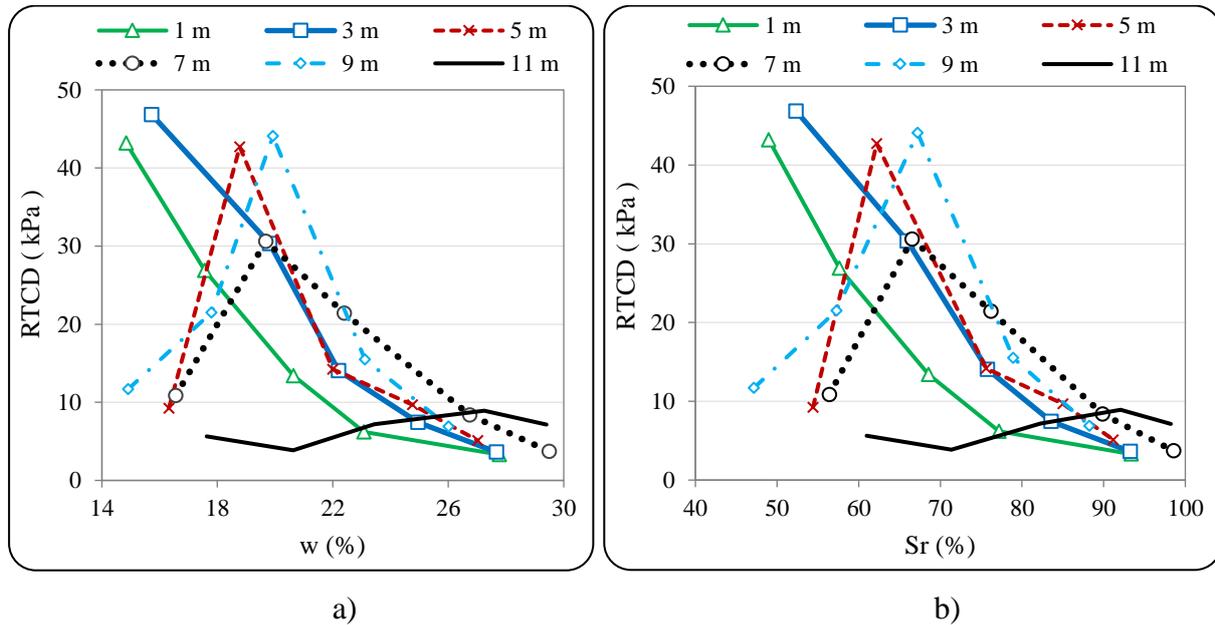


Figura 4.34 – a) Resistência à tração de todas as amostras vs. Umidade e b) Resistência à tração de todas as amostras vs. Saturação

Buscando-se um melhor entendimento dos resultados obtidos em relação ao perfil de intemperismo foi plotado o gráfico de RTCD em função da sucção matricial (Figura 4.35). Esta Figura torna os resultados comparativamente mais claros e respondendo ao esperado quando se trata de solos tropicais profundamente intemperizados incluindo-se neste caso o de transição. Para as sucções menores que 1000 kPa os resultados são de 1 m a 9 m similares e mesmo o ponto com menor sucção para a profundidade de 11 m se enquadra nesta tendência. Em seguida os resultados tendem a assumir a mesma tendência de aumento da RTCD com o aumento da sucção fugindo à esta tendência os resultados obtidos para a profundidade 7 m, no entanto, se houvesse a presença de um ponto com sucção entre 3000 kPa e 5000 kPa é provável que o este solo segue a mesma tendência dos demais. Entre 3000 kPa e 10000 kPa surge um pico nas curvas, ponto a partir do qual a RTCD diminui. Resultados similares foram apresentados por Valência *et al.* (2007) e Valência *et al.* (2019) e conforme mostrado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) esse ponto corresponde à entrada de ar nos microporos fazendo com que a sucção apesar de mais elevada deixa de atuar em certos pontos dos contatos entre agregados.

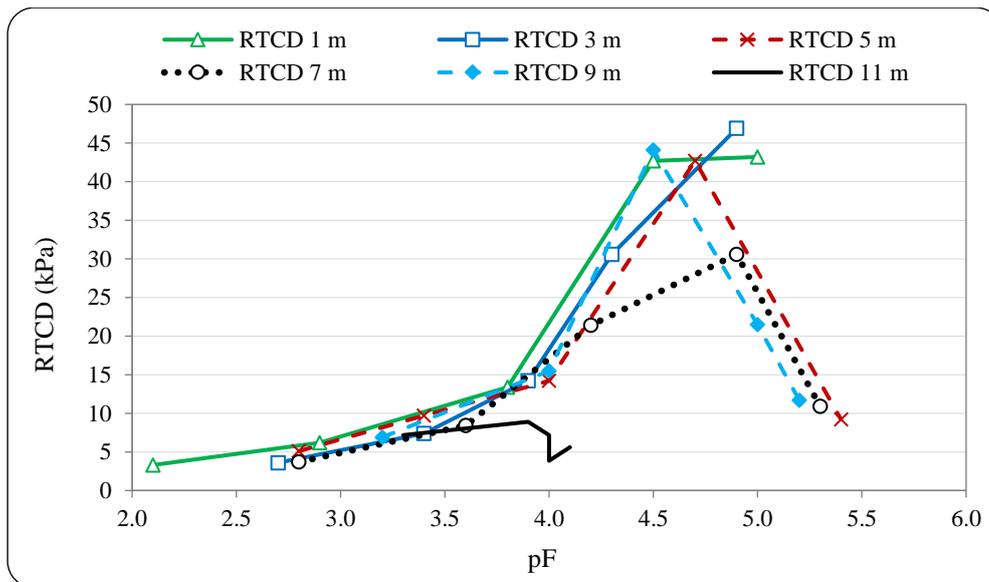


Figura 4.35 – Resistência à tração para todas as profundidades vs. Sucção mátrica

#### 4.6 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, SUCCÃO E RTCD PARA AS TEMPERATURAS DE 10 °C, 25 °C e 40 °C

A Figura 4.36 até 4.41 apresentam os resultados de compactação obtidos para os solos analisados correspondendo as Figuras 4.36a, 4.37b, 4.38c, 4.39d, 4.40e e 4.41f respectivamente às profundidades 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m. Nesta mesma figura foram colocadas nas respectivas profundidades a Figura 4.38 c (c3) correspondentes às sucções obtidas para os corpos de prova compactados. Nestas Figuras foram apresentados os resultados com o peso específico aparente seco em função da umidade (a1, b1, c1, d1, e1, f1) e com o índice de vazios em função da umidade (a2, b2, c2, d2, e2, f2). As sucções em função da umidade foram apresentadas respectivamente para as profundidades 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m nas Figuras a3, b3, c3, d3, e3 e f3, cabendo destacar que esta distribuição dos pontos de sucção embora unidos não caracterizam uma curva característica clássica na qual se tem o índice de vazios aproximadamente constante. Outro ponto importante quanto aos resultados de sucção é que em termos da compactação apenas os resultados oriundos do ramo seco vão interferir nos resultados devido a geração de pressão neutra positiva no ramo úmido durante o processo de compactação. Nos cálculos dos índices de vazios foram consideradas as densidades dos grãos obtidas para cada amostra.

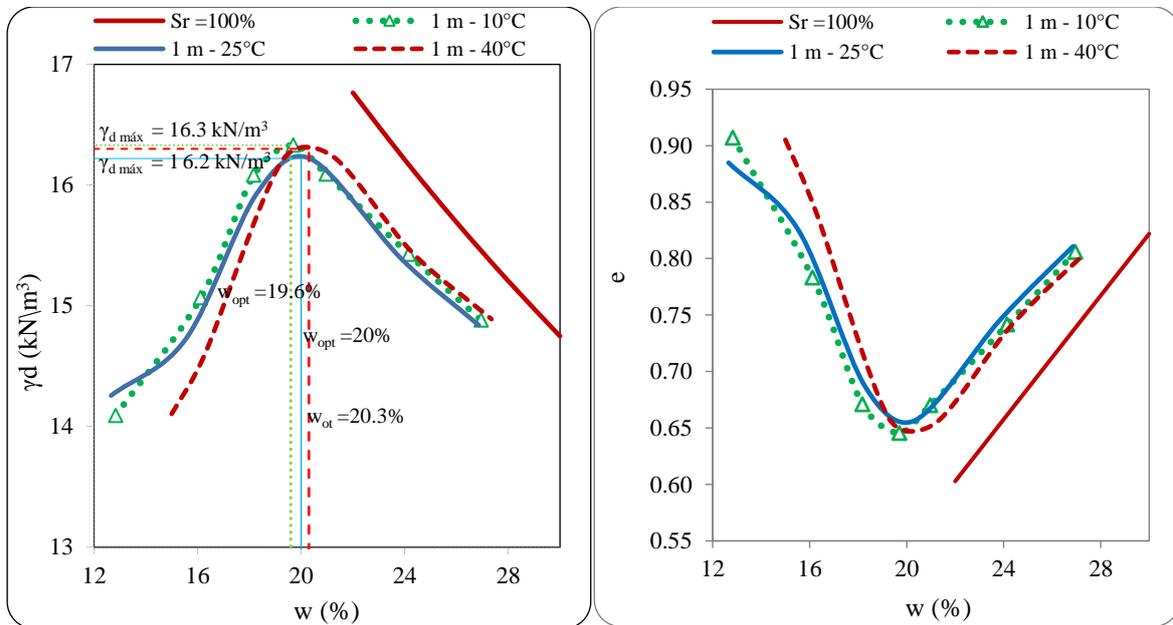
Analisando-se o conjunto de resultados apresentados na Figura 4.36 o efeito da temperatura nos resultados de compactação e na distribuição dos pontos referente à sucção não

convergem para uma tendência única ao longo do perfil. Quanto ao efeito da temperatura na curva de compactação essa não convergência dos resultados ocorre ao se considerar a posição e inclinação do ramo seco, a umidade ótima e o posicionamento do ramo úmido da curva de compactação havendo nesse caso, no entanto, proximidade na declividade. observa-se a tendência geral das curvas de compactação obtidas para as temperaturas 10 °C e 40 °C ficarem próximas se afastando da obtida para a temperatura de 25 °C. Este impacto nas curvas de compactação variou ao longo do perfil. Esta não convergência remete à necessidade de vários estudos complementares. Por exemplo, a alteração da viscosidade e densidade da água com a variação da temperatura que seriam aproximadamente as mesmas, sofre influência da composição química da água presente no solo, e esta, depende da composição químico-mineralógica do solo que termina interferindo na qualidade da água de hidratação. Um outro aspecto relevante não analisado diz respeito ao impacto da temperatura na sucção osmótica, pois com a alteração da densidade e viscosidade da água ela deve ser afetada interferindo no comportamento mecânico do solo, inclusive nos resultados da compactação. A observação de que o efeito da temperatura sobre as curvas de compactação e distribuição dos pontos de sucção ao longo da profundidade não é o mesmo, aponta para a influência da mineralogia do solo e da composição da estrutura textural das agregações sobre os resultados indicando a importância do grau de intemperização sobre o comportamento dos solos tropicais. Em termos aplicado, observa-se que a temperatura afetou em maior ou menor escala, a depender do solo, tanto a umidade ótima como o peso específico aparente seco máximo e índice de vazios mínimo refletindo assim no grau de compactação avaliado em campo onde o solo encontra-se susceptível às variações térmicas.

Antes de adentrar nas análises específicas do impacto da temperatura nas curvas de compactação e nas sucções determinadas, cabe destacar que embora a sucção matricial seja geralmente atribuída apenas às dimensões dos poros e às variações do volume de água que os ocupa ela é influenciada pela interação água-mineral. Tem-se ainda que assim como a temperatura exerce influência na densidade e viscosidade da água ela impacta na própria densidade dos grãos ampliando assim o número e a diversidade dos fatores intervenientes nos resultados aqui analisados.

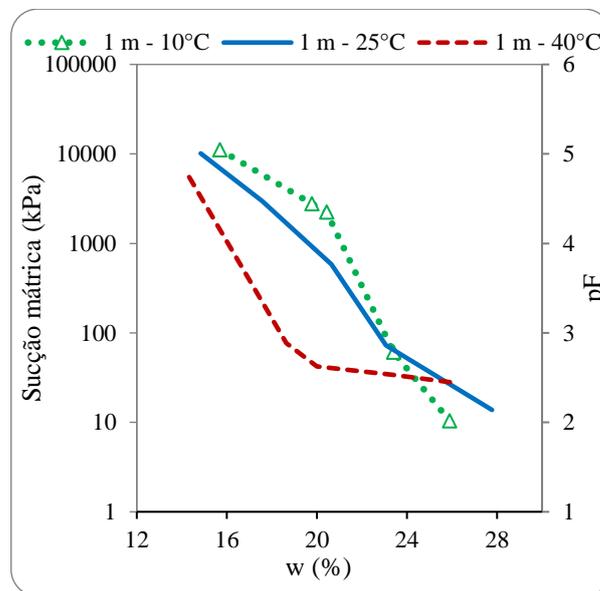
As Figuras 4.36 (a1 e a2) mostram que para o solo coletado a 1 m de profundidade ocorreu apenas um pequeno aumento da umidade ótima com a ampliação da temperatura

praticamente não afetando o peso específico aparente seco máximo (a) e o índice de vazios mínimo. A maior inclinação do ramo seco da curva de compactação obtida para a temperatura de 40 °C (a1 e a2) é condizente com a maior declividade da curva característica neste intervalo de umidade verificado para esta temperatura 4.36 (a3).



a1)

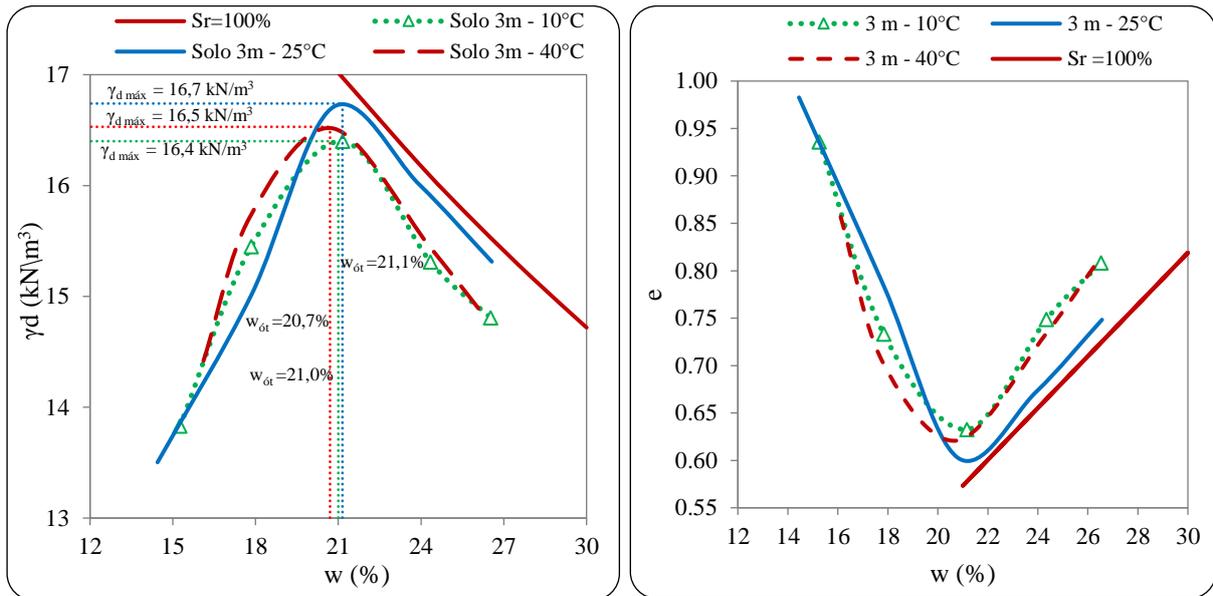
a2)



a3)

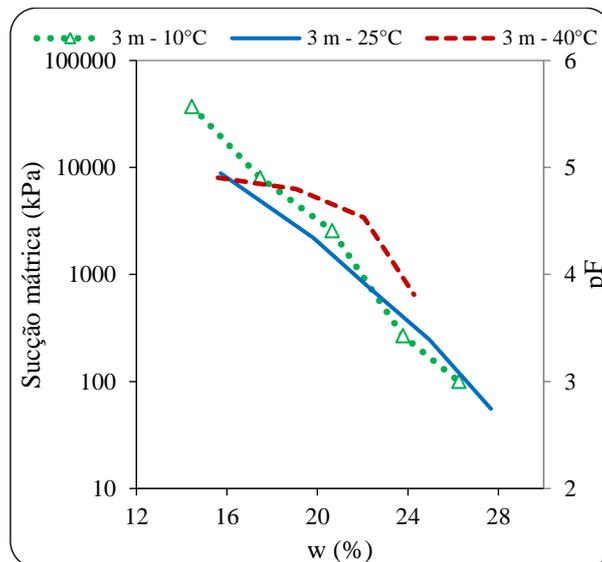
Figura 4.36 – a) Solo de 1 m (a1:  $\gamma_d$  vs.  $w$ , a2:  $e$  vs.  $w$ , a3: sucção vs.  $w$ )

Observa-se nas Figuras 4.37 (b1 e b2) que a temperatura afetou pouco a umidade ótica tendo maior influência no peso específico aparente seco máximo e no índice de vazios mínimo sem, no entanto, guardar uma proporcionalidade com a temperatura. Sobre os resultados das sucções medidas as curvas obtidas para as temperaturas de 10 °C e 25 °C guardam semelhança entre elas explicando a declividade semelhante do ramo seco da curva de compactação enquanto para a temperatura de 40 °C se dispõe de apenas um ponto no ramo seco o que impossibilita a análise.



b1)

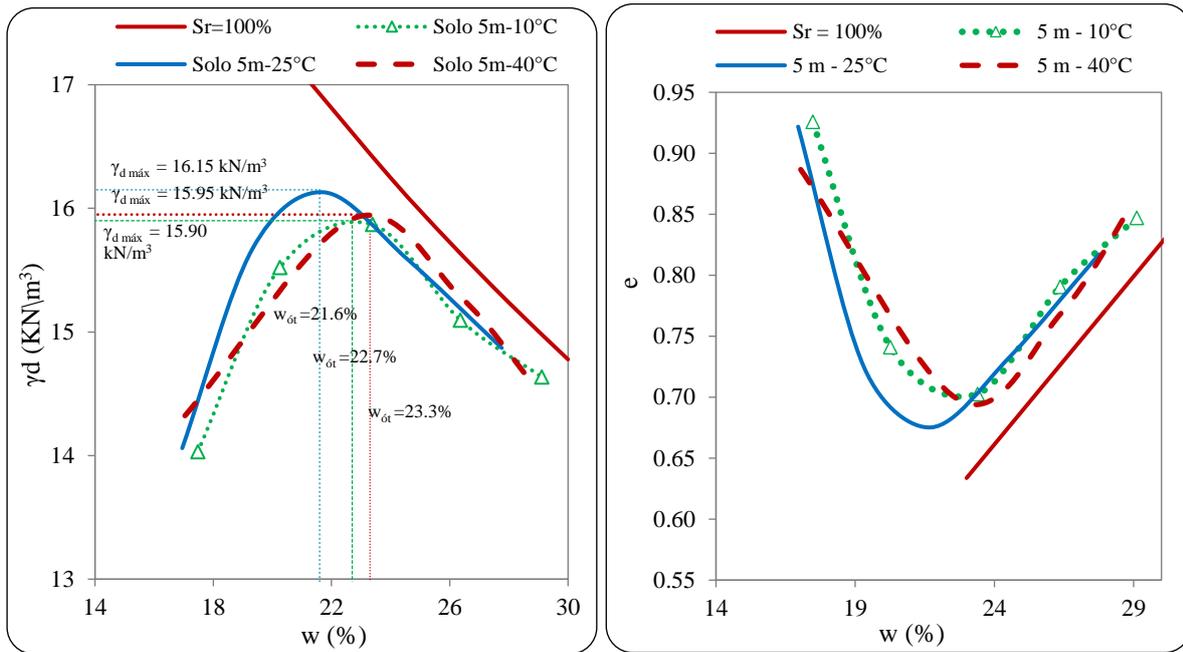
b2)



b3)

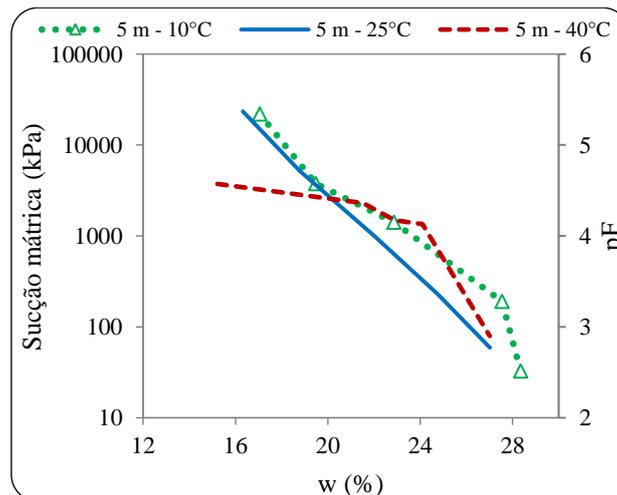
Figura 4.37 – b) Solo de 3 m (b1:  $\gamma_d$  vs.  $w$ , b2:  $e$  vs.  $w$ , b3: sucção vs.  $w$ )

Para a profundidade de 5 m a maior horizontalidade do ramo seco da curva de compactação obtida para a temperatura de 40 °C (Figura 4.38 c1 e c2) é condizente com a maior suavidade da curva de sucção no ramo seco (c3). Nesta profundidade ocorreu maior variação na umidade ótima em função da temperatura sendo os maiores valores de peso específico aparente seco e menores de índice de vazios registrados, como no caso da profundidade 3 m para a temperatura 25 °C. Verifica-se também, como se observa para a profundidade 3 m, similaridade nesses parâmetros ao se comparar os resultados obtidos para 10 °C e 40 °C.



c1)

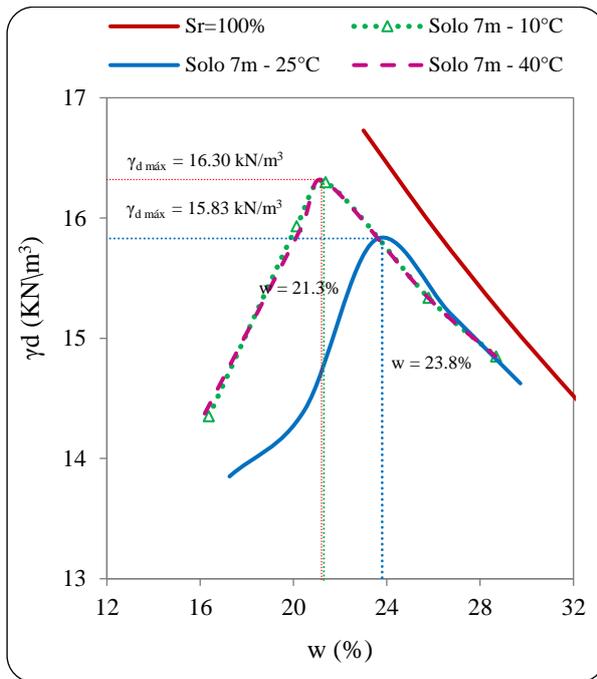
c2)



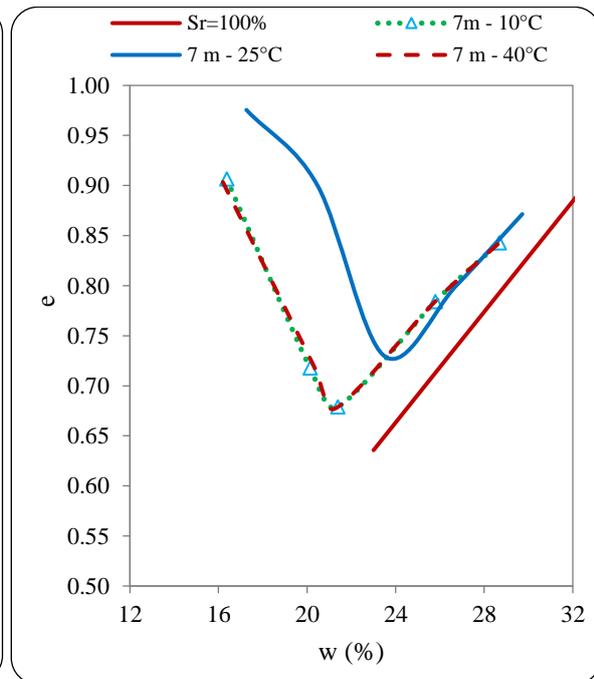
c3)

Figura 4.38 – c) Solo de 1 m (c1:  $\gamma_d$  vs. w, c2: e vs.w, c3: sucção vs. w)

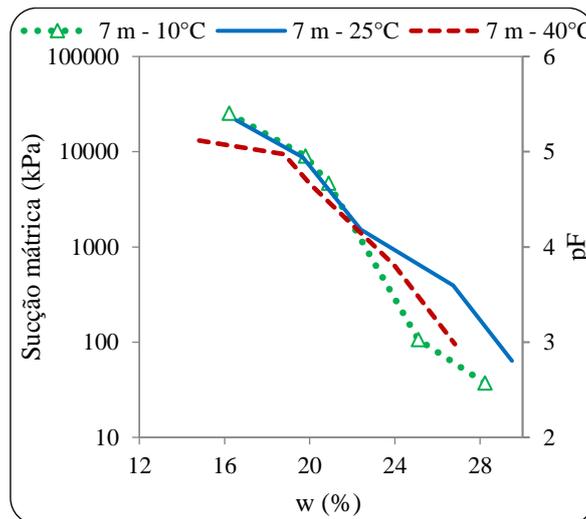
A Figura 4.39 (d1) indica certo paralelismo entre os ramos secos das curvas de compactação, no entanto, quando analisados os resultados considerando-se os índices de vazios observa-se maior suavidade no ramo seco da curva obtida para 40 °C (Figura 4.39 d2) o que condiz com a menor declividade no ramo seco da curva de sucção (Figura 4.39 d3). Cabe ainda destacar, que contrariamente ao observado para as profundidades 3 m e 5 m o índice de vazios mínimo aumentou para a temperatura de 25 °C.



d1)



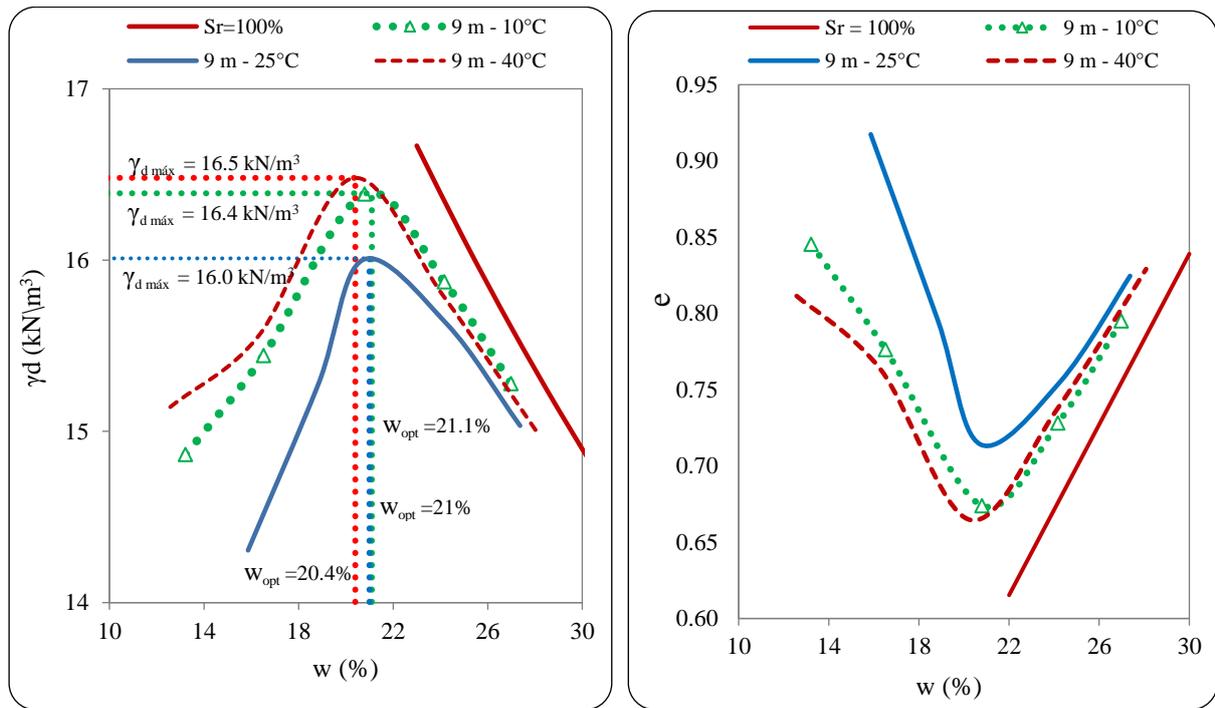
d2)



d3)

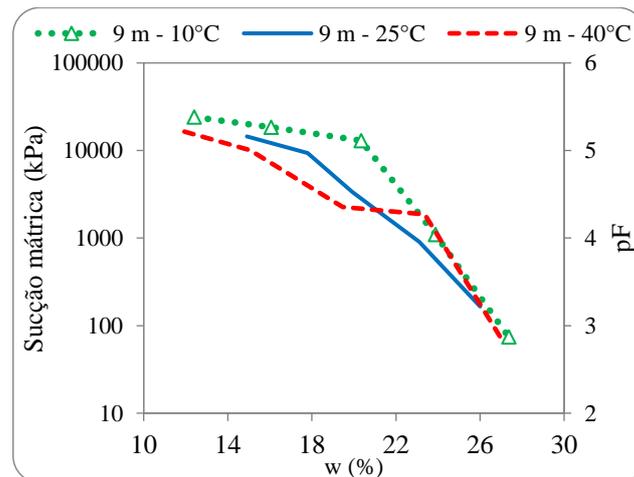
Figura 4.39 – d) Solo de 7 m (d1:  $\gamma_d$  vs. w, d2: e vs.w, d3: sucção vs. w)

Para a profundidade de 9 m embora a temperatura de 25 °C tenha gerado uma redução significativa no peso específico aparente seco (Figura 4.40 e1) o índice de vazios mínimo (Figura 4.40 e2) variou pouco refletindo o impacto da temperatura na densidade dos grãos. Verifica-se, no entanto, um aumento na umidade ótima para esta temperatura. Já a maior suavidade do ramo seco da curva de compactação obtida para a temperatura 10 °C coincide com a maior suavidade da curva de sucção no ramo seco (Figura 4.40 e3).



e1)

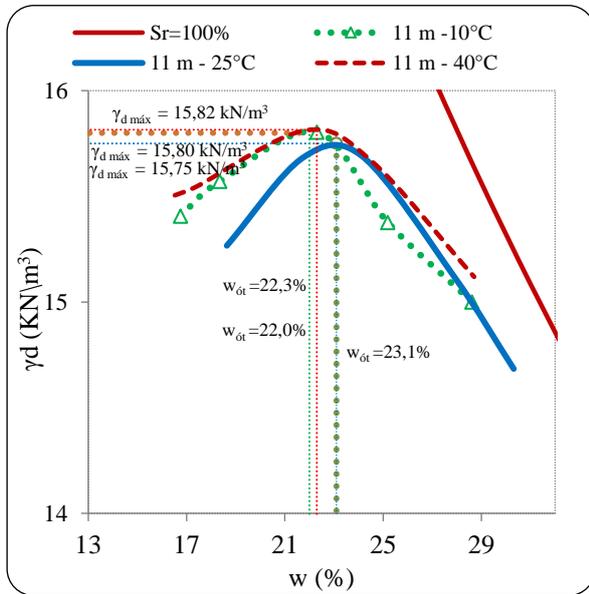
e2)



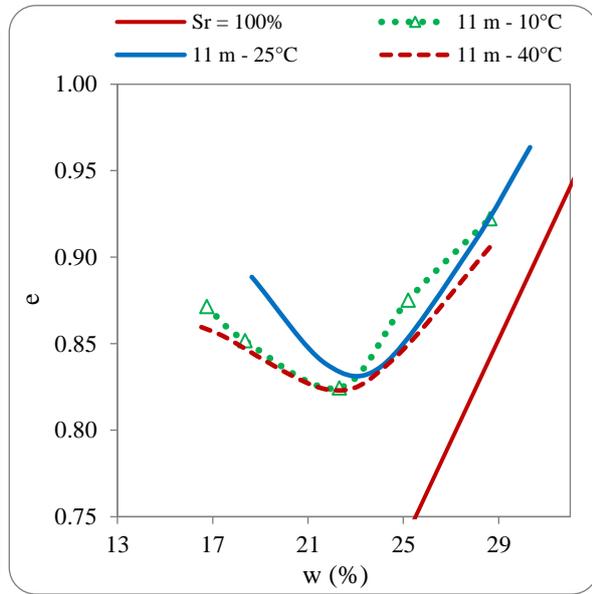
e3)

Figura 4.40 – e) Solo de 9 m (e1:  $\gamma_d$  vs.  $w$ , e2:  $e$  vs.  $w$ , e3: sucção vs.  $w$ )

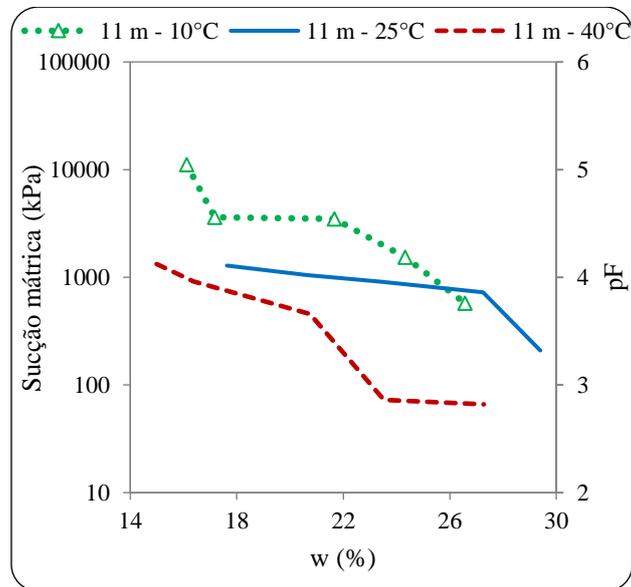
As Figuras 4.41 (f1 e f2) mostram que para a profundidade de 11 m os resultados de peso específico aparente seco máximo e índice de vazios mínimo são similares para as três temperaturas analisadas e os resultados de sucção não explicam a maior suavidade do ramo seco das curvas obtidas para 10 °C e 40 °C.



f1)



f2)

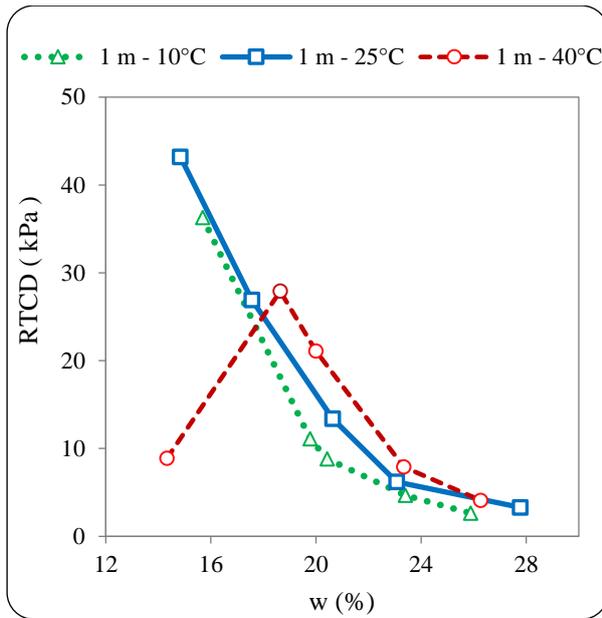


f3)

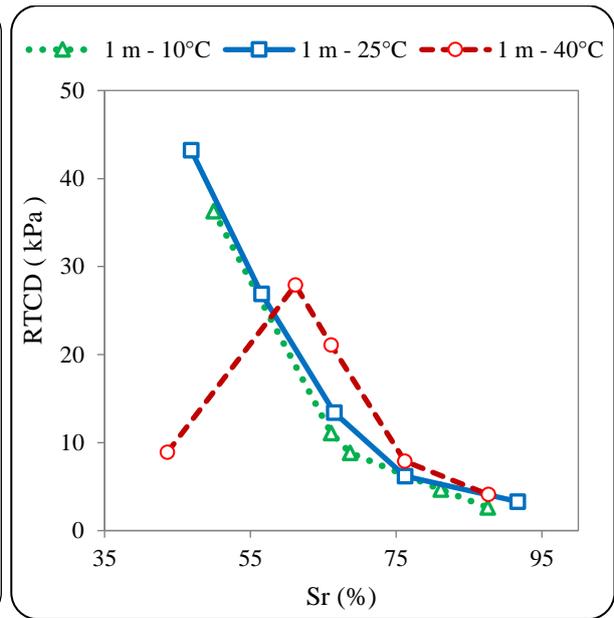
Figura 4.41 – f) solo de 11 m (f1:  $\gamma_d$  vs. w, f2: e vs.w, f3: sucção vs. w).

Cabe destacar inicialmente que como mostrado na Figura 4.35 apesar da expectativa de aumento da resistência à tração com o aumento da sucção e, por consequência, com a diminuição da umidade e do grau de saturação, ele deixa de ocorrer tendendo a gerar sua diminuição quando da entrada de ar nos microporos presentes nos agregados dos solos intemperizados. Considerando-se que tais pontos correspondentes à diminuição da RTCD com o aumento da sucção tendem a não guardar elo com as variações térmicas eles, apesar de constarem das figuras não serão considerados nas análises comparativas.

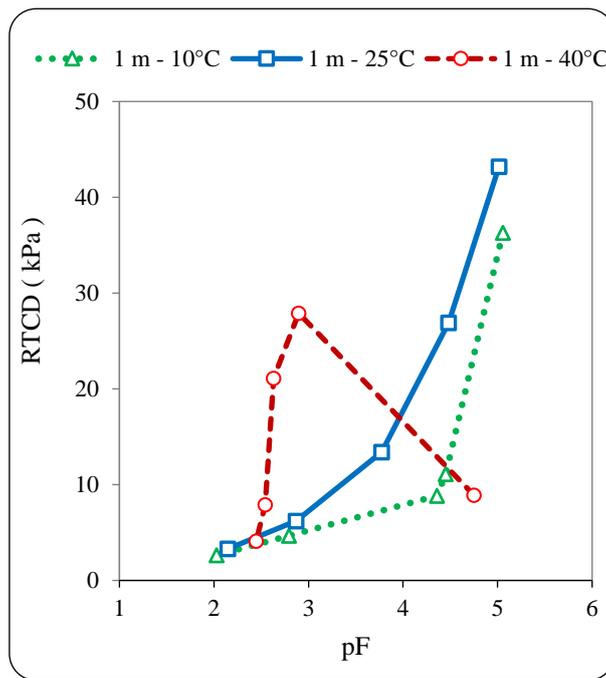
As Figuras 4.42 (a1), (a2) e (a3) mostram respectivamente para os gráficos em função da umidade, do grau de saturação e da sucção que a RTCD para a profundidade de 1 m aumenta com o aumento da temperatura. Comportamento semelhante é observado para a profundidade de 3 m (Figura 4.42), em especial em função da umidade (b1) e do grau de saturação (b2) sendo ele menos marcante quando analisado em função da sucção destacando-se, no entanto, a ampliação do valor máximo da RTCD com o aumento da temperatura. Para a profundidade 5 m (Figuras 4.42 c1, c2 e c3) os resultados obtidos para as três temperaturas podem ser entendidos como não definindo como uma tendência clara. Para a profundidade de 7 m a tendência de aumento da RTCD com a temperatura só fica clara para a condição de máxima RTCD. Quando da análise dos resultados em função da sucção (d3) observa-se a sobreposição dos pontos para sucções inferiores às correspondentes aos picos. A Figura 4.42 mostra que para a profundidade de 9 m ao se considerar os valores de umidade e grau de saturação superiores aos de pico e sucções inferiores às de pico se tem um aumento da RTCD com o crescimento da temperatura. Para a profundidade de 11 m os resultados apresentados nas Figuras 4.42 f1, f2 mostram resultados para os trechos intermediários das curvas obtidas para as três temperaturas opostos ao esperado, ou seja, a RTCD aumentando respectivamente com o aumento da umidade e do grau de saturação sinalizando para outros fatores intervindo no comportamento. Neste trecho os maiores valores de RTCD foram obtidos para 10 °C e os menores para 25 °C. Os resultados de RTCD analisados para esta profundidade em função da sucção não apresentaram qualquer tendência (Figura 4.42 f3).



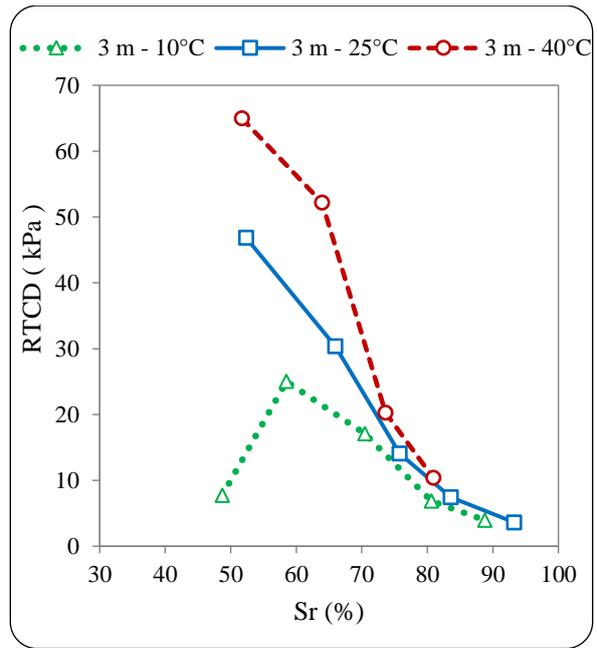
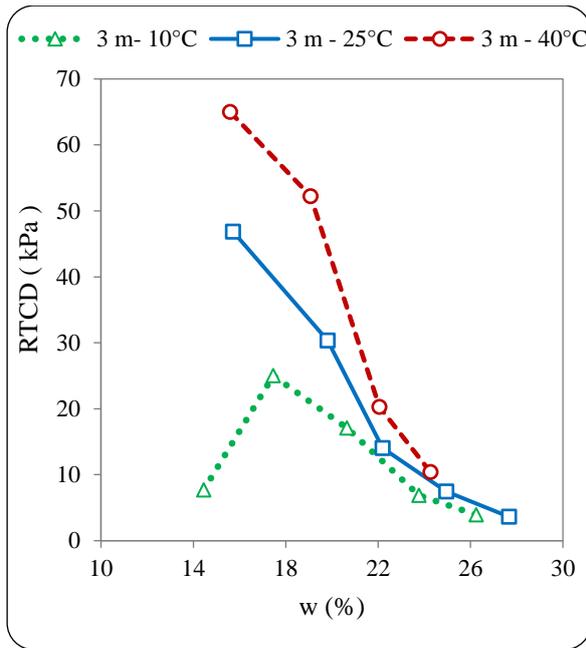
a1)



a2)

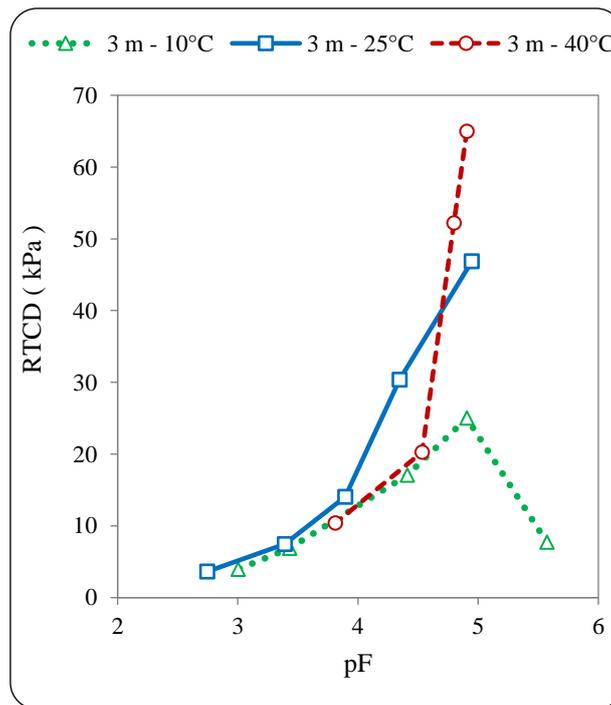


a3)

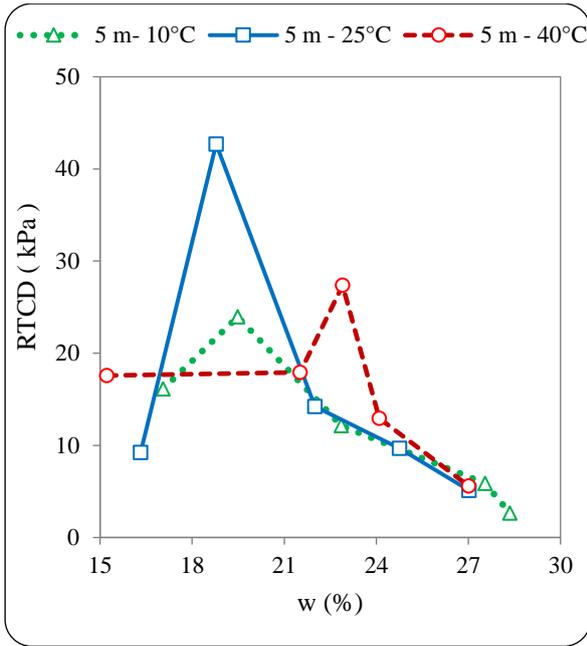


b1)

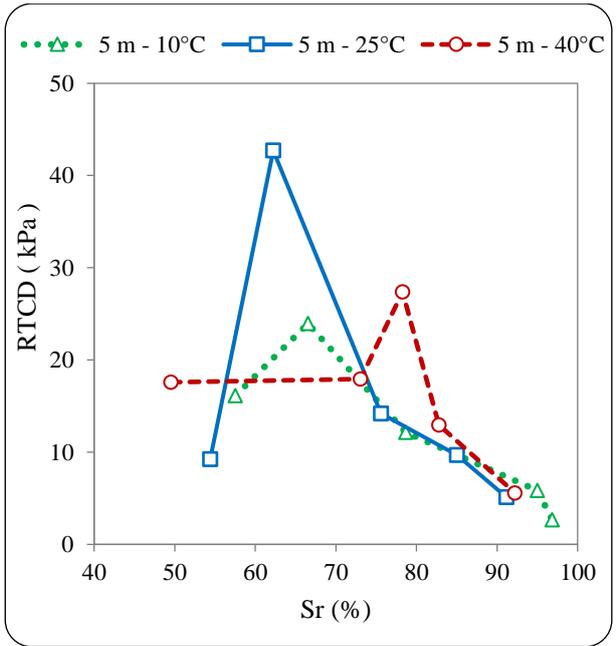
b2)



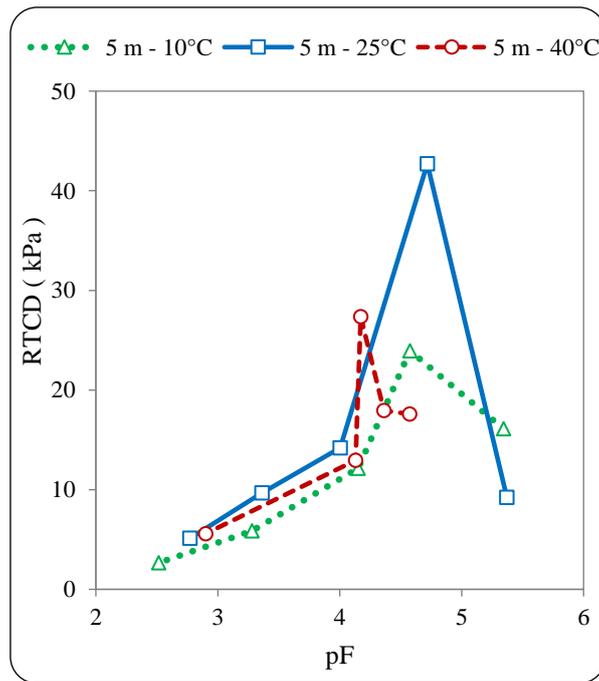
b3)



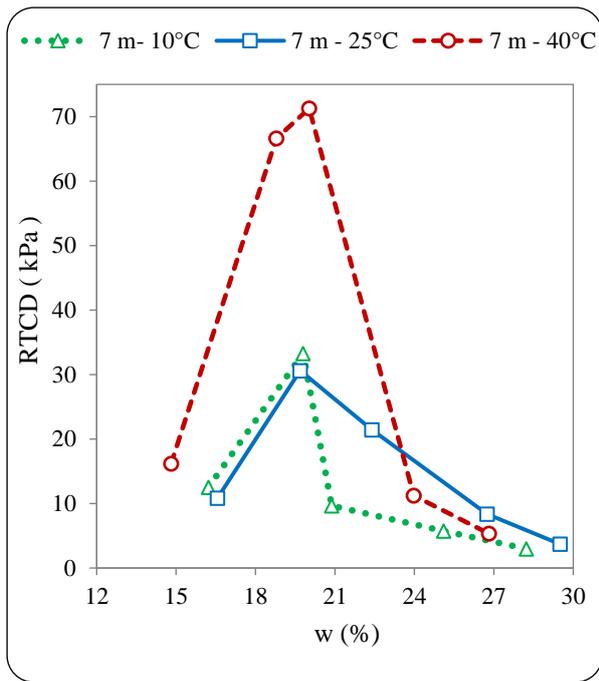
c1)



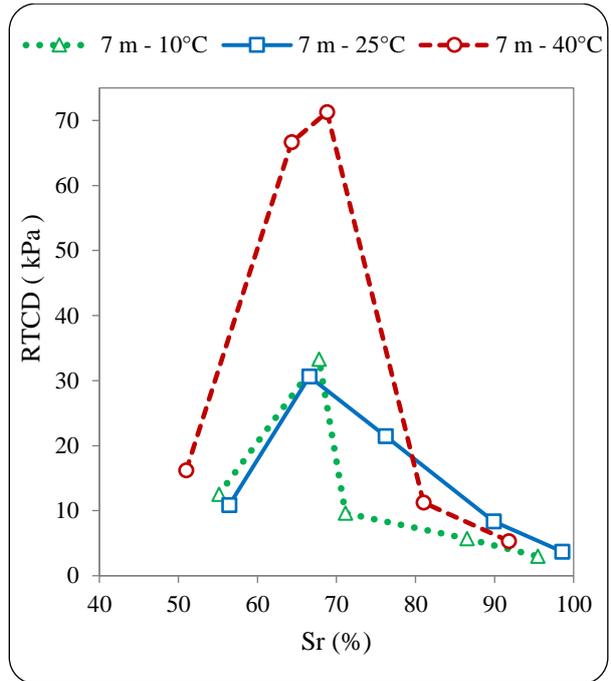
c2)



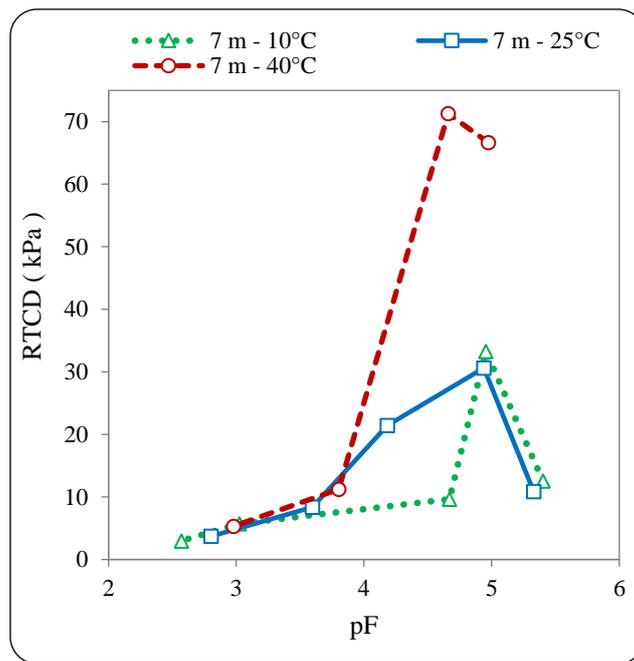
c3)



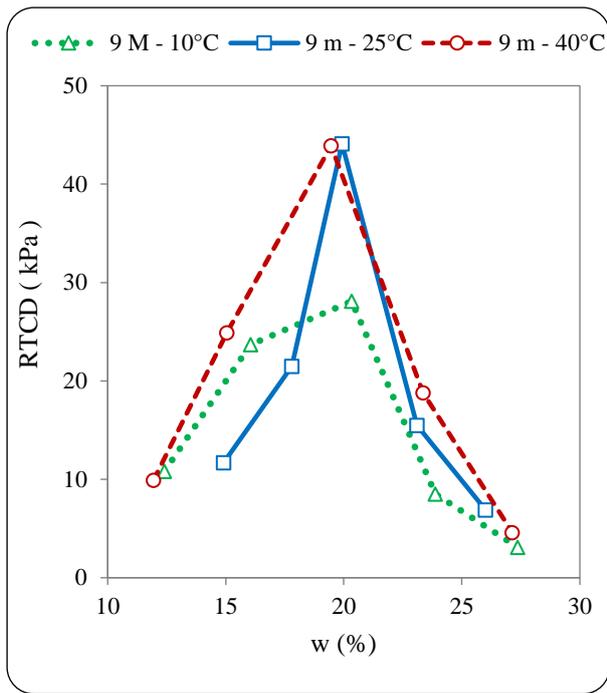
d1)



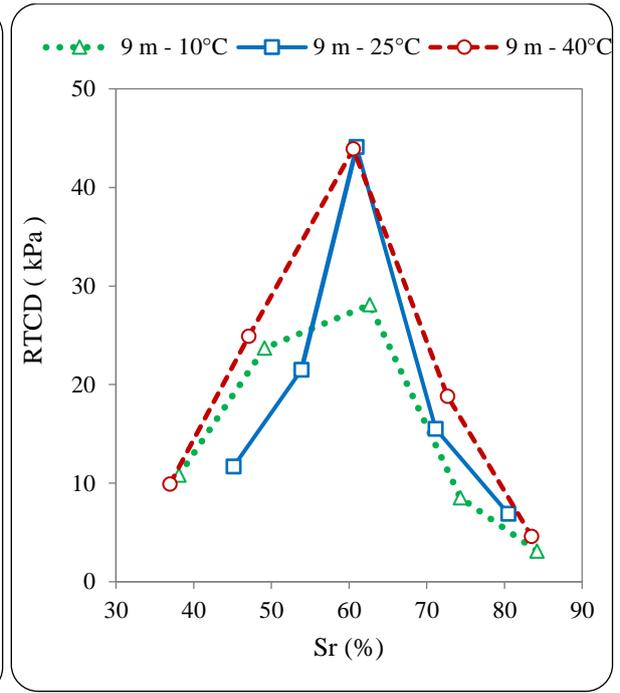
d2)



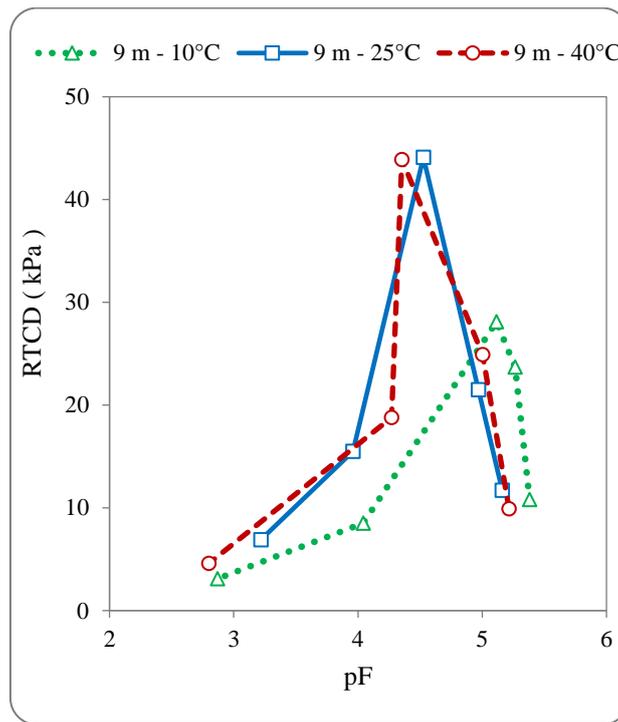
d3)



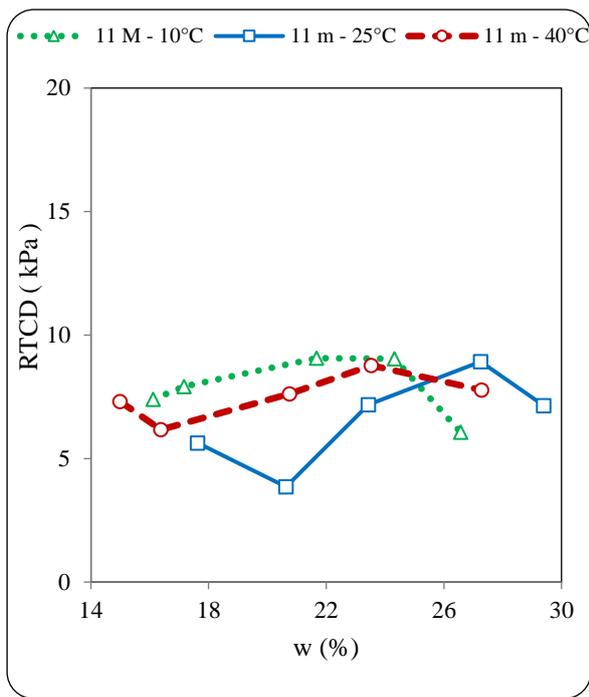
e1)



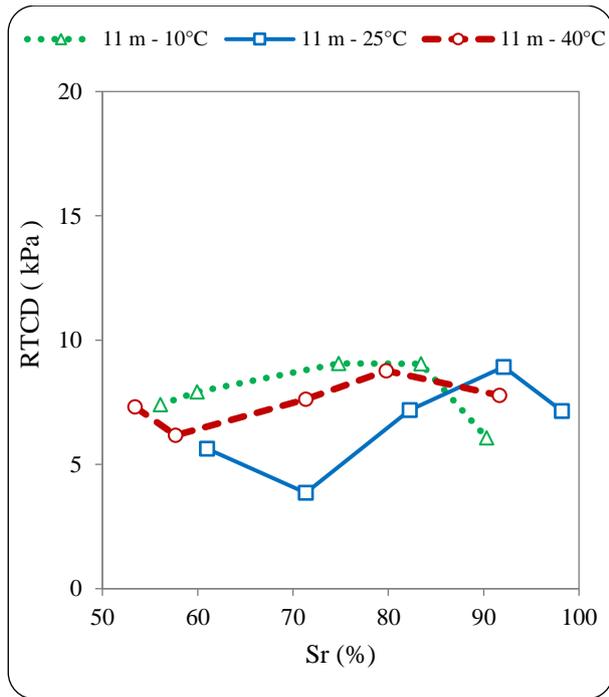
e2)



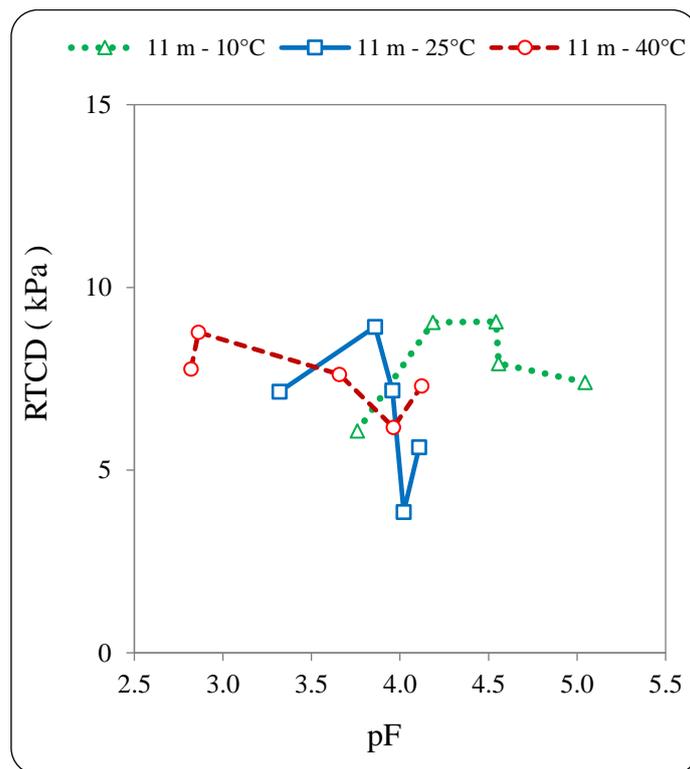
e3)



f1)



f2)



f3)

Figura 4.42 – Resistência à tração dos solos coletados ao longo do perfil de intemperismo em função da: Umidade (a1, b1, c1, d1, e1, f1); Saturação (a2, b2, c2, d2, e2, f2) e Sucção (a3, b3, c3, d3, e3, f3)

Na Figura 4.43 apresenta o gráfico de RTCD em função da sucção matricial (pF). Esta Figura torna os resultados comparativamente mais claros e respondendo ao esperado quando se trata de solos tropicais profundamente intemperizados incluindo-se neste caso o de transição e saprolíticos (11 m).

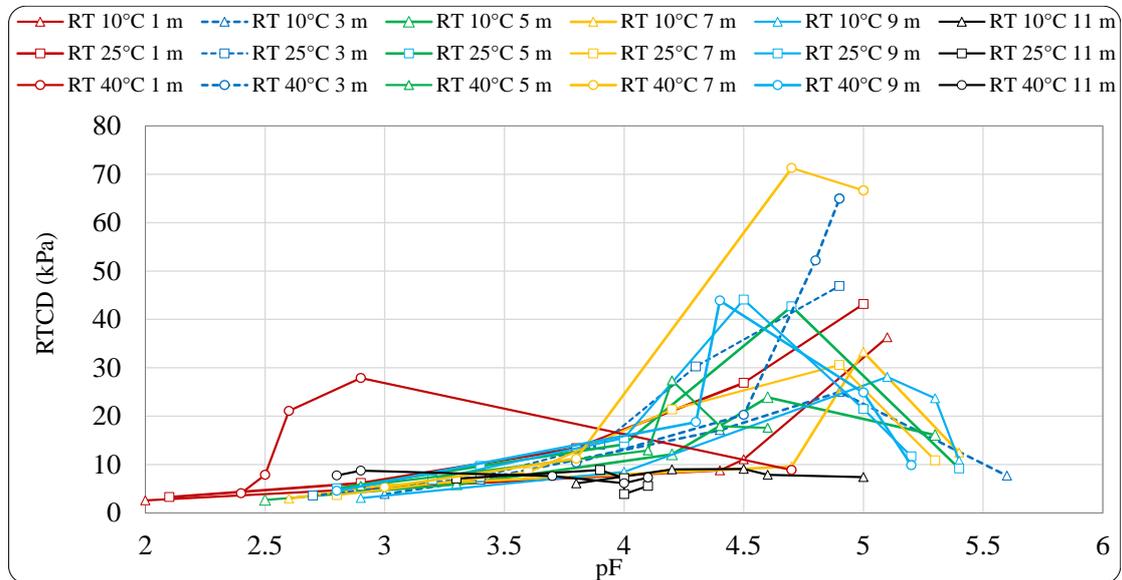


Figura 4.43 – Resistência à tração de todos os solos estudados com variação de temperatura (10 °C, 25 °C e 40 °C)

Os resultados apresentados neste item indicam que a temperatura pode afetar as propriedades e comportamento dos solos tropicais a depender das características do solo. Tal constatação é importante, pois mostra a necessidade não só de se ampliar os estudos sobre o tema como também a necessidade de se fazer atenção à possibilidade de se ter influências relevantes no resultado da compactação e no comportamento hidromecânico dos solos tropicais.

#### 4.7 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA PARA AS TEMPERATURAS 10 °C, 25 °C E 40 °C

Nos perfis de intemperismo tropical geralmente as curvas características dos solos em estado natural apresentam formas que variam de monomodal (solos saprolíticos ou pouco intemperizados) a bimodal (solos lateríticos ou profundamente intemperizados), no entanto, a compactação ao reduzir a macroporosidade entre os agregados presentes nos solos profundamente intemperizados faz com que a curva característica de retenção de água destes solos se aproxime

da forma monomodal devido à redução da macroporosidade. Também os solos areno-quartzosos profundamente intemperizados devido ao seu baixo teor de agregados predominando a cimentação entre os grãos de quartzo tendem a apresentarem curvas características monomodais.

Nesta pesquisa para as seis profundidades do perfil de intemperismo estudado foram determinadas as curvas características considerando-se três temperaturas: 10 °C, 25 °C e 40 °C.

Os solos estudados coletados de 1 m até 7 m de profundidade na condição natural são profundamente intemperizados e apresentam nas suas estruturas agregações e cimentações com presença de macroporos entre os agregados e microporos em seus interiores. Essa condição macroporosa é destruída na fase de preparação da amostra para o ensaio de compactação preservando-se, no entanto, os agregados e microagregados. No processo de compactação, os agregados, embora dependa da estabilidade deles, são geralmente na maioria preservados e a presença de macroporos entre eles vai depender da energia e umidade de compactação usadas.

As Figuras 4.44 (a), (b) e (c) apresentam respectivamente as curvas características solo-água em função do teor de umidade gravimétrica ( $w$ ), teor de umidade volumétrica ( $\theta$ ) e do grau de saturação ( $S_r$ ) obtidas para a profundidade de 1 m submetendo-se os corpos de prova à climatização por 15 dias nas temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C. Percebe-se nestas figuras um formato que se aproxima daquele monomodal que é típico dos solos pouco intemperizados devido ao fechamento da macroporosidade em consequência da compactação.

Ao se comparar as curvas características obtidas para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C, observa-se que na zona de microporos ( $w < 12\%$ ;  $\theta < 18\%$ ;  $S_r < 42\%$ ) o solo apresentou resultados similares nas três temperaturas analisadas. Para teores de umidade e grau de saturação superiores a estes limites, ou seja, na zona de meso e macroporos os resultados de sucção matricial para a temperatura 40 °C foi nitidamente inferior aos obtidos para as demais temperaturas. Embora com alternância de dois pontos intermediários, observa-se ainda a tendência nesse trecho da curva característica, dos resultados da sucção matricial obtidos para a temperatura 10 °C serem inferiores aos obtidos para a temperatura 25 °C.

Tendo em vista que tanto a porosidade como a umidade interferem na sucção matricial analisou-se as curvas características considerando-se a sucção matricial transformada pelo índice de vazios em função do grau de saturação conforme proposta de Camapum de Carvalho

e Leroueil (2004). Os resultados obtidos para a profundidade de 1 m são apresentados na Figura 4.44d. Observa-se nessa figura que as tendências são mantidas cabendo destacar que a alternância dos valores de sucção obtidos para 10 °C e 25 °C tendeu a desaparecer prevalecendo a similaridade de resultados entre 40 e 60 % de grau de saturação e maiores sucções para a temperatura de 25° C a partir de 60% de grau de saturação.

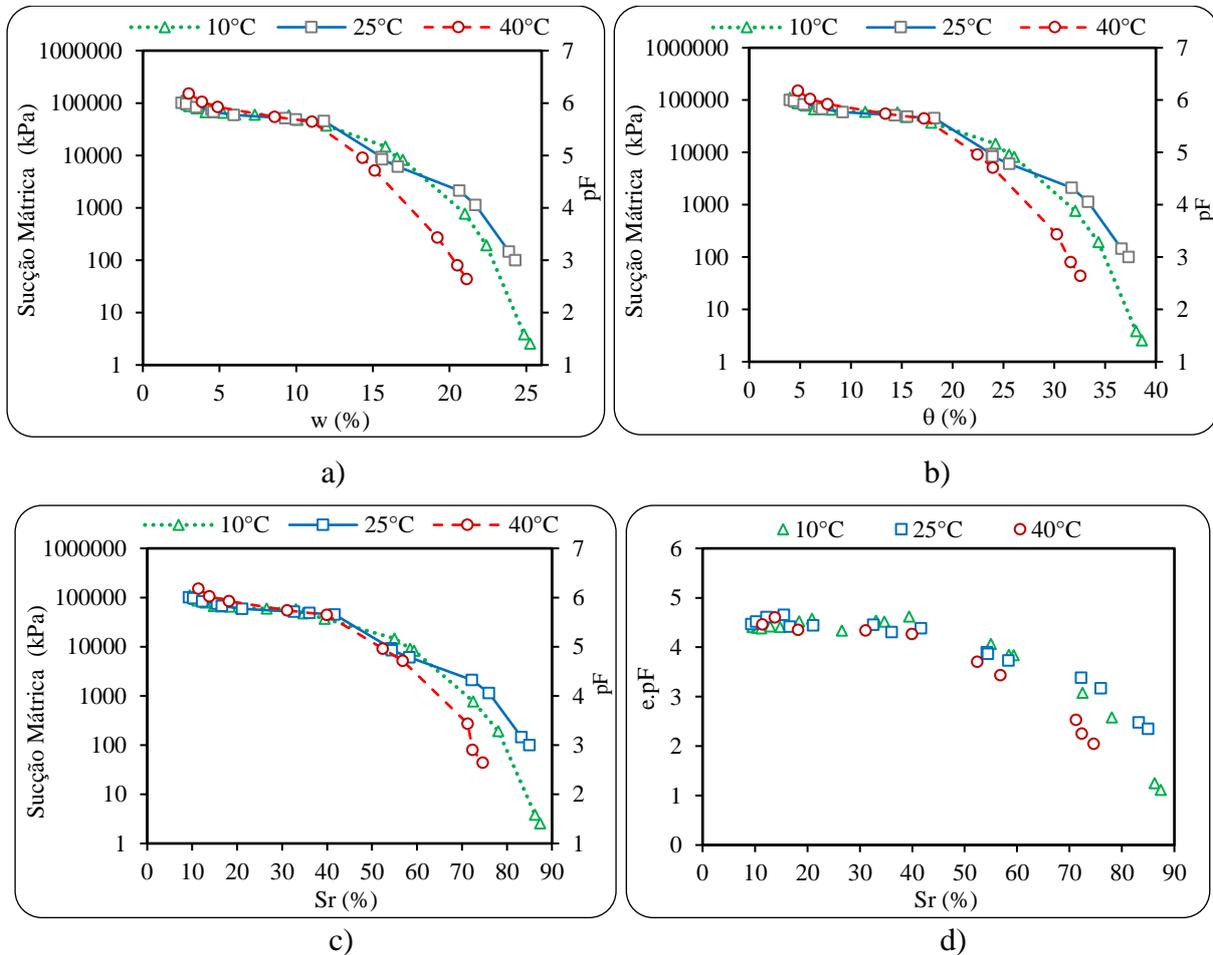


Figura 4.44 – Curvas características de retenção de água para o solo de 1 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr.

As Figuras 4.45 (a), (b) e (c) apresentam os resultados de sucção matricial obtidos para a profundidade de 3 m. Eles apontam para a diminuição da sucção matricial com o aumento da temperatura ao longo de todas as curvas características de retenção de água, sejam elas plotadas em função da umidade gravimétrica (a), umidade volumétrica (b) ou do grau de saturação (c) sendo que apenas dois pontos já na zona ascendente para entrada de ar no solo as sucções para 25 °C superam as obtidas para 10 °C, o que pode ser considerado, devido ao trecho em que se

encontra como uma anomalia nos resultados. Percebe-se nestas figuras um formato que se aproxima daquele monomodal como observado para o solo oriundo da profundidade 1m.

A análise dos resultados considerando-se as curvas características transformadas pelo índice de vazios em função do grau de saturação mantiveram a tendência observada nas demais figuras colocando, no entanto, em maior destaque os menores valores de sucção em termos de e.pF para o solo submetido à temperatura 40 °C (Figura 4.45 d).

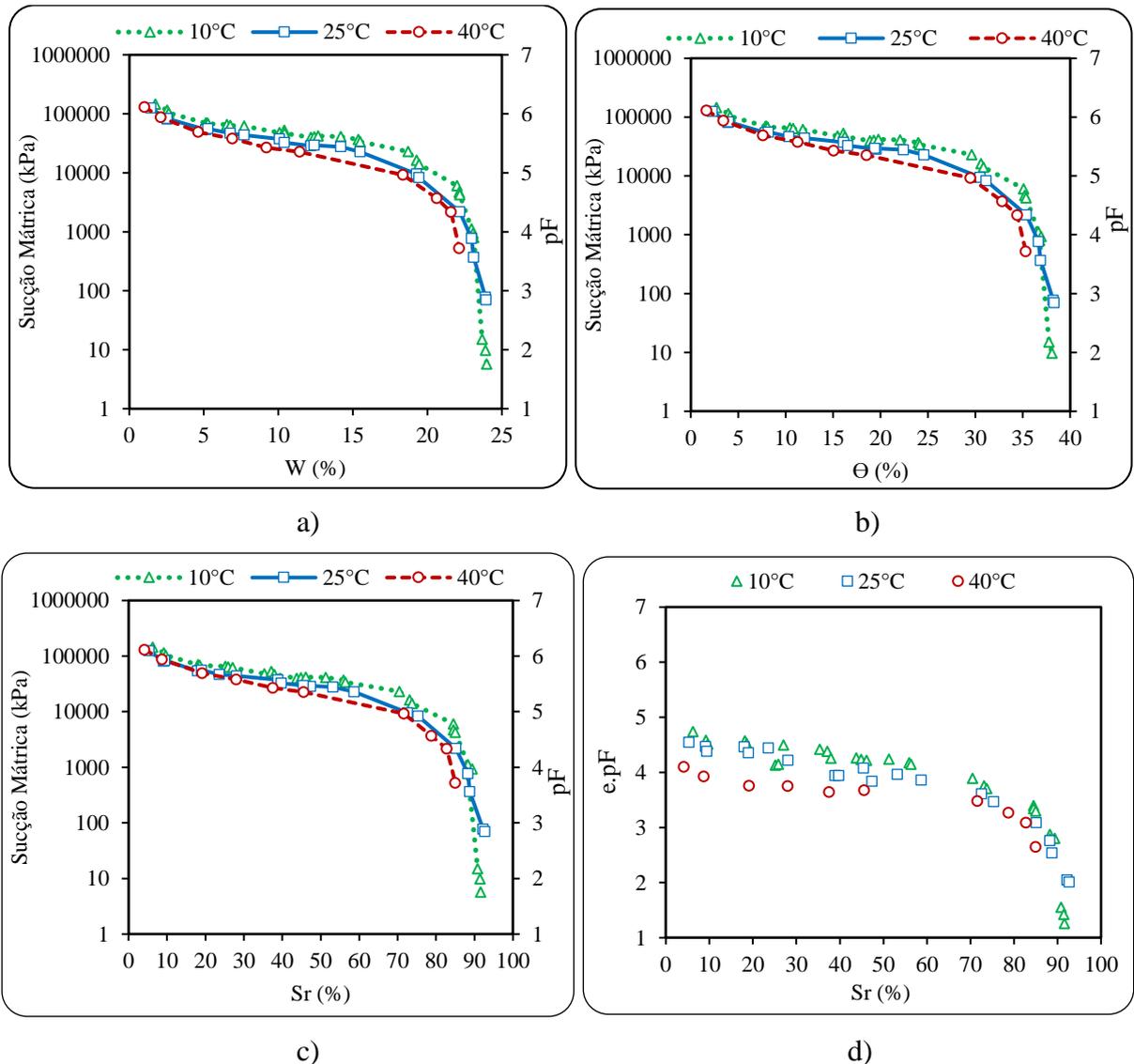
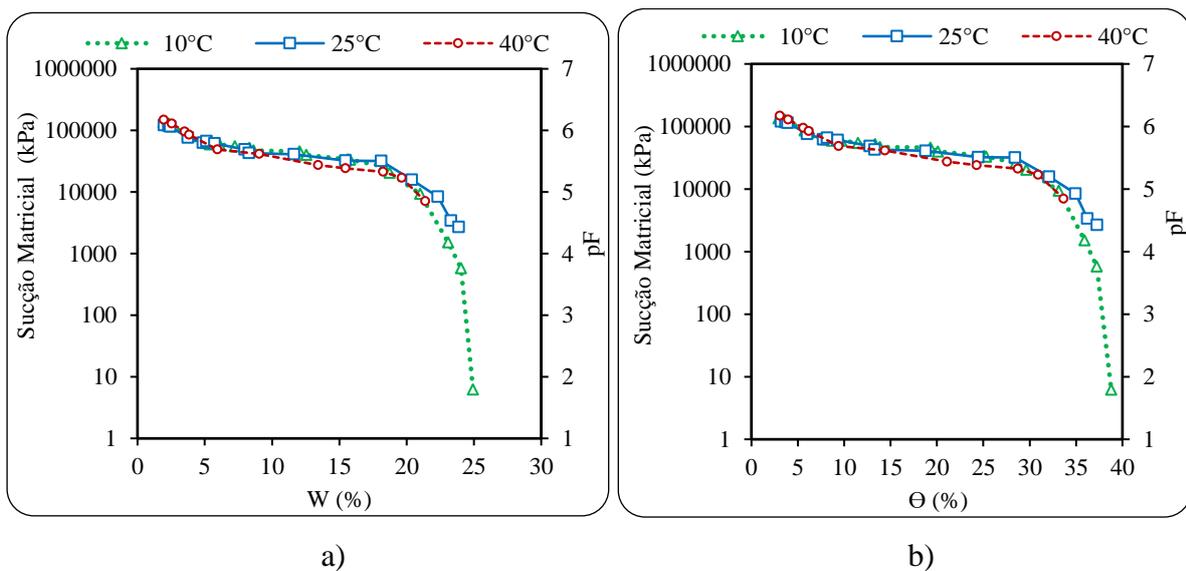
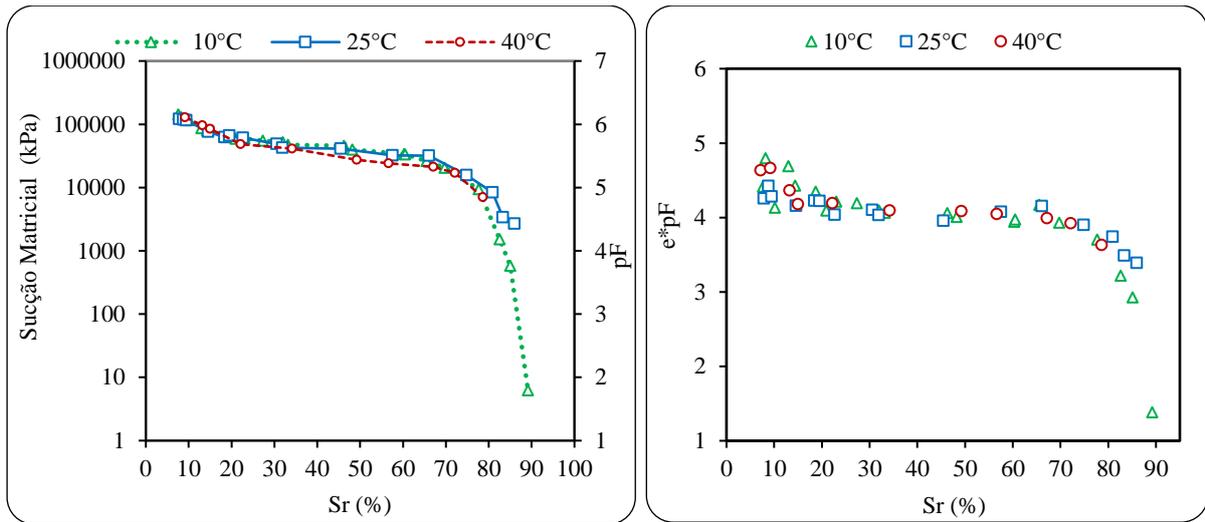


Figura 4.45 – Curvas características de retenção de água para solo de 3 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica (θ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr

As Figuras 4.46 a, b e c apresentam respectivamente as curvas características de retenção de água em função do teor de umidade gravimétrica ( $w$ ), teor de umidade volumétrica ( $\theta$ ) e do grau de saturação ( $S_r$ ) obtidas para a profundidade de 5 m. Como para as profundidades já analisadas percebe-se nestas figuras um formato que se aproxima daquele monomodal.

Ao se comparar as curvas características de retenção de água obtidas para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C, observa-se que na zona de microporos ( $w < 9\%$ ;  $\theta < 13\%$ ;  $S_r < 34\%$ ) o solo apresentou resultados similares nas três temperaturas analisadas. Para teores de umidade e grau de saturação superiores aos limites de entrada de ar nos microporos, ou seja, na zona de meso e macroporos, os resultados de sucção matricial são bastante similares indicando apenas a tendência de valores mais elevados de sucção para a temperatura 25 °C. O tratamento dos resultados considerando-se a relação entre  $e.pF$  e o grau de saturação confirmam esse entendimento (Figura 4.46 d).



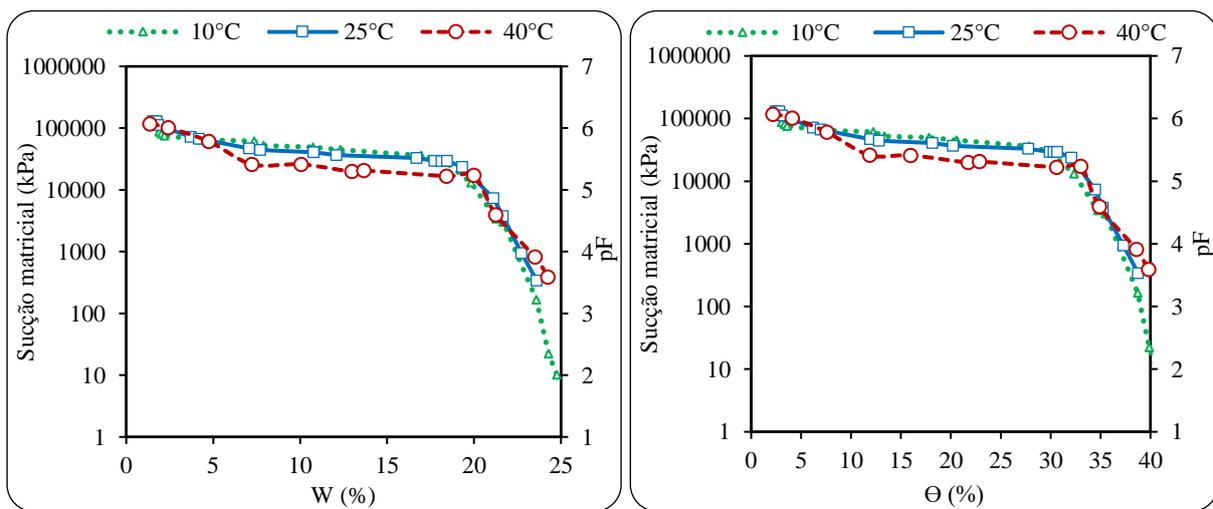


c)

d)

Figura 4.46 – Curvas características de retenção de água para solo de 5 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Sr e d) e.pF x Sr

Para a profundidade de 7 m, as Figuras 4.47 (a), (b) e (c) plotadas respectivamente em função da umidade gravimétrica (a), umidade volumétrica (b) e grau de saturação (c) apontam na zona de microporos para valores de sucção similares para as temperaturas 10 °C e 25 °C sendo estas superiores aos resultados obtidos para 40 °C. No restante das curvas, ou seja, na zona de meso e macroporos se observa a tendência da sucção aumentar com o crescimento da temperatura. Destaca-se, no entanto, que apesar de uma certa dispersão dos resultados na zona de microporos observa-se na Figura 4.47 (d) que os resultados obtidos se sobrepõem quando analisados em função de e.pF.



a)

b)

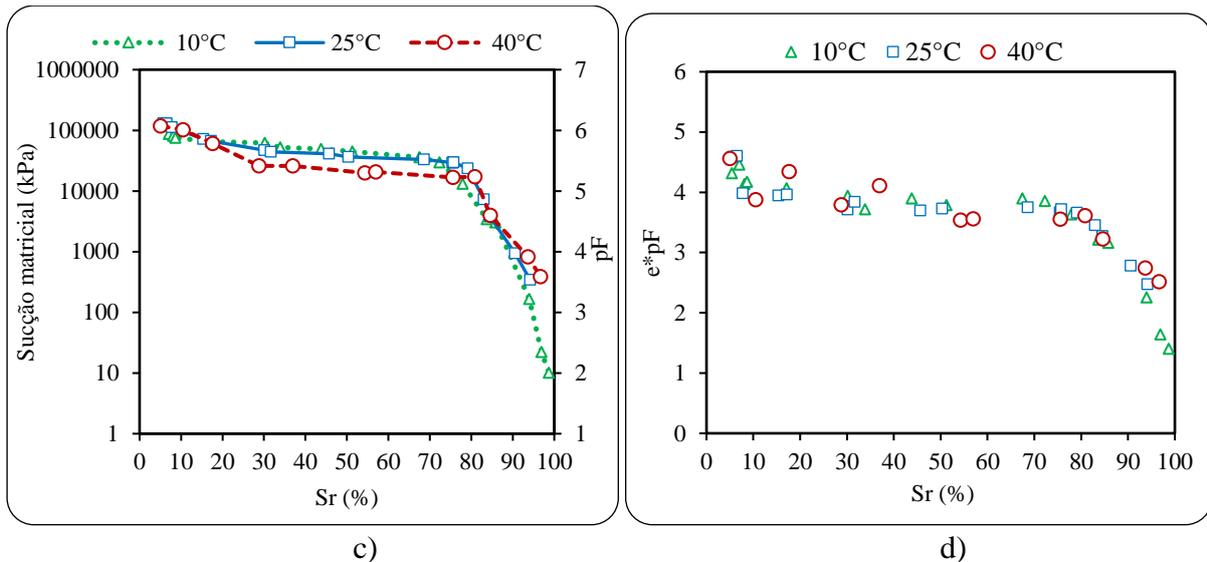


Figura 4.47 – Curvas características de retenção de água para o solo coletado à 7 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica ( $w$ ); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação ( $S_r$ ) e d)  $e.pF$  x  $S_r$

As Figuras 4.48 (a), (b) e (c) apresentam respectivamente as curvas características de retenção de água em função do teor de umidade gravimétrica ( $w$ ), teor de umidade volumétrica ( $\theta$ ) e do grau de saturação ( $S_r$ ) obtidas para a profundidade de 9 m. Nestas figuras o formato monomodal é mais marcante que para a profundidade de 1 m (Figura 4.39) dada a maior deformabilidade e menor estabilidade dos agregados conforme discutido nas análises granulométricas, item 4.3, o que resultou na ampliação da zona de microporosidade em relação à profundidade de 1 m.

Na zona de microporosidade ( $w < 20\%$ ;  $\theta < 31\%$  e  $S_r < 72\%$ ) se observa nas Figuras 4.48 (a), (b) e (c) um comportamento similar ao observado para a profundidade 7 m, ou seja, menores valores de sucção para a temperatura 40 °C. No entanto, quando do tratamento dos resultados em termos de  $e.pF$  as curvas se sobrepõem, inclusive nesse trecho de microporos (Figura 4.48 d).

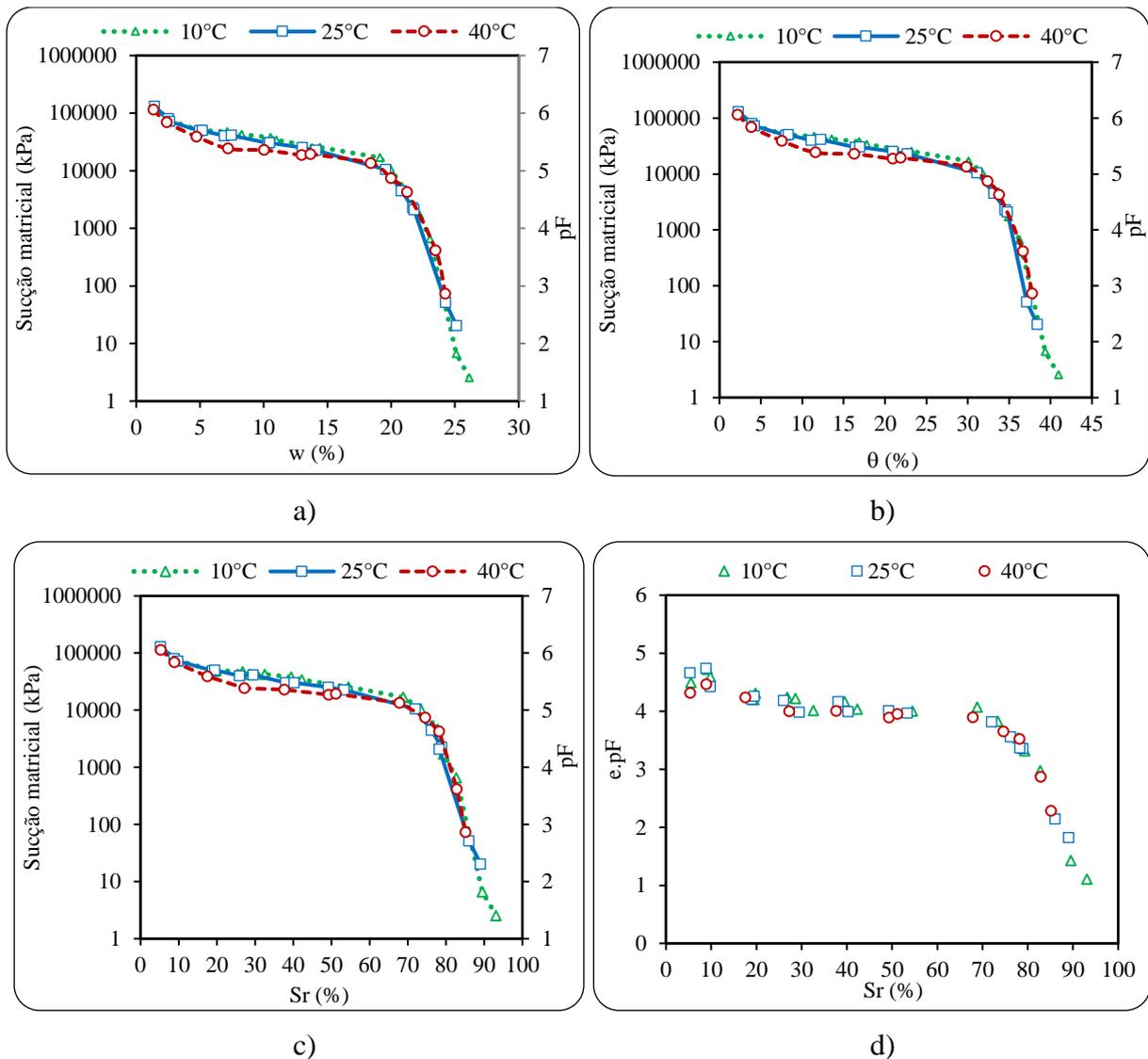


Figura 4.48 – Curvas características de retenção de água para solo de 9 m: a) Sucção x Umidade gravimétrica (w); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação (Sr) e d) e.pF x Sr

A Figura 4.49 (b) mostrou que o solo proveniente da profundidade 11 m é globalmente mais poroso que aqueles oriundos das profundidades 1 m e 9 m. Essa maior porosidade global refletiu na ampliação da zona de microporosidade nas curvas características de retenção de água matriciais (Figura 4.49) e no aumento da umidade necessária à saturação do solo.

As Figuras 4.49a, b e c apontam para a diminuição da sucção matricial com o aumento da temperatura ao longo de todas as curvas características de retenção de água, sejam elas plotadas em função da umidade gravimétrica a), umidade volumétrica b) ou do grau de saturação c). No entanto, quando analisados os resultados por meio do gráfico e.pF x Sr,

verifica-se que tal tendência só se mantém para a zona de meso e macroporos ( $S_r > 75\%$ ), sendo os resultados similares na zona de microporos ( $S_r < 75\%$ ). Cabe destacar que esse solo é marcado pela ausência de agregados sendo a distribuição de poros monomodal e os microporos resultantes da aproximação das partículas devido ao processo de compactação.

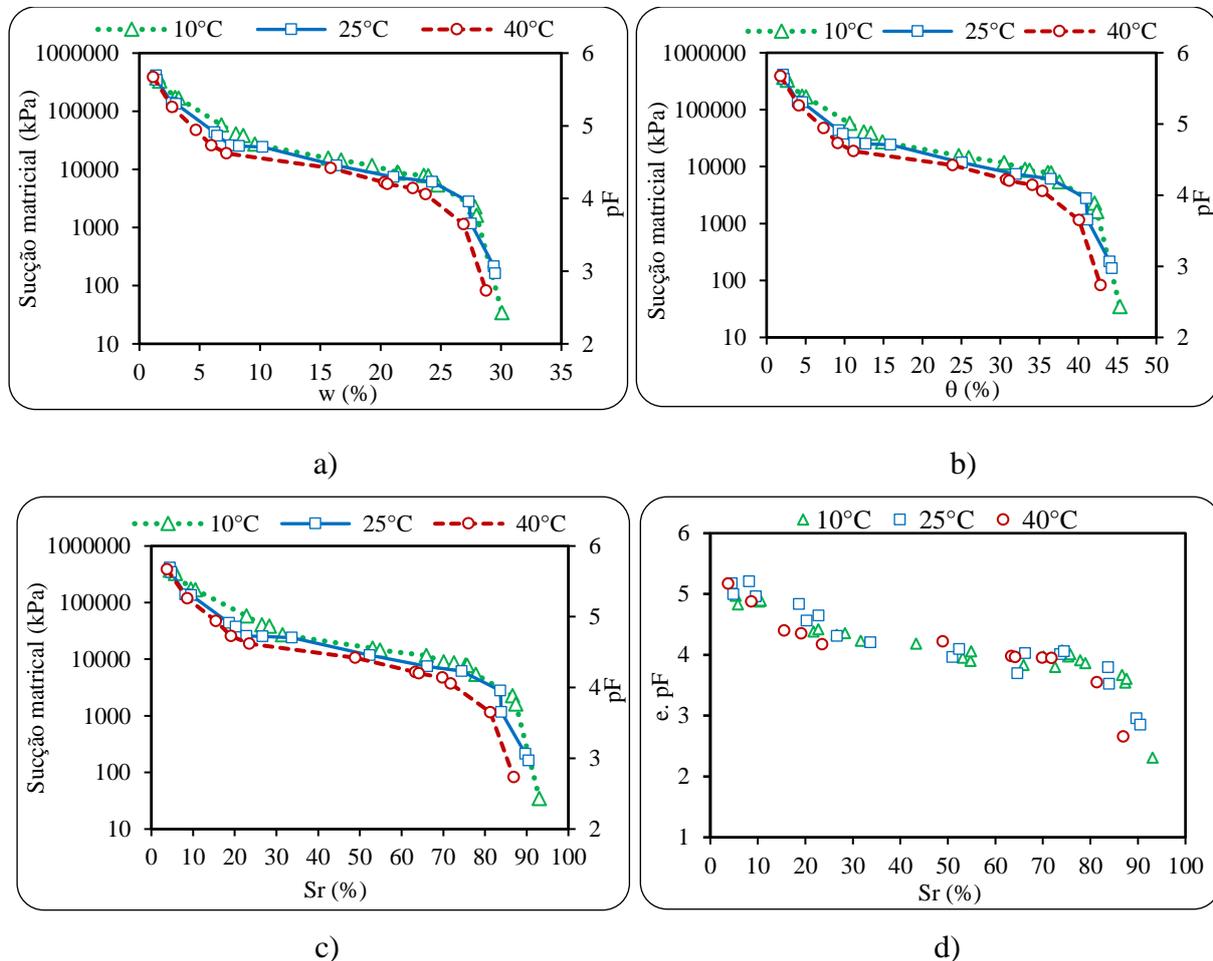
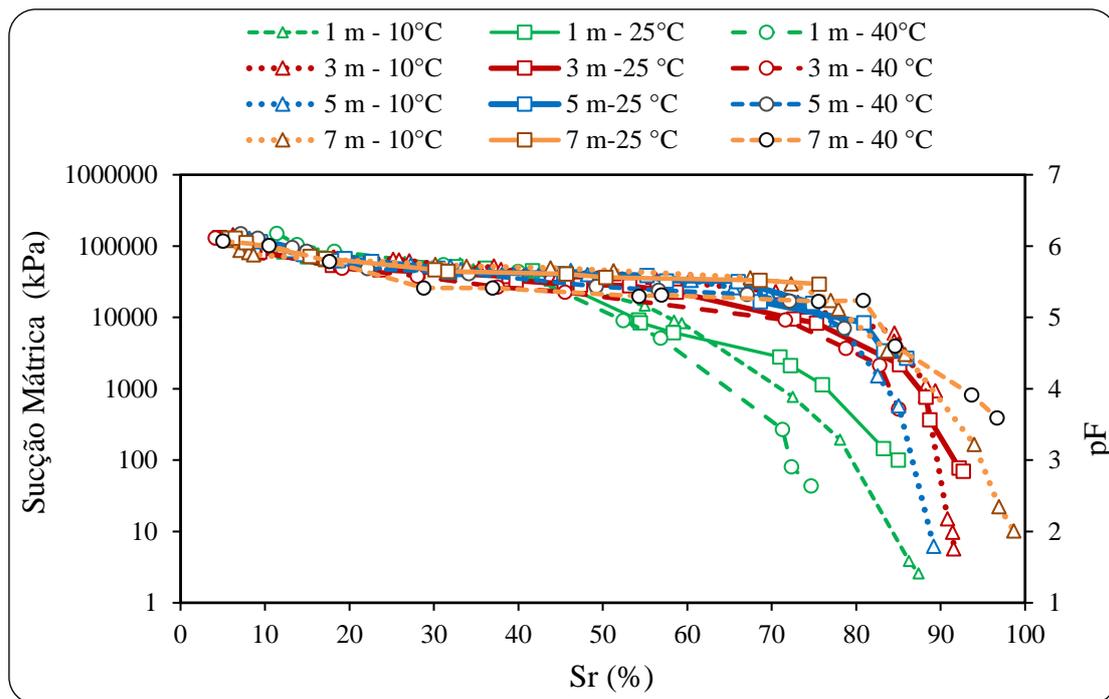


Figura 4.49 – Curvas características para o solo coletado à 11 m de profundidade: a) Sucção x Umidade gravimétrica ( $w$ ); b) Sucção x Umidade volumétrica ( $\theta$ ); c) Sucção x Grau de saturação ( $S_r$ ) e d)  $e.pF$  x  $S_r$

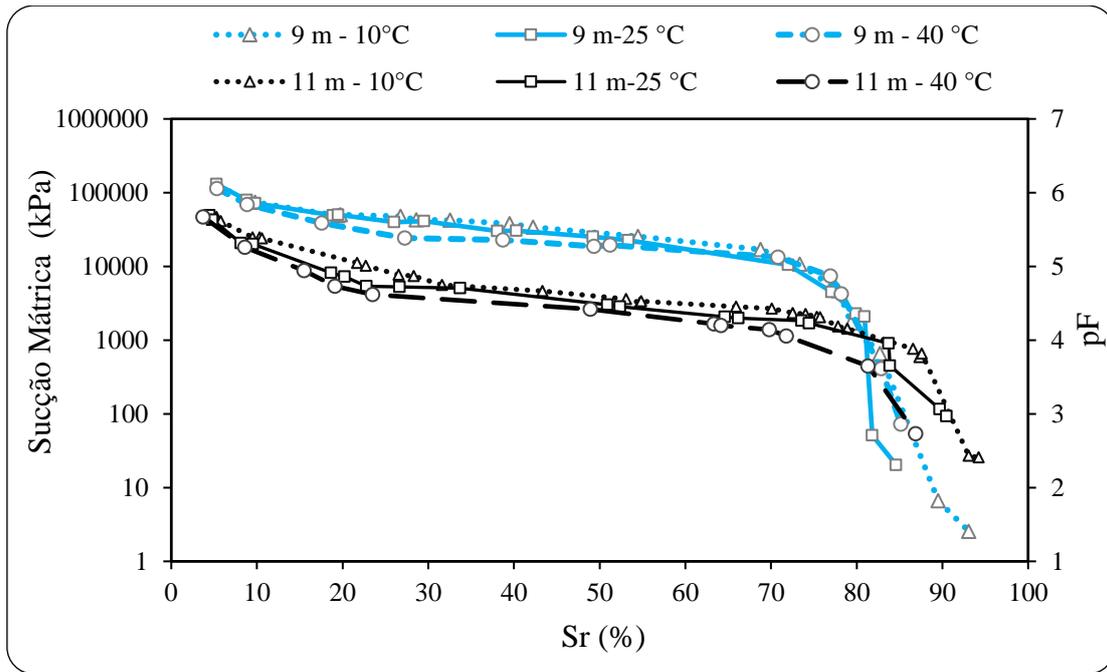
Para o perfil de intemperismo analisado, considerando-se os resultados obtidos para as quatro profundidades correspondentes ao solo profundamente intemperizado, conclui-se, a partir dos gráficos  $e.pF$  x  $S_r$ , que as temperaturas utilizadas, exceto para a profundidade de 3 m, não afetaram as curvas características solo-água nos trechos correspondentes aos microporos. No entanto, ao se adentrar nas zonas de meso e macroporos se observa uma nítida redução da sucção para as profundidades de 1 m, 3 m e 11 m quando do uso da temperatura 40 °C.

A Figura 4.50a apresenta o conjunto de resultados obtidos para o trecho profundamente intemperizado do perfil de intemperismo tropical analisado, ou seja, para as amostras coletadas a 1 m, 3 m, 5 m e 7 m de profundidade. Nesta Figura apenas a profundidade de 1 m se distingue de modo marcante das demais. Os resultados apresentados na Figura 4.50b para o solo de transição coletado a 9 m de profundidade e para o solo saprolítico oriundo da profundidade de 11 m mostram formas de curvas similares apenas com valores de sucção mais elevado para o solo de transição. Em termos de formato das curvas a Figura 4.50c mostra que exceto o solo coletado a 1 m de profundidade eles são todos similares.

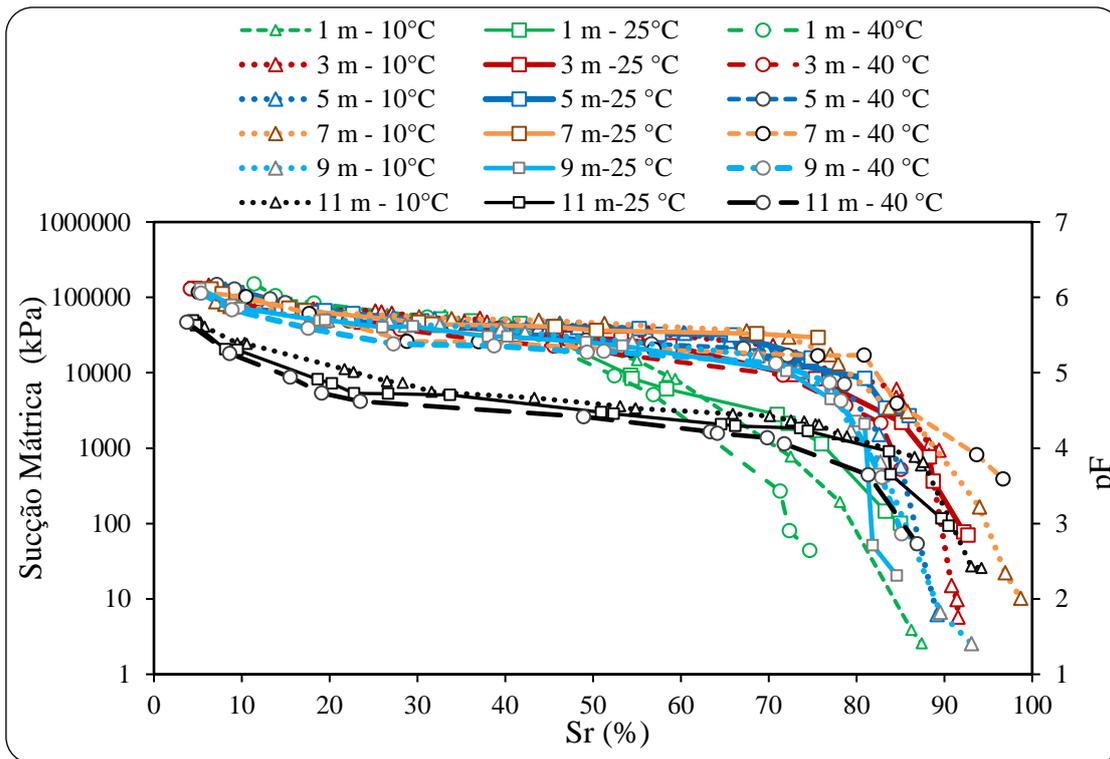
A Figura 4.51 mostra que embora apresentando certa dispersão, inclusive em parte oriunda das influências térmicas, os resultados quando tratados em termo de  $e.pF$  convergem para uma tendência única, respeitando as diferenças de ordem químico-mineralógicas, aproximando inclusive os resultados obtidos para as profundidades 1 m e 11 m reafirmando assim o potencial do método como ferramenta de análise.



a)



b)



c)

Figura 4.50 – Comparação entre as curvas características de retenção de água dos solos compactados considerando-se: a) 1 m, 3 m, 5 m, e 7 m; b) 9 m e 11 m e c) Todas as profundidades

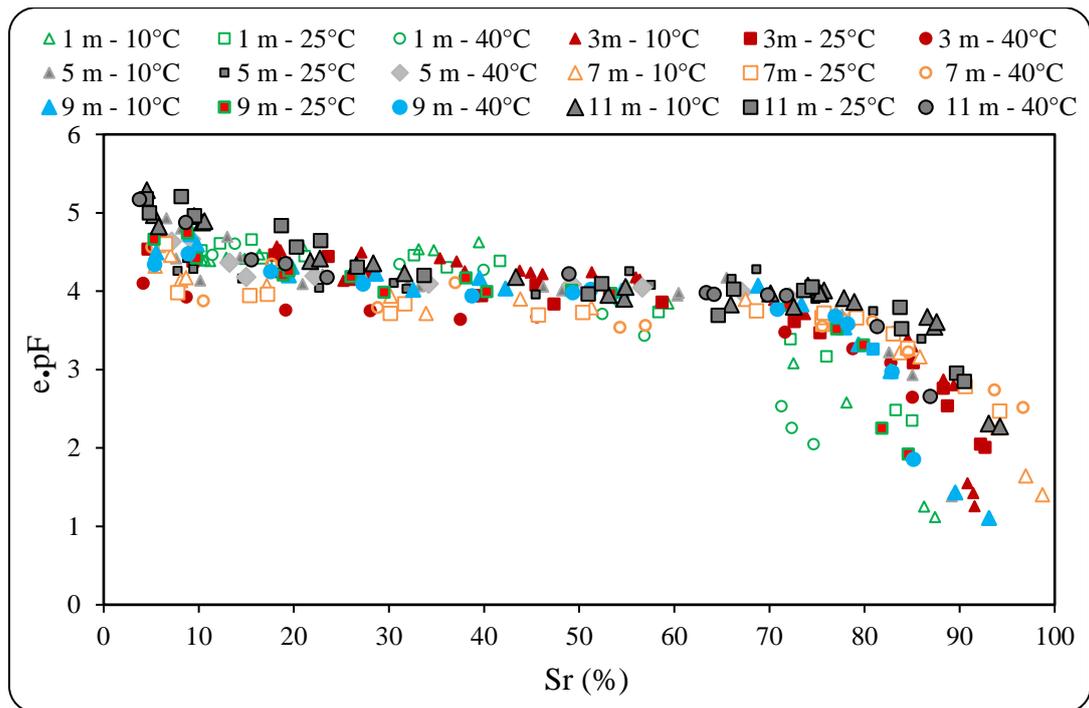


Figura 4.51 – Curvas características de retenção de água transformadas e.pF x Sr dos solos compondo o perfil de intemperismo analisado

#### 4.8 ENSAIO DE RTCD APÓS DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral realizados sobre os corpos de prova utilizados nas definições das curvas características após o tratamento térmico nas temperaturas 10 °C, 25 °C e 40 °C. Os ensaios objetivaram analisar a influência da sucção e da temperatura na resistência a tração por compressão diametral. Cabe destacar que apesar do curto intervalo de tempo usado na montagem e realização dos ensaios algumas variações nas temperaturas iniciais dos corpos de prova certamente ocorreram afetando um dos objetivos do estudo, avaliar o impacto da temperatura no comportamento dos solos estudados.

Embora o comportamento mecânico seja função de vários fatores como composição químico-mineralógica do solo, umidade, índice de vazios, e sucção, optou-se por analisar os resultados obtidos em função do grau de saturação (Sr) por englobar a umidade, o índice de vazios e a densidade dos grãos que guarda relação com a composição químico-mineralógica do solo (Figura 4.52), e em função da relação pF (logarítimo da sucção em cm de coluna de água)/e (Figura 4.53).

Antes de dar início a apresentação e discussão dos resultados obtidos, cabe lembrar que conforme apresentado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021), a resistência à tração dos solos profundamente intemperizados, contendo agregados, perde a relação direta com a sucção, e por consequência, com o grau de saturação quando esta passa a atuar na zona de microporos devido à redução da atuação da sucção nos contatos entre os agregados e microagregados. Logo, a resistência à tração aumenta com a sucção até o ponto de entrada de ar dos microporos, passando em seguida a diminuir. Já em relação ao grau de saturação ela aumenta com a sua diminuição até o ponto onde a umidade passa a integrar de modo predominante o interior das agregações.

A Figura 4.52 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração dos solos coletados nas profundidades 1 m e 3 m (a), 5 m e 7 m (b) e 9 m e 11 m (c) em função do grau de saturação ( $S_r$ ). Verifica-se nos gráficos destas Figuras pontos de máxima resistência à tração situados entre 40% e 60% de grau de saturação ( $S_r$ ), ou seja, para valores de  $S_r$  menores que essa faixa o solo passa a ser pouco afetado pela sucção. Nessa faixa de  $S_r$  não se verifica uma tendência clara de impacto da temperatura na RTCD, embora ela esteja a afetá-la gerando para as profundidades 1 m, 3 m e 5 m diferenças significativas nos resultados. Já para as amostras coletadas a 7 m e 9 m de profundidade o impacto da temperatura nos resultados mostrou-se pequeno. Considerando-se o intervalo de grau de saturação após esse pico, que é onde a sucção vai atuar de modo mais direto e efetivo, verifica-se para que para as profundidades 1 m, 3 m e 5 m ocorre um aumento da RTCD com a ampliação da temperatura.

Para a profundidade de 7 m a influência da temperatura na RTCD não é clara e para a profundidade 9 m, embora com menor impacto, observa-se o comportamento registrado para as profundidades 1 m, 3 m e 5 m. Para o solo coletado a 11 m de profundidade não se detecta influência da temperatura nos resultados de RTCD em função do grau de saturação.

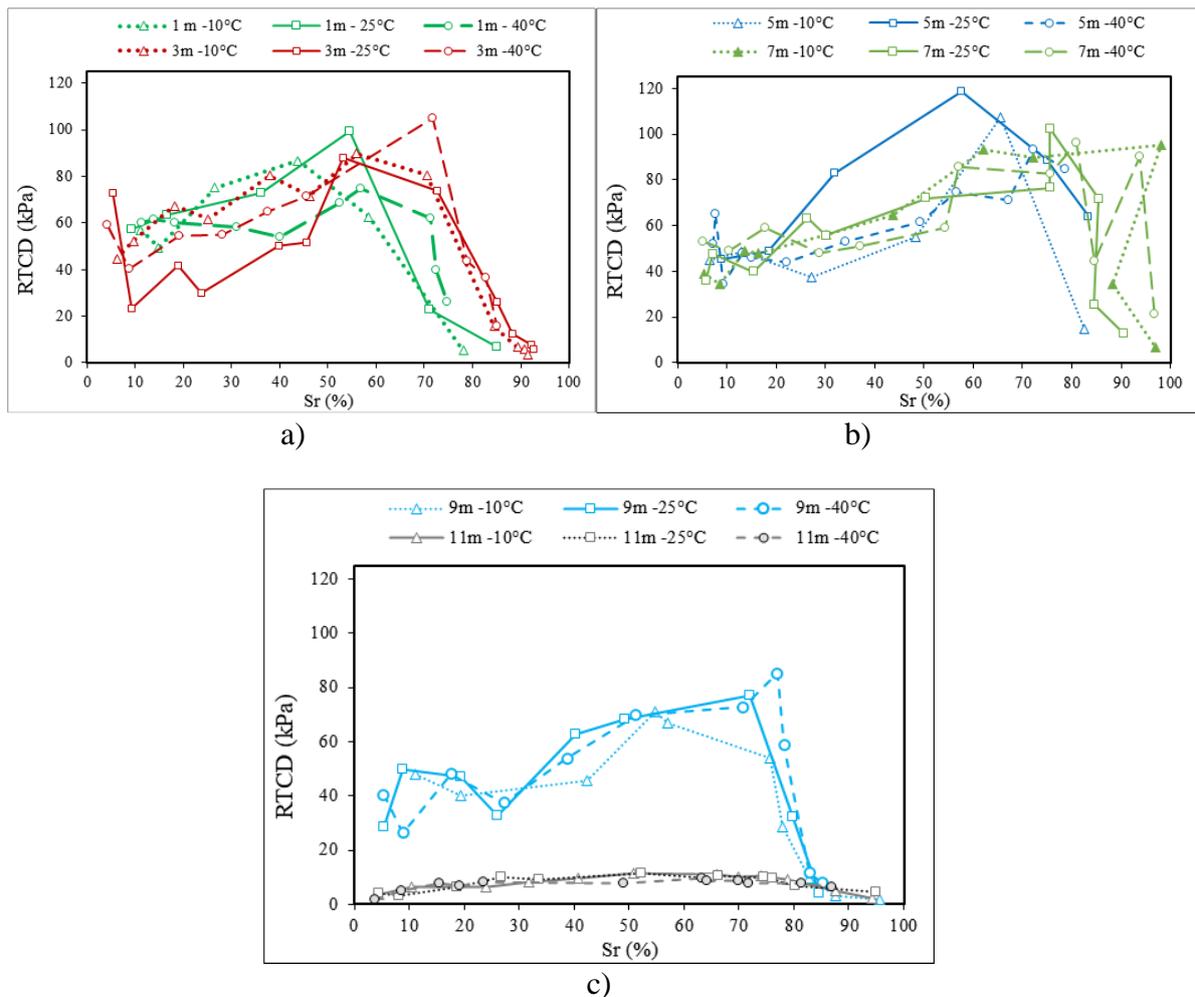


Figura 4.52 – Resultados de RTCD x Sr para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C obtidos para as profundidades: a) 1 m e 3 m; b) 5 m e 7 m e c) 9 m e 11 m

A Figura 4.53 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração dos solos coletados nas profundidades 1 m e 3 m (a), 5 m e 7 m (b) e 9 m e 11 m (c) em função de pF/e. Verifica-se nos gráficos destas Figuras pontos de máxima resistência à tração situados em pF/e entre 6 e 8 com predominância entre 7 e 8. Para valores de pF/e superiores aos de pico torna difícil definir tendências de comportamento pois a sucção já não interfere diretamente nele. Para valores de pF/e inferiores aos valores de máxima RTCD se observa uma clara tendência de aumento da RTCD com a ampliação da temperatura para todas as profundidades, inclusive 11 m.

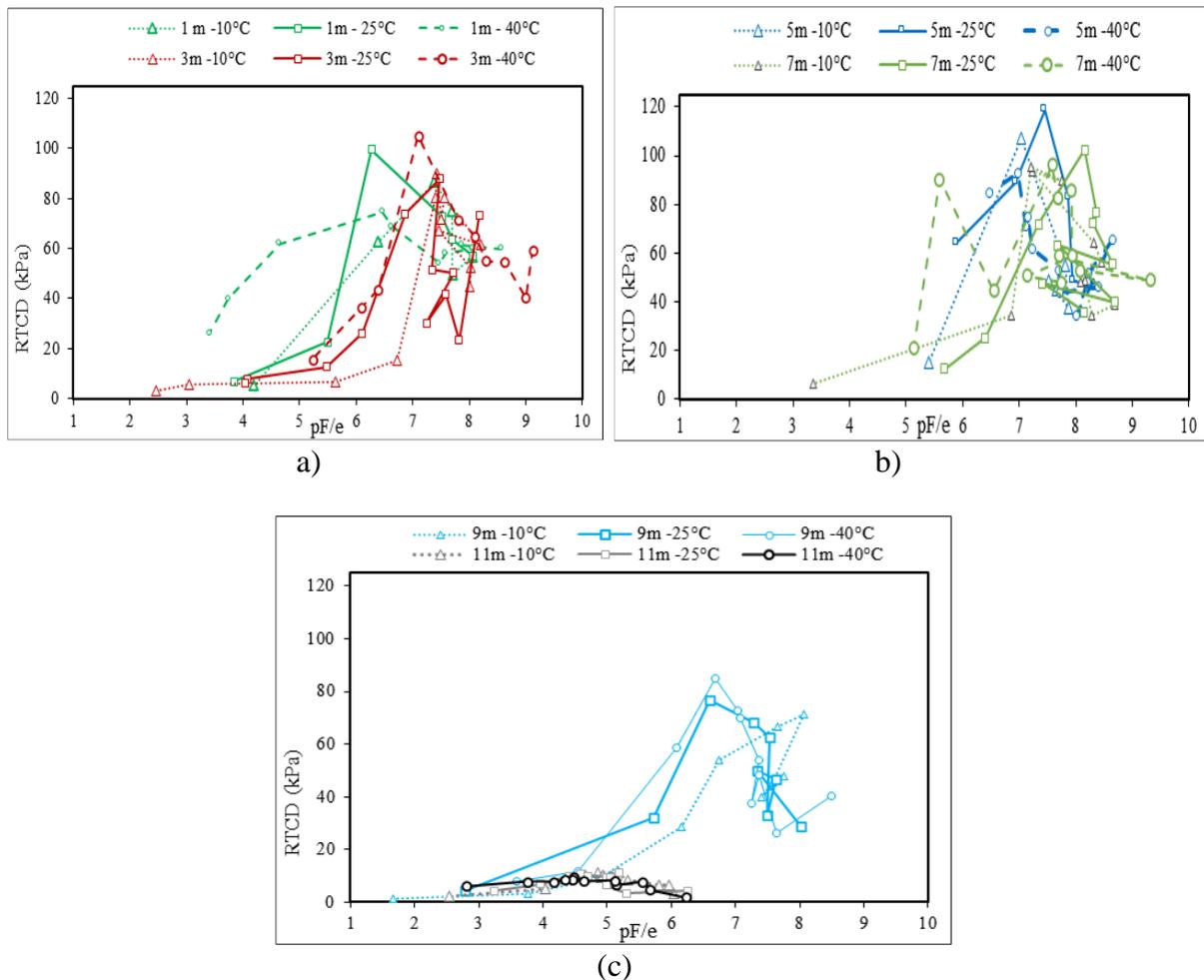


Figura 4.53 – Resultados de RTCD x pF/e para as temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C obtidos para as profundidades: a) 1 m e 3 m; b) 5 m e 7 m e c) 9 m e 11 m

#### 4.9 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO RESILIENTE (MR) E RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados seguindo as normas DNIT - 134/2018b e DNIT – 181/2018c. Na preparação das amostras se adotou a metodologia DNER (1994b). A marca do equipamento utilizado é *Universal Testing Machine - UTM*. A síntese detalhada dos resultados encontra-se apresentada nas Tabelas A.1, B.1 e C.1 contendo respectivamente as constantes de regressão para os materiais estudados referentes ao modelo composto para as temperaturas 10 °C, 25°C e 40 °C, e nas Figuras A.1, B.1 e C.1 contendo respectivamente os gráficos 3D Modelo composto para a umidade ótima, umidade ótima-2% e

umidade ótima+2% nas temperaturas 10 °C, 25°C e 40 °C. Cada uma destas Figuras apresenta os gráficos numerados progressivamente com as profundidades.

Sobre os corpos de prova utilizados na determinação dos módulos resilientes (MR) foram determinadas as resistências à tração por compressão diametral.

#### **4.9.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO RESILIENTE (MR)**

Os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados visando a determinação dos módulos de resiliência dos solos oriundos das profundidades de 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m e compactados dinamicamente na energia correspondente ao Proctor intermediário. Analisou-se amostras submetidas por três dias às temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C após compactadas nas umidades  $W_{ótimo}$ ,  $W_{ótimo-2\%}$  e  $W_{ótimo+2\%}$ .

A influência da temperatura nos resultados dos ensaios de módulo resiliente terminou sendo prejudicada por não se dispor de um ambiente de ensaio climatizado fazendo com que entre a retirada dos corpos de prova da câmara climatizada e a realização dos ensaios ocorresse perda (40 °C) ou ganho (10 °C) de temperatura conforme o caso. Para viabilizar a análise comparativa ao longo do perfil elaborou-se a Figura 4.54a, b, c e d respectivamente para  $W_{ótimo-2\%}$ ,  $W_{ótimo}$ ,  $W_{ótimo+2\%}$  e para o conjunto das três umidades de compactação. Os símbolos vazios constantes das Figuras correspondem a pontos excluídos das curvas. As Figuras 4.54a, b e c indicam que o módulo resiliente ao longo do perfil tende a diminuir com o aumento da temperatura e a Figura 4.54d apresenta a tendência de diminuição do módulo resiliente com o aumento da umidade de compactação.

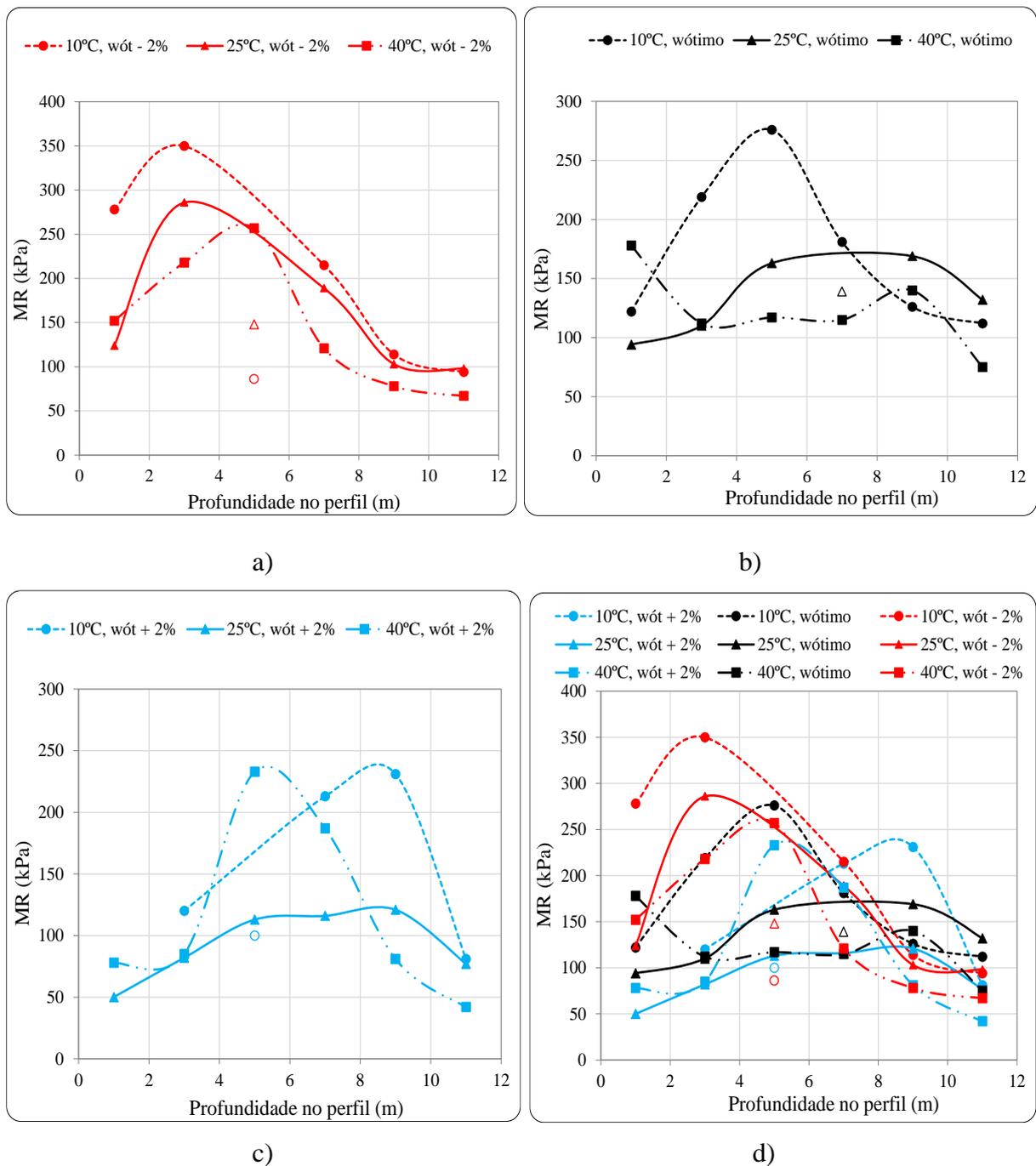


Figura 4.54 – Módulo Resiliente médio em função da profundidade para: a)  $w_{ótimo} - 2\%$ ; b)  $w_{ótimo}$ ; c)  $w_{ótimo} + 2\%$  e d)  $w_{ótimo} - 2\%$ ,  $w_{ótimo}$  e  $w_{ótimo} + 2\%$

A Figura 4.55 apresenta os resultados de módulo resiliente em função da sucção matricial obtidos para a temperatura de 25 °C. Com a exclusão de três pontos observa-se uma tendência geral bem definida de aumento do módulo resiliente com o aumento da sucção. As variações de temperatura entre as condições de definição das sucções e de determinação dos módulos resilientes para 10 °C e 40 °C conduziram a significativa dispersão nas curvas de

módulo resiliente em função da sucção como mostram as Figuras 4.56a e b obtidas respectivamente para as temperaturas de referência 10 °C e 40 °C. Plotando-se na Figura 4.55a a linha de tendência obtida para 25 °C verifica-se que a quase totalidade dos pontos obtidos para a temperatura 10 °C se situam acima dela. Já na Figura 4.56b apesar da maioria dos pontos se situarem abaixo da linha de referência obtida para 25 °C vários se situaram acima dela. No conjunto, apesar da condição dos ensaios para determinação do módulo resiliente não ter sido a ideal, porque o equipamento triaxial não tinha controlador da temperatura, fica claro que o aumento da temperatura provoca a redução deste parâmetro.

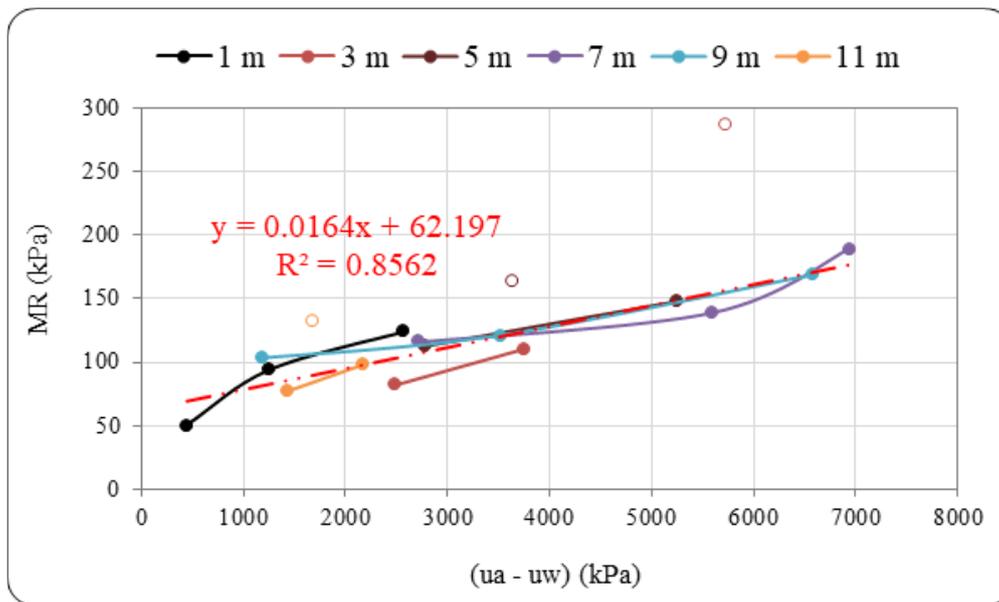


Figura 4.55 – Módulo resiliente em função da sucção para a temperatura 25 °C

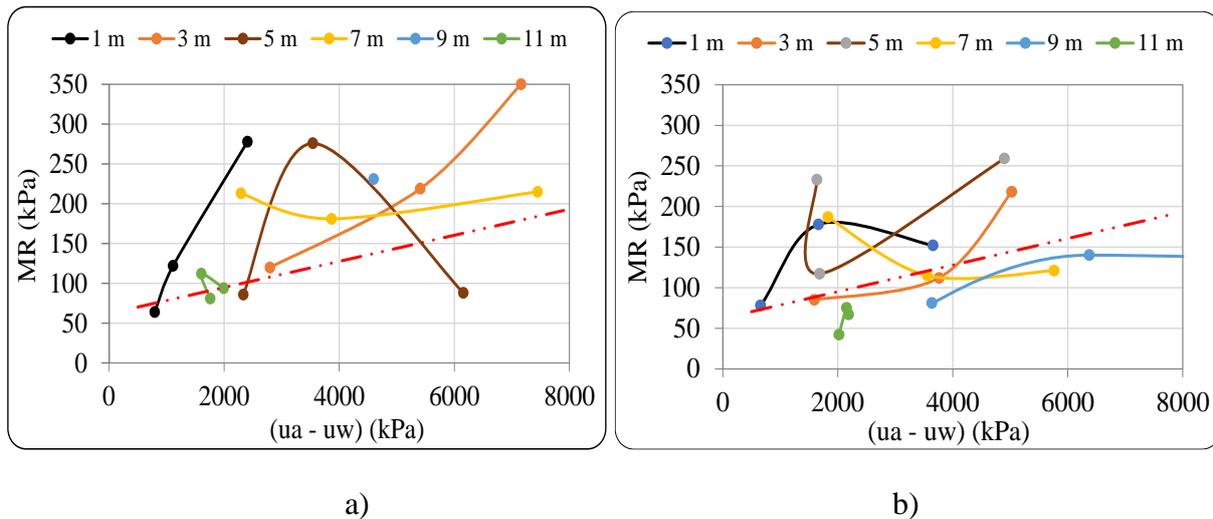


Figura 4.56 – Módulo resiliente em função da sucção para as temperaturas 10 °C (a) e 40 °C (b)

#### 4.9.2 ENSAIO DE RTCD

As amostras das Figuras 4.57 e 4.58 foram obtidos usando-se 1/3 da altura dos corpos de prova submetidos aos ensaios de módulo resiliente e as temperaturas dos corpos de prova já tinham se equilibrado com a temperatura ambiente, logo, o efeito térmico não será aqui avaliado.

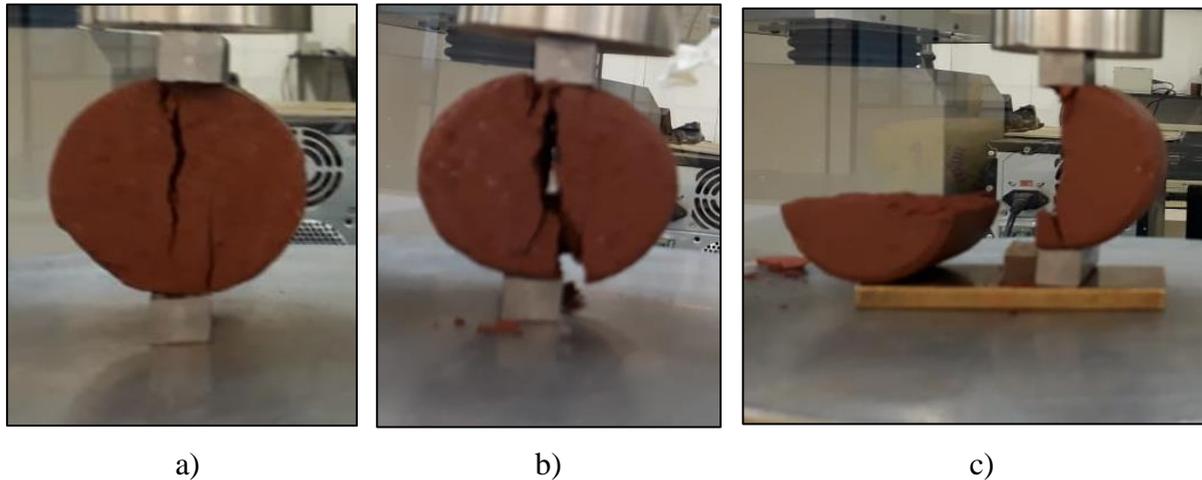


Figura 4.57 – Vistas dos ensaios de resistência a tração do solo de 1 m (umidade ótima) para temperatura: a) 10°C; b) 25°C e c) 40°C.

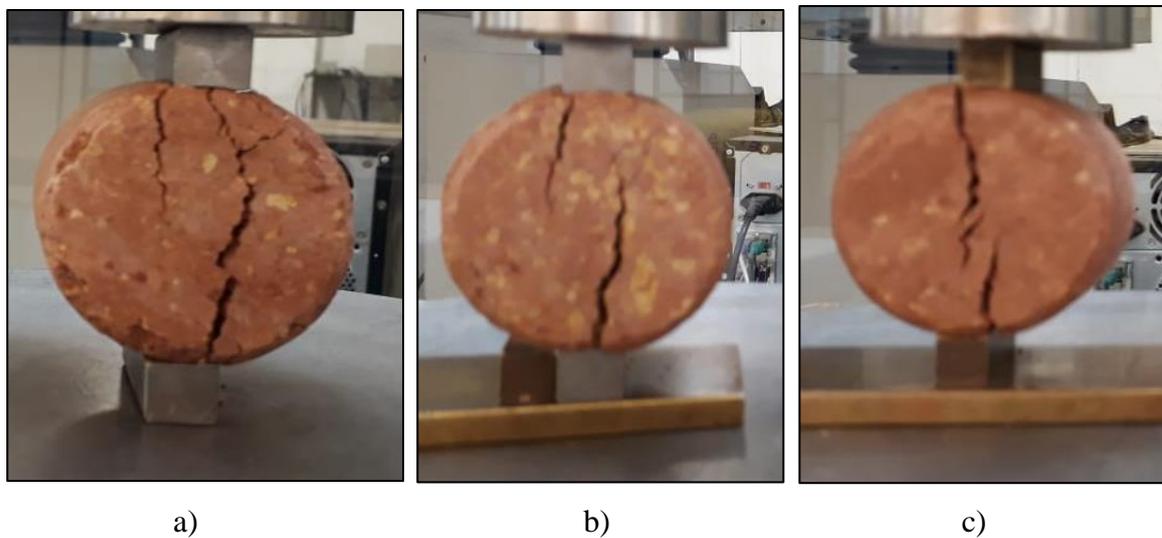


Figura 4.58 – Vista dos ensaios de resistência à tração do solo de 11 m de profundidade (umidade ótima + 2%), para temperatura: a) 10°C; b) 25°C e c) 40°C

As Figuras 4.59a, b e c apresentam respectivamente os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do teor de umidade para os corpos de prova que haviam sido submetidos aos tratamentos térmicos à 10 °C, 25 °C e 40 °C. A Figura 4.59d apresenta o conjunto de resultados mostrados nas Figuras 4.44a, b e c. A análise das Figuras a),

b) e c) mostram resultados com tendências similares fazendo, porém, sobressair a influência do grau de intemperização sofrido pelo solo ao longo do perfil de intemperismo. Na zona profundamente intemperizada, 1 m a 7 m, as resistências à tração obtidas tendem a diminuir com a redução da profundidade. O solo de transição coletado a 9 m de profundidade, solo geralmente dotado de maior heterogeneidade conforme mostrado por Cardoso (2002), não apresentou uma tendência única de comportamento. O solo coletado a 11 m de profundidade, solo saprolítico com textura mais uniforme e menor variação da sucção com a umidade, não apresentou uma tendência única de comportamento. Quando da sobreposição dos resultados obtidos para os solos submetidos aos três tratamentos térmicos prévios, 10 °C, 25 °C e 40 °C, verifica-se significativa dispersão entre eles refletindo possíveis variações de temperatura e heterogeneidade entre os corpos de prova tendo em vista que eles correspondem a 1/3 da altura dos corpos de prova submetidos aos ensaios de módulo resiliente (MR).

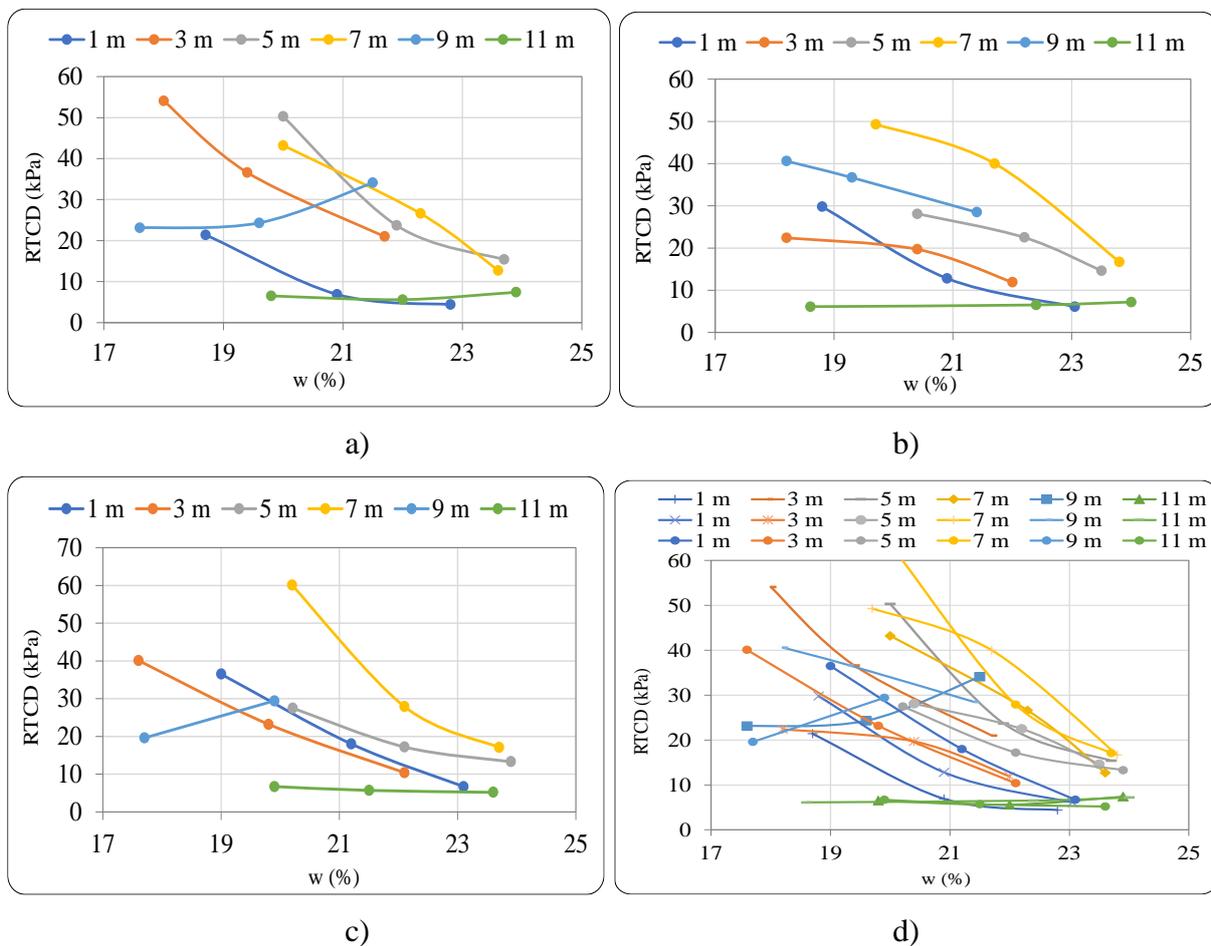


Figura 4.59 – Resistência à tração x umidade para os corpos de prova previamente submetidos às temperaturas: a) 10 °C; b) 25 °C; c) 40 °C; d) 10 °C, 25 °C e 40 °C

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 CONCLUSÕES

O presente estudo foi realizado usando-se amostras deformadas coletadas em um perfil de intemperismo tropical situado no Distrito Federal, Brasil. O perfil de solo analisado é composto por um horizonte profundamente intemperizado, 1 m a 8 m de profundidade, uma zona de transição situada entre 8 m e 10 m e um solo pouco intemperizado, solo saprolítico, a partir desta profundidade até atingir a rocha alterada seguida da rocha sã. No presente estudo foram utilizadas amostras coletadas nas profundidades: 1 m, 3 m, 5 m e 7 m, solo profundamente intemperizado, 9 m, solo de transição e 11 m, solo saprolítico. As conclusões que seguem resultam das análises das propriedades físicas e química-mineralógicas destes solos e de como as temperaturas 10 °C, 25 °C e 40 °C impactaram em suas características microestruturais, nas curvas características de retenção de água, nas curvas de compactação e no comportamento mecânico quando compactados na energia Proctor intermediário na umidade ótima, umidade ótima menos 2% e umidade ótima mais 2%.

Na caracterização física é relevante destacar o aumento da densidade dos grãos (Gs), com a profundidade nas amostras obtidas do perfil de intemperismo sendo ela, no entanto, similar para as profundidades de 1 m e 3 m correspondente a zona do perfil mais ativa e susceptível ao intemperismo. Este parâmetro guarda relação direta com a composição químico-mineralógica do solo e para maior garantia desta relação os resultados foram obtidos para o solo desagregado com uso de ultrassom e em seguida, após desidratação, destorroado manualmente. Esse procedimento é relevante por permitir a eliminação de microporos presentes nos agregados e inacessíveis ao gás Hélio utilizado nos ensaios com o penta picnômetro.

Mineralogicamente o perfil de solo estudado reflete o grau de intemperização sofrido pelo solo ao longo da profundidade cabendo destacar a elevada presença de gibbsita nos solos mais superficiais (1 m e 3 m) e sua diminuição com a ampliação da profundidade até desaparecer aos 9 m. Contrariamente, como a gibbsita é geralmente proveniente da intemperização da caulinita a presença desta aumenta com a profundidade. O perfil de quartzo segue um paralelismo com o perfil de gibbsita (Rodrigues, 2017) indicando ser o mesmo de modo predominante neoformado conforme preconizado por Senaha (2019). Minerais menos intemperizados como a illita surgem a partir do solo de transição. A presença dos óxi-hidróxidos de ferro varia pouco ao longo do perfil de intemperismo.

Sobre a influência da temperatura na microestrutura dos solos ao serem compactados e submetidos a ensaios destinados a avaliar o comportamento mecânico, de um modo geral, as análises microestruturais realizadas por meio do MEV usando amostras submetidas aos ensaios de módulo resiliente indicaram o fechamento dos poros com a ampliação da temperatura.

Inicialmente para apresentação das conclusões a que se chegou sobre o impacto da temperatura nas curvas características cabe destacar que embora apresentando certa dispersão os resultados quando analisados graficamente por meio da relação  $e.pF \times Sr$  convergiram para uma tendência única, respeitando as diferenças de ordem químico-mineralógicas, aproximando inclusive os resultados obtidos para as profundidades 1 m e 11 m reafirmando assim o potencial do método como ferramenta de análise, ferramenta utilizada nas conclusões que seguem. As curvas características de retenção de água determinadas para amostras coletadas a 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m, e 11 m. de profundidade, compactadas e submetidas às temperaturas de 10 °C, 25 °C e 40 °C indicaram para o perfil de intemperismo analisado, considerando-se os resultados obtidos para as quatro profundidades correspondentes ao solo profundamente intemperizado e analisados por meio de gráficos  $e.pF \times Sr$ , que as temperaturas utilizadas, exceto para a profundidade de 3 m, não afetaram as curvas características de retenção de água nos trechos correspondentes aos microporos. No entanto, ao se adentrar nas zonas de meso e macroporos se observa uma nítida redução da sucção para as profundidades de 1 m, 3 m e 11 m quando do uso da temperatura 40 °C.

A hipótese do momento é que a variação térmica ao alterar a densidade e viscosidade da água exerce influência na sucção mátrica atuante no solo. O aumento da densidade da água com a redução da temperatura resulta na aproximação das moléculas de água das partículas de argila aumentando a força de adsorção e em consequência aumentando a sucção. Para melhor entendimento do impacto da temperatura na sucção atuante no solo faz-se necessário analisar o impacto da temperatura também na sucção atuante no papel filtro quando da utilização desta técnica na terminação da sucção atuante no solo, apontando assim, para a necessidade de outros estudos.

Nas análises do comportamento mecânico, tendo em vista que a compactação corresponde à maior ou menor densificação do solo devido à sua menor ou maior resistência à energia de compactação, ela se torna uma ferramenta balizadora do entendimento do impacto da temperatura no comportamento mecânico dos solos.

Ao tratar do tema influência da temperatura na curva de compactação (item 4.7) foi feita uma análise minuciosa dos resultados obtidos. Aqui, em termos gerais, apresenta-se a conclusão de que a temperatura vai interferir mais ou menos nos resultados da compactação, a depender da composição químico-mineralógica, distribuição dos poros e nível de agregação do solo. No âmbito do estudo e com importância aplicada, verificou-se, a depender das especificidades do solo, que a temperatura afeta a inclinação do ramo seco da curva de compactação, a umidade ótima e o índice de vazios mínimo correspondente ao peso específico aparente seco máximo, interferindo assim diretamente no controle tecnológico de campo que faz um paralelo com o laboratório onde as condições de temperatura são estáveis. Nas análises do ramo seco da curva de compactação ficou evidenciado que declividades mais acentuadas se relacionavam com variações mais significativas da sucção e as menores alterações mais suaves da sucção ficando aqui uma conclusão importante, a de que a temperatura afeta a sucção atuante no solo interferindo diretamente no comportamento do solo e que o nível de interferência vai depender das próprias características do solo.

As análises da influência da energia térmica sobre o módulo resiliente indicaram que este parâmetro diminui com o aumento da temperatura assim como sobre redução com a ampliação da umidade.

As análises realizadas sobre a influência da energia térmica na resistência à tração por compressão diametral indicaram que este parâmetro, contrariamente ao observado para o módulo resiliente, tende a aumentar com a ampliação da temperatura. Esse comportamento oposto merece mais estudos e maiores reflexões.

Em síntese, apesar das limitações e dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa, os resultados obtidos mostram que a temperatura afeta a compactação e o comportamento mecânico dos solos que compõem o perfil de intemperismo tropical estudado, sendo recomendável a ampliação dos estudos sobre o tema assim como maiores cuidados quando se controla a execução de uma obra e quando esta é monitorada ao longo do tempo.

## **5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa e em especial em função de incertezas que surgiram, recomenda-se realizar em pesquisas futuras:

- Estudos das propriedades e do comportamento mecânico dos solos realizando-se os ensaios em condições de temperatura constante em ambiente climatizado;
- Efetuar os estudos para outros perfis de intemperismo, considerando-se o solo em estado natural e compactado em diferentes energias e umidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2015). AASHTO T 307-99 (2012). *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Washington, D.C.
- ABNT NBR 6457 (2016). Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: 9 p.
- ABNT NBR 6459 (2016). Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6459, Rio Janeiro, RJ., 9 p.
- ABNT 7180 (2016). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180, Rio Janeiro, RJ., 7 p.
- ABNT NBR 7181 (2016). Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas- NBR 7181, 13P.
- ABNT NBR 6457 (2016). Solo – Teor de Umidade Natural. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6457, 5P.
- ABNT NBR 10838 (1988). Solo – Determinação da Massa Especifica Aparente de Amostras indeformadas com o Emprego de Balança hidrostática, RJ, 4 p.
- ABNT NBR 6459 (2016). Solo – Compressão Diametral. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6459, 5 p.
- ÁGUILA P. (1999). Experiencias sobre el diseño y criterios para la construcción de pavimentos en zonas de altura. 10° Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Sevilla.
- ALKASAWNEH, E., PAN, F., HAN, R., ZHU, & GREEN R. (2007). Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis, *International journal of Pavement, Engenharia*: 203-212.
- ALONSO, E.E., PINYOL, N.M. & GENS, A. (2013). Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. 1-16 DOI:10,1680/GEOT11. *Geotechnique*. VI (16): 134 p.
- AGUIAR, L. (2014). Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados e Estabilizados Quimicamente para uso em Barragens. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília DF., 281p.
- ASTM D 2487. (2017). Standard Practice for classification of Soils for engineering Purposes (Unified Soils Classifications System). Pennsylvania. USA., 9 p.
- ASTM D 5298-10. (2016). Standard Test Method for Measurement of soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C 700, West Conshohocken, A 19428-2959. United States. [www.astm.org](http://www.astm.org).

- ASTM D 5550– American Society for Testing and Materials (2014), Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer.
- ATLAS CNT DO TRANSPORTE - 2ª edição <https://www.atlas.cnt.org.br/> Ano 2018.
- AUSTROADS. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design. Publicação AGPT02-12. Sidney, 2013.
- AYALA, R. (2020) Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300p.
- BALBO, J.T. (2007) Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. 1ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos. P. 558,
- BANERJE, A. (2017). Response of Unsaturated Soils Under Monotonic and Dynamic Loading Over Moderate Suction States. Doctor of Philosophy. The University of Texas at Arlington. 563p.
- BENTO, P. (2006). Uso de Cal e Fibra na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 132p.
- BENTO ROQUE, P.F. (2017). Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solos em Pavimentação. Tese de Doutorado, Publicação N° G. DM 131/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141P.
- BERGMAN, E.F., MCKNIGHT, T.L. (2000). “Introduction to Geography,” Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 73- 79.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L.; CERATTI, J.; SOARES e J. (2010) Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS. .488p.
- BORGES, C.R. GITIRANA, G. F. N., VARGAS, C. A. L. & GUIMARÃES, R C. (2010). Uso de um papel filtro de baixo custo na determinação de curvas características. VX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRANSEG 2010: Gramado, RS, 1-8.
- BORGES, C.R. GITIRANA, JR., F. N., VARGAS, C. A. L. & GUIMARÃES, R. C. (2011). Histerese de curvas características solo-água de um perfil de solo tropical de Aparecida de Goiania-GO. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Pirenópolis, GO.
- BORGES, C.R. (2010). Comportamento hidráulico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiania-Go. Dissertação de mestrado. Universidade de Goias, Go. 138p.
- BORGES, C.R. (2014). Estudo Microestrutural do Comportamento Hidromecânico do solo de Brasília – DF. Tese de Doutorado, Publicação G. TD-102/14, programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF., 112 p.

- BRAJA M. D. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, (4ta Edición). California State University, Sacramento.
- BURGOS, J.F. (2016). *Influência da Microestrutura no Comportamento Mecânico dos Solos Tropicais Naturais e Compactados – DF*. Tese de Mestrado, programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF 112 p.
- CAICEDO, B., FLEUREAU, J-M., GOMES, A. (2013). Conference: Advances in Unsaturated Soils, Taylor & Francis Group. *Proceeding of the first pan-american conference on unsaturated soils*. Cartagena de Indias, Colombia, 20-22 February 2013. 591 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1985). *Étude du comportement mécanique d'une marne compactée*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées – I.N.S.A., France – Toulouse, 181 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. (2000). Modelo de normalização da curva característica. 32º Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, 1:96-106.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & PEREIRA, J.H.F. (2001). Estudo do Comportamento Mecânico dos Solos Não-Saturados com Base na Sucção Normalizada. 40 Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre - RS, vol. único: 134-148.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA, JR, MACHADO, S.L., MASCARENHA, M.M.A. & SILCA FILHO, F.C. (2015a). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). 759p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. PORFIRIO M. ANDRADE, L. (2009). Contribuições Recentes do programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Livro: comemorativo dos vinte anos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. BRASILIA. Cap. 5, 71-100.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2007). Solo como material de construção. Livro: materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. São Paulo. Cap. 17, 525-561.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEROUEIL, S. (2004). Curva Característica de sucção Transformada. Solos e Rochas, 273: 20 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO & GITIRANA JR. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Soils and Rocks* 44(3).
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, E.; LIMA, M.; RIBEIRO, M. O. (2002). Variação no Comportamento Térmico de Caulinitas de uma Cobertura Superficial no Distrito Federal. In: XII COBRAMSEG. São Paulo. Anais do COBRAMSEG. São Paulo - SP: ABMS. v. 1. p. 537-546.

- CAMERON, D.A., POTTER, W. (2008). The Resilient Modulus of Clay Subgrades. 23<sup>rd</sup> ARRB. Conference – research Partnering with Practitioners, Adelaide Australia. 10 p.
- CAMPOS, P.M.; LACERDA, M.P.C.; PAPA, R, A. GUIMARÃES, E.M.; COSTA NETO, F. (2008). Difratometria de raios X aplicada na identificação de gibbsita e caulinita em latos solos do Distrito federal. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO,9., SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS 2., 2008, Brasília. Anais. Brasília. 01-07.
- CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-009<sup>a</sup>/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. DF. 357 P.
- CARDOSO, R. (2010). Cadastro geotécnico dos solos finos lateríticos para fins de pavimentação no município de Goiania – GO. Universidade Federal de Goias.
- CARVALHO, B. V., CASAGRANDE, M. D. T., VELLOSO, R. Q., FARIAS, M. M. (2018). Avaliação do comportamento mecânico de solo argiloso com inserção de politereftalato de etileno (PET) para aplicação em base de pavimentos. In: XIX Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, COBRAMSEG, 2018, Salvador.
- CASSIANO DE SOUSA, A.C.R., MASCARENHA, M.M.D.A., SANTOS DE JESUS A., SILVA M.R. (2016). Influência da Sucção na Estabilidade Estrutural de Solos Tropicais Não Saturados no Município de Silvania-GO, XVIII Congresso Brasileiro dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG 2016. Belo Horizonte Minas Gerais Brasil, 8 p.
- CNT: AGÊNCIA CNT TRANSPORTE ATUAL (2022), <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentad>.
- CERATTI, J.A., GEHLING, W.Y.Y., BICA, A.V.D. & RODRIGUES, M.R. (1996). Influência da sucção no módulo de resiliência de um solo típico do rio grande do sul. 30<sup>th</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 2: 541-555.
- CODEPLAN. Atlas do Distrito Federal. Brasília, DF. 1984.
- COLLANTES, R. D. C. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2018). Análise Comparativa de Resultados de Ensaios de Massa Especifica dos Grãos Determinadas no Picnômetro à Gás. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018, Salvador. COBRAMSEG 2018. ABMS., 1-8.
- DELGADO, A.K. C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para Uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 411 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. (1994). Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini-MCV. Método de Ensaio. DNER – ME 258/94. 14 p.

- DNER (1994a). Solos compactados em equipamento miniatura. Dep. Nac. Estradas. Rodagem DNER/DrDtc. 1: 14p.
- DUTRA, S. & VALE, C. (2016). The use of lateritic soils as road pavement material. Geotecnia, 136: 13p.
- EL-KESHKY, M. (2011). Temperature Effect on the Soil Water Retention Characteristic, Master of Science, 101 p.
- EMBRAPA (2004). Mapa Pedológico Digital SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese/Adriana Reatto et al., Brasília, DF, 29 p.
- EMBRAPA (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. EMBRAPA – Solos (Rio de Janeiro), Brasília, DF, 412 p.
- EMBRAPA (2022). Solos do Brasil. <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>
- FARIAS, W.M. CAMAPUM DE CARVALHO, J., SILVA, G. F., CAMPOS, I.C. & SANTOS NETO, P. M. (2011). Influência da compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Pirenópolis, GO.
- FATTAH, M.Y., YAHYA, A.Y. & AHMED, B.A. (2012). Total and Matric Suction Measurement of Unsaturated Soils in a Baghdad Region by Filter Paper Method. Journal of Engineering, Volume 18, Number 5. 11 p.
- FERREIRA, R. (2015). Influência da Temperatura e Velocidade de Operação no Dimensionamento de Pavimento Asfálticos de Corredores de Ônibus. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia. 160 p.
- FERREIRA SENANHA, SC. (2019). A Quartzilização em Perfis de Intemperismo Tropical. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-332/2019, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.
- FREDLUND, D.G. (2005). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental. ASCE, v. 132, n.3.
- FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. & FREDLUND, M.D. (2012). Unsaturated soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, New Jersey, 926 p.
- FRITZEN, M.A (2016). Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos-Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- FUJII, L.M.T. (2012). Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias. Dissertação de Mestrado, Departamento De Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF 137p.

- 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, Publicação G.DM-09A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- HABIBAGAH, K. (1997). temperature effect and the concept of effective void ratio. *Indian Geotech J*, 1:14-34.
- HAILEMARIAM, H.; WUTTKE, F. (2022). An Experimental Study on the Effect of Temperature on the Shear Strength Behavior of a Silty Clay Soil. *Geotechnics* 2022, 2, 250–261. <https://doi.org/10.3390/geotechnics>.
- HAN, Z. & VANAPALLI, S.W. (2016). Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils. Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ontario, Canada. 14 p.
- HAN, Z., VANAPALLI, S.K. (2016). State-of-the-art: Prediction of Resilient modulus of unsaturated subgrade soils. *Int. J. Geomech.* 21 p.
- HAN Z., VANAPALLI, S.W. (2016). Stiffness and Shear Strength of Unsaturated Soils in Relation to Soil-water Characteristic Curve. *Géotechnique*. 22 p.
- HUAT, B,K., TOLL, D,G., PRASSAD, A. (2013). *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering.*, New York, 558p.
- IBRACOM. (2007). *Materiais de construção civil e Princípios de ciência e Engenharia de Materiais* 1ª ed. São Paulo.
- INMET. (2021). Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>. Data de acesso: 07/02/2022.
- KALIAKIN, V., MASHAYEKHI, M. NIETO-LEAL, A. (2014); *The time – and Temperature – Related Behavior of Clays: Microscopic considerations and Macroscopic Modeling.* Nova Sience Publishers, Inc. 61p.
- KACHROO P.N. & RAJU, N. G. K. (2002). *Freeze-thaw effects on roadways, approach to pavement design with special reference to roads in Mongolia.*
- KHASAWNEH, M. A. (2017). Investigation of factors affecting the behavior of subgrade Soils Resilient Modulus Using Robust Statistical Methods. *International Journal of Pavement Engineering*. 16 p.
- LALLOUI, L. (2010). *Mechanics of Unsaturated Geomaterials.* 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA. 386 p.
- LEONG, E.C., He, L. & RAHARDJO, H. (2002). Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements. *Geotechnical Testing Journal*. GTJODJ, Vol. 25, N°3, 321-332.

- LEONG, E.C., KIZZA, R. & RAHARDJO, H. (2016). Measurement of Soil Using Moist Filter Paper. E3S WEB OF CONFERENCES 9, 10012. Nanyang Technological University, School of Civil and Environmental Engineering, Bik N1, 50 Nanyang Avenue, Singapore 639798. UNSAT 2016. E3S Web of Conferences 9, 6 p.
- LIMA, M.R.C. (2018). Estudo de Técnicas Alternativas para Monitoramento Ótico de Tensões, Deformações e Temperatura em Obras de Engenharia. Tese de Doutorado, publicação G.TD-145/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.
- LOVATO, R.S. (2004). Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado á pavimentação. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre/RS. P.164.
- LUIZ, G. C. (2012). Influência da Relação Solo-Atmosfera no Comportamento Hidromecânico de Solos Tropicais Não Saturados: Estudo de Caso – Município de Goiânia, Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 246 p.
- LV, L., LIAO, K., ZHOU, Z., ZHU, Q., & SHEN, C. (2019). Determining hot moments/spots of hillslope soil moisture variations based on high-resolution spatiotemporal soil moisture data. *Catena*, 173, 150-161.
- MARINHO, F. & CHANDLER, R.J. (1995). Cavitation and the direct measurement of soil suction. In: International Conference on Unsaturated Soils, 1., Paris 1995, p. 623-630.
- MARINHO, F. (2005). Nature of soil-water characteristic curve for plastic soils. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*; 131(5): p. 654-661.
- MARTINS, A. (2007). Considerações sobre a drenagem Subsuperficial na vida útil dos pavimentos rodoviários, Dissertação de Mestrado. São Paulo, 156 p.
- MARTINS, E. S., REATTO A., CARVALHO, O. A. & GUIMARÃES, R. F. (2004). Evolução Geomorfológica do Distrito Federal. 1ª ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, P.57.
- MASCARENHA, M.M.A. (2003). Influência do Recarregamento e da sucção na capilaridade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação de mestrado, Publicação no G.DM-098A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Unversidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- MCKNIGHT, T.D. & HESS, L. (2000). *Physical Geography: A Landscape Appreciation*, 604 p.
- MEDRADO, W.A. (2009). Caracterização Geotécnica de Solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias. Dissertação de mestrado. Universidades Federal de Ouro Preto. CTG. Engenharia Geotécnica.
- MEDINA, J., MOTTA & L, M, G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*, 3ª ed. Interciências, Rio de Janeiro, RJ, 638 p.

- MITCHELL, J.K. & SOGA, K. (2005). *Fundamental Behavior of Soils*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. 559 p.  
[https://www.academia.edu/38275793/Kupdf\\_net\\_fundamentals\\_of\\_soil\\_behavior\\_jk\\_mitchell\\_amp\\_k\\_soga](https://www.academia.edu/38275793/Kupdf_net_fundamentals_of_soil_behavior_jk_mitchell_amp_k_soga)
- MORANDINI, T.LC. (2014). Solos tropicais e bentonita: análise geotécnica de misturas com ênfase na abordagem coloidal. Tese de Doutorado, Programa de Pós – Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, MG. 239 p.
- MORANGON, M. (2004). Proposição de Estruturas típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil. COPPE /UFRJ. Rio de Janeiro/RJ.
- MOTA, N. M. B. (2003). Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 335 p.
- MOTTA, L.M.G. (1991). Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de D. Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- NG, C. W. W. (2014). Cyclic Behaviour of an Unsaturated Silt at Various Suctions and Temperatures. *Géotechnique*. 13 p.
- NIMMO, J. R. & MILLER E.E. (1986). The temperature dependence of isothermal moisture vs. Potential Characteristics of soils. 9 p.  
[https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs\\_pubs/papers/050-05-1105.pdf](https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs_pubs/papers/050-05-1105.pdf)
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1985). Peculiarities of Geotechnical Behaviour of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. Progress Report. Committee on tropical Soils of the ISSMFE. Theme 1, Topic 1.1. Preliminary Remarks. ABMS. . São Paulo.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo.
- NOGAMI, J.S. e VILLIBOR, D.F., BELIGNI, M., E CINCERRE, J.R. (2000). Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de Vias Urbanas. São Paulo.
- OTALVARO, I.F. (2013). Comportamento Hidromecânico de um Solo Tropical Compactado. Tese de Doutorado, Publicação G. TD-082/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 122 p.
- PAPAGIANNAKIS A. & MASAD, E. (2008). *Pavement Design and Materials*, Wiley, Texas.
- PEREZ, C. C. (2017). Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral. Dissertação de Mestrado, Publicação

- G.DM-286/17. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- PILLAI, R., ROBINSON, R. & BOOMINATHAN, A. (2011). Effect of Microfabric on Undrained Static and Cyclic Behavior of Kaolin Clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 137(4): 421-429.
- QUANTACHROME INSTRUMENTS (S.D.).  
<http://www.quantachrome.com/technologies/density.html>. Data de acesso: 20/08/2018.
- QUEIROZ, A. C. G. (2015). Estudo do comportamento Microestrutural de Solos Tropicais Compactados, Distrito Federal, 2015. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-104/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 108 p.
- RAHARDJO, H., LEONG E. (2006) Suction measurements. Proc. 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, AZ. 562-7, 2006
- ROCHA, B.P. (2018). Caracterização Geotécnica de Solos Tropicais Não Saturados por meio de ensaios de Campo, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- RODRIGUES, S.M. (2017). Caracterização mineralógica e microestrutural de um perfil intemperizado de Brasília. Universidade Estadual de Goiás. 133 p.
- ROMERO, E.; GENS, A. (1999). Characterization and thermo-hydro- mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Doctoral Thesis, Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain.
- ROMERO, E., GENS, A. & LLORET, A. (2003). Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions. *Geotechnique* 53(1), 65-81.
- ROSHANI, P., & SEDANO, J. Á. I. (2016). Incorporating temperature effects in soil-water characteristic curves. *Indian Geotechnical Journal*, 46(3), 309-318.
- SAS, W., GLUCHOWSKI, A., GABRYŚ, K., SOBÓL & E., SZYMASŃKY, A. (2017). Resilient Modulus Characterization of Compacted Cohesive Subgrade Soil. 20 p. [WWW.mdpi.com/journal/applsci](http://WWW.mdpi.com/journal/applsci) .
- SENAHA, S.C.F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. [Master's dissertation, University of Brasília]. University of Brasília's repository (in Portuguese). <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>
- SENAMHI. (2021). Dados de clima em Peru <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>. Data de acesso: 07/02/2021.
- SHENG, D. (2011). Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/compgeo](http://www.elsevier.com/locate/compgeo).

- SHU-RONG, Y.; WEI-HSING H. & SHAO-HUNG, C. (2015). Combined Effects Of Temperature And Moisture Content On Soil Suction Of Compacted Bentonite. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 281-287 (2015). DOI: 10.6119/JMST-014-0326-2.
- SILVA, F.C. (2017), Curva Característica de um Perfil de Solo Tropical. Trabalho de conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 113p.
- SILVA, A.L. (2013). Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia. Tese de mestrado, Universidade de Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. 114p. [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-97XP2T/1/dissertacao\\_amanda.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-97XP2T/1/dissertacao_amanda.pdf)
- SILVA, M.T.M.G. (2009). Metodologia para Determinação de Parâmetros para Solos não Saturados Utilizando Ensaio com Umidade Conhecida. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- SILVA, A.M., LUCENA, L.C.F.L., LUCENA, A.E.F.L., CAMAPUM DE CARVALHO, J.C. & MARINHO, P.G.T.F. (2016). Estudo de parâmetros de compactação de solo para uso em pavimentos rodoviários. *Transportes* v. 24, n. 4 (2016), p. 95-103.
- SILVA, A.L., SANTOS, W.M., CASTILLO, V., MARQUES, J. (2021). Classificação climática de Köppen aplicada em umidades de conservação: Estudo de caso no parque estadual do Mendanha (PEM) e na área de proteção ambiental Gericinó-Mendanha (APAGM).
- SOUZA, R.F.C. (2014). Estudo da Influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica da transferência de vapor. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- TAKEDA, M. (2006). A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior Paulista. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- TANG, A. M., & CUI, Y. J. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 287-296.
- THOTA, S.; (2020), "Temperature effects on saturated soils: constitutive relationships and emergin geotechnical applications" Theses and Dissertations. 4233. Mississippi State University. (Degree of Doctor of Philosophy). <http://scholarsjunction.msstate.edu/td>
- TORRES-HERNANDEZ, G. (2011). Estimating the Soil–Water Characteristic Curve Using Grain Size Analysis and Plasticity Index. Master of Science Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, USA
- VANAPALLI, S.K., HAN, Z., QI, S. & LIU, Y. (2016). Some applications of the mechanics of unsaturated soils in forensic geotechnical engineering. *Department of Civil Engineering, University of Ottawa, ON, K1N 6N5, CANADA.*

- VAN GENUCHTEN, M. (1999). Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new form analytical model. Res. Rep. 78-WR-08. *Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princeton University*. Princeton, NJ.
- VASSOLER, G.; CHONG, W. & SPECHT, L.P. (2011). Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos. In. *Acta Scientiarum. Technology Maringá*, v. 33, n. 3, pp. 265-271.
- VIGGIANI, G. & ATKINSON, J. (1995) Interpretation of bender element tests. *Geotechnique*, 45(1), 35-53.
- VILLAR, M. & GOMEZ-ESPINA, R. (2007) Retention curves of two bentonites at high temperatura. In: Schanz T (ed). *Experimental unsaturated soil mechanics*. Springer Proceedings in Physics, 112, 267-274.
- VILLAR, M. & LLORET, A. (2004). Influence of temperature on the hydro-mechanical behavior of a compacted bentonite. *Appl clay Sci.*; 26, 337-350.
- VILLAR, M.; MARTIN, P. & LLORET, A. (2005). Determination of water retention curves of two bentonites at high temperature. In: Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. *Advanced experimental unsaturated soil mechanics*. Balkena Publishers, London, 77-82.
- VILLIBOR, D.F., NOGAMI J.S., CINCERE, J.R., SERRA. P.R., NETO, A.Z. (2007). Pavimento de Baixo Custo para Vias Urbanas – Bases Alternativas com solos lateríticos. *Arte e Ciência*. São Paulo, SP. 172P.
- XIAOYING, Q.; SHAOYANG, M.; GUIXING, P. & GUANGLU, L. (2019). Effects of temperature change on the soil water characteristic curve and a prediction model for the mu us bottomland, Northern China.
- XU, Y., ZENG, Z. & LV, H. (2019). Effect of temperature on termal conductivity of lateritic clays over a wide temperature range. *International Journal of heat and mass transfer*, 138, 562-570.
- YANG, S., HUANG, W.H. & CHUNG, S.H. (2015). Combined Effects of Temperature and Moisture Content on Soil Suction of Compacted Bentonite. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 23, N°3, 281-287.
- YANG, S.R., HUANG, W.H. & CHUNG, S.H. (2013). Temperature effects on soil suction for compacted clay soils. *Advanced Materials Research* Vol. 723, 527-534.
- YANG, S.R. & HUANG, W.H. (2012). Variation of Initial Soil Suction with Compaction for Clayey Soils. *Journal of Mechanics*. 9 p.
- YAO, J., WANG, T. & LIKOS, W. (2019). Measuring Thermal Conductivity of Unsaturated Sand under Different Temperatures and Stress Levels Using a Suction – Controlled Thermo-Mechanical Method. In *Geo Congress 2019; Geotechnical Materials, Modeling, and Testing*, 784-793. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

- ZHANG, J., LI, J. & PENG, J. (2018). Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Cohesive Soils in South China. *International Journal of civil Engineering*. 14 p.
- ZHOU, A., SHENG, D. & LI, J. (2014). Modeling water retention and volume change behaviours of unsaturated soils in non-isothermal conditions. *Computers and Geotechniques*, 1-13.
- ZHOU, C. & NG, C. (2016). Effects of temperature and suction on plastic deformation of unsaturated silt under cyclic loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12)
- WENHUA, W., XILKUI, L. & COLLIN, A. (2004). Thermo-hydro-mechanical model and its numerical modeling for unsaturated soil. *Computers and Geotechnical* 31, 155-167.

## APÉNDICE A: Resultados de módulo resiliente para a temperatura 10 °C

Tabela A.1 Constantes de regressão para os materiais estudados referentes ao modelo composto (temperatura 10°C)

SOLO Temperatura 10°C	ENSAIO N°1				ENSAIO N°2			
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
1m Pto. 1	937,0	1,194	-1,319	0,71	1272,28	0,8746	-0,7376	0,70
1m Pto. 2	564,2	0,9543	-0,4311	0,91	120,20	0,1071	-0,4547	<b>0,93</b>
1m Pto. 3	1113,0	3,038	2,796	0,97	411,86	0,6034	0,04234	0,95
3m Pto. 1	787,4	1,205	-1,084	0,45	255,14	-0,238	0,48362	0,94
3m Pto. 2	540,6	0,5146	-0,2118	<b>0,85</b>	232,66	0,1621	0,06366	0,76
3m Pto. 3	0,2011	-0,1631	-0,1631	0,73	441,90	0,9000	-0,6314	0,79
5m Pto. 1	200,1	-0,1772	0,5660	0,91	479,8	1,002	-0,9789	0,82
5m Pto. 2	1059,0	2,304	2,08	<b>0,75</b>	247,2	0,4571	-0,2566	0,75
5m Pto. 3	329,2	0,4659	0,0351	0,91	2300,9	1,7112	-1,3189	0,84
7m Pto. 1	50,47	-0,1999	-0,3914	0,86	242,68	-0,084	0,4487	0,93
7m Pto. 2	292,00	0,5145	-0,4075	0,69	2014,77	2,160	-1,792	<b>0,85</b>
7m Pto. 3	451,8	1,934	-0,2097	0,83	171,14	0,7055	-1,035	0,46
9m Pto. 1	112,6	-0,1356	0,1533	0,34	308,6	-0,089	0,3394	0,95
9m Pto. 2	233,9	-0,1763	0,4729	<b>0,74</b>	422,3	0,646	-0,4939	0,68
9m Pto. 3	220,3	0,08116	-0,4145	0,32	367,9	0,1505	-1,6930	0,76
11m Pto. 1	127,4	0,4665	-0,4094	0,86	2277,3	1,9668	-1,9083	0,87
11m Pto. 2	154,0	0,6248	-0,5710	<b>0,79</b>	117,92	0,2328	-0,8228	0,48
11m Pto. 3	51,33	0,2660	-0,5080	0,76	124,78	1,1429	-1,6165	0,65

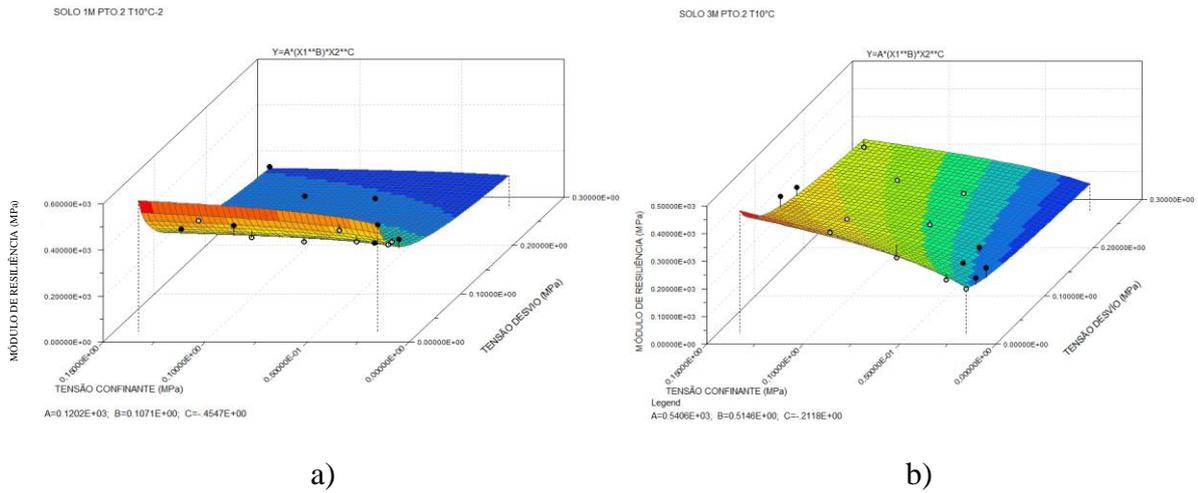


Figura A.1 Gráfico 3D Modelo composto para a unidade ótima à temperatura 10°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

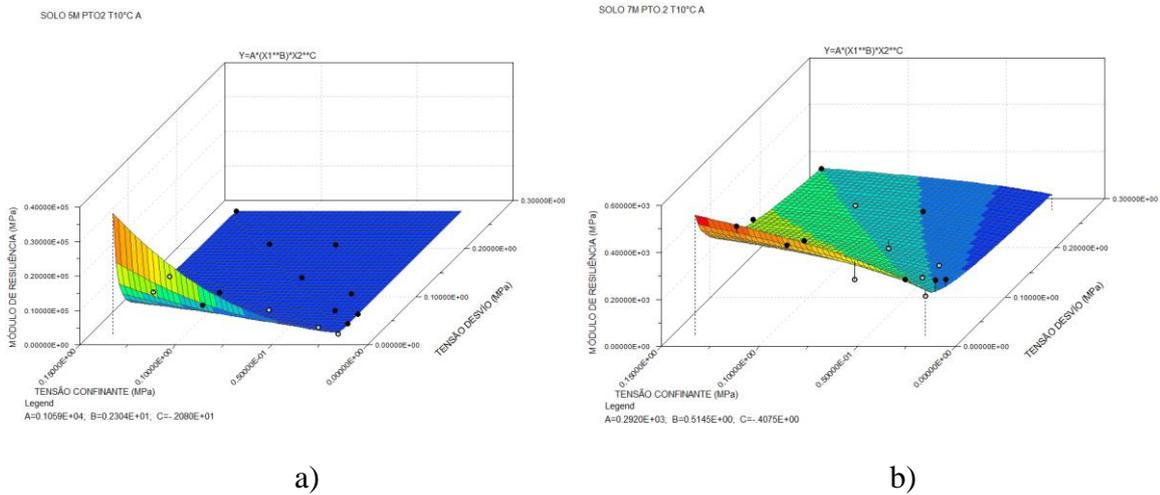


Figura A.2 Gráfico 3D Modelo composto para a unidade ótima à temperatura 10°C: a) Solo de 5 m e b) solo de 7 m de profundidade

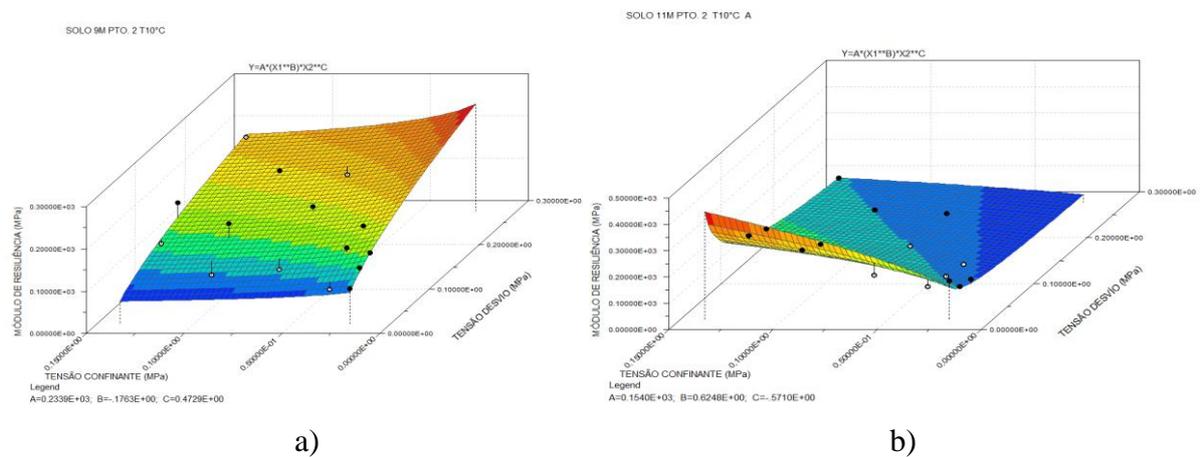
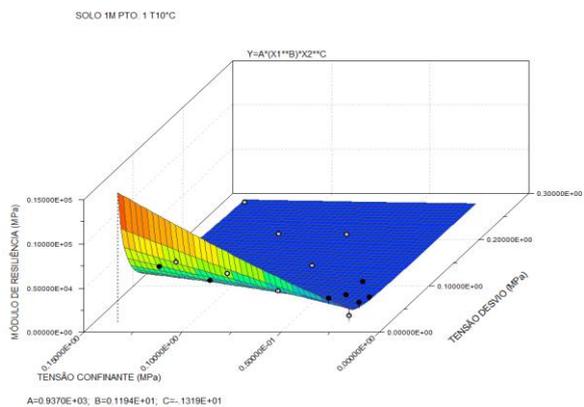
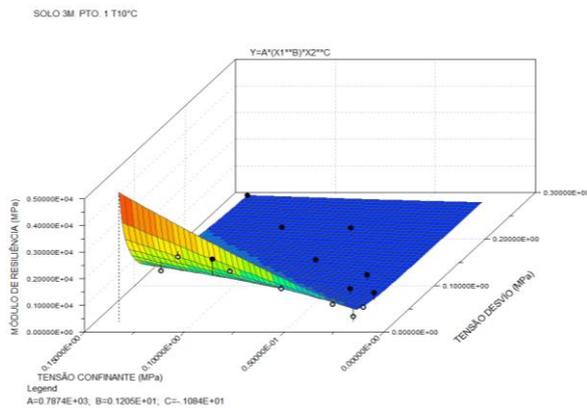


Figura A.3 Gráfico 3D Modelo composto para a unidade ótima à temperatura 10°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m de profundidade

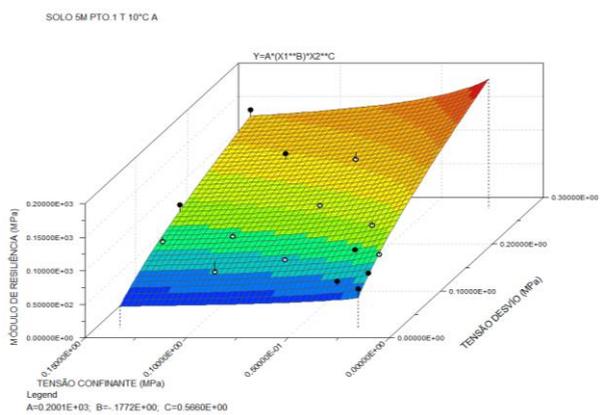


a)

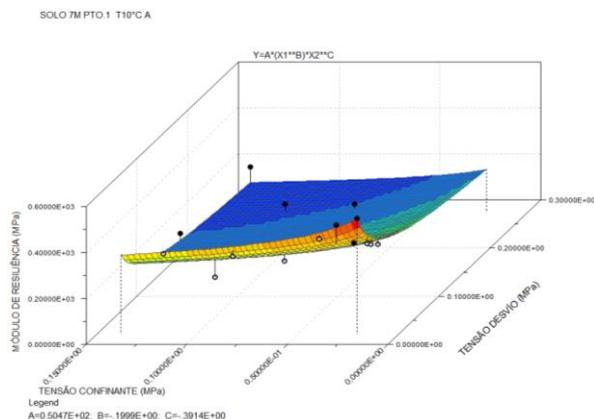


b)

Figura A.4 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima - 2% à temperatura 10°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

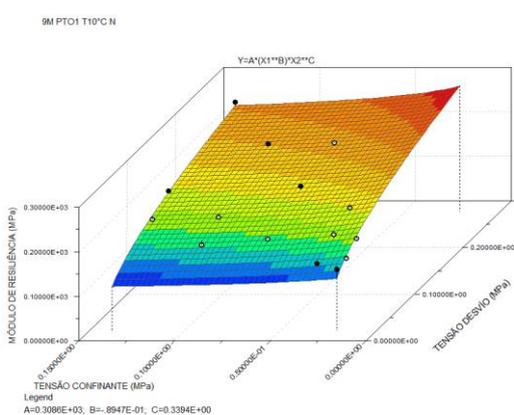


a)

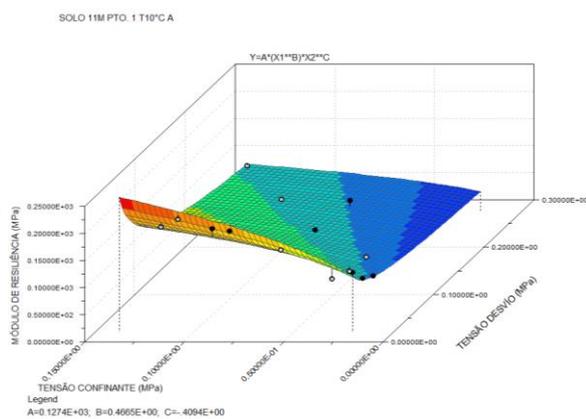


b)

Figura A.5 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima - 2% à temperatura 10°C: a) Solo de 5 m e b) solo de 7 m de profundidade



a)



b)

Figura A.6 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima - 2% à temperatura 10°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m de profundidade

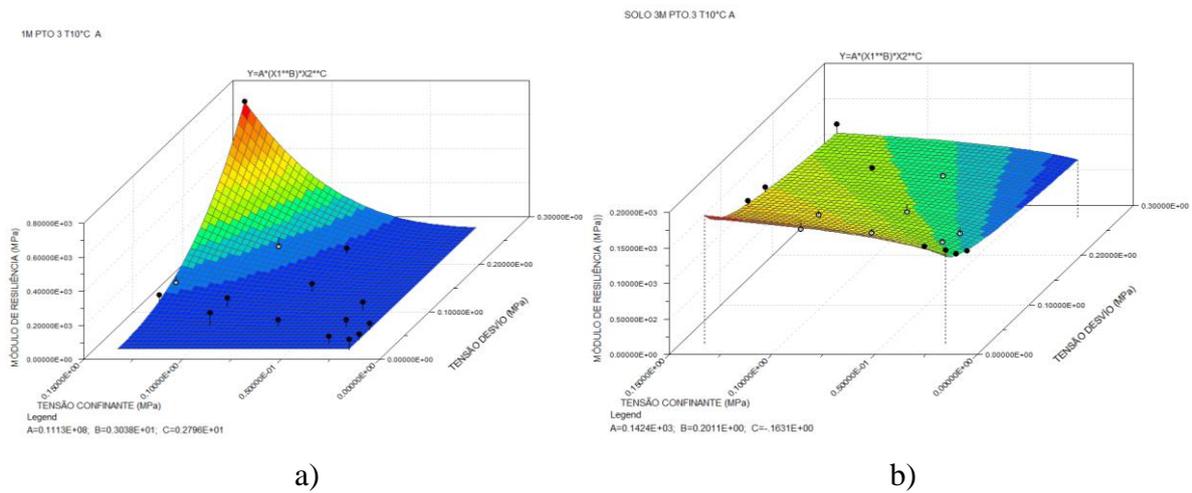


Figura A.7 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima + 2% à temperatura 10°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

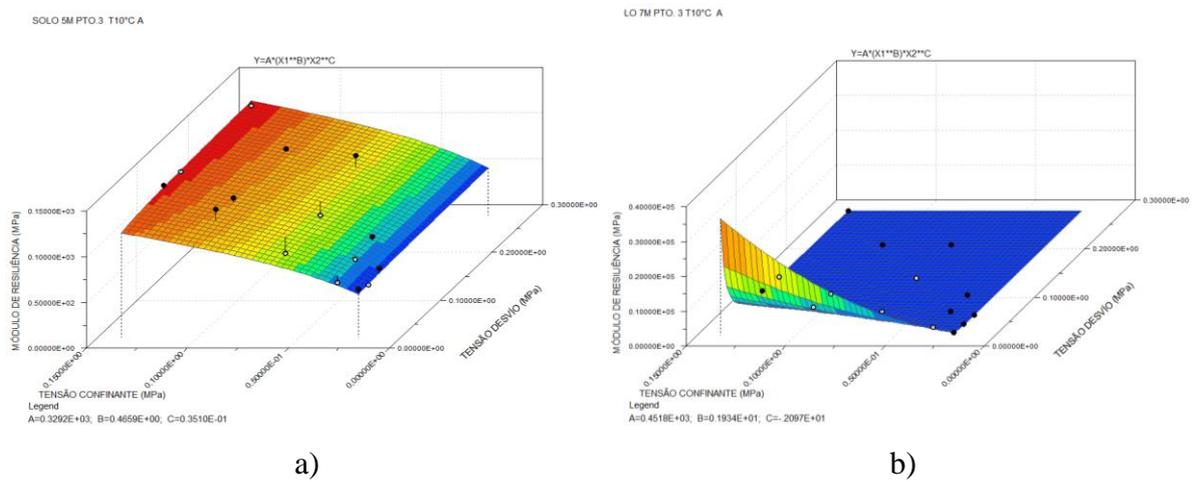


Figura A.8 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima + 2% à temperatura 10°C: a) Solo de 5 m e b) solo de 7 m de profundidade

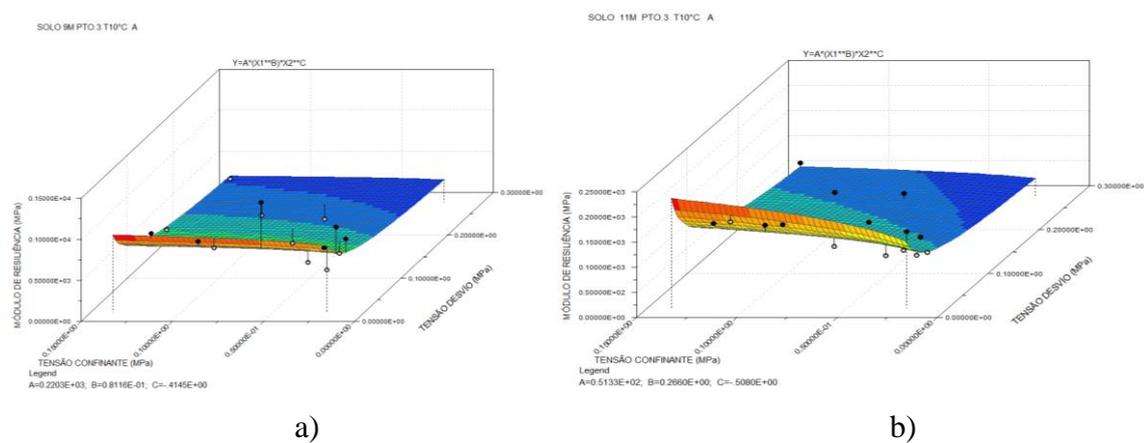
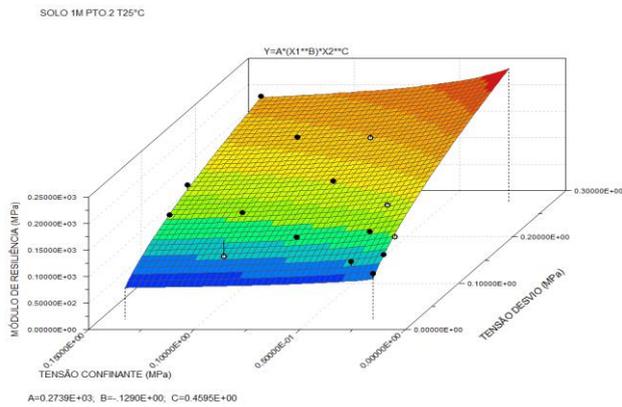


Figura A.9 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima + 2% à temperatura 10°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m de profundidade

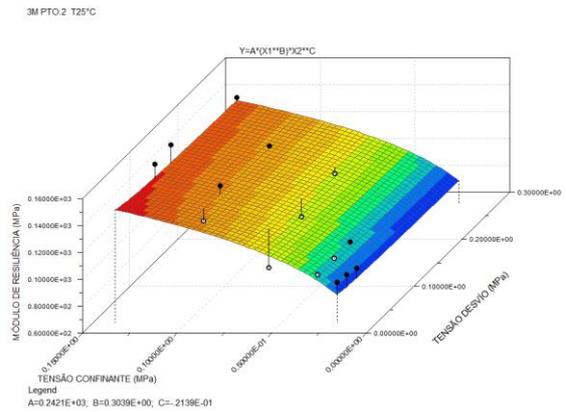
## APÉNDICE B: Resultados de módulo resiliente para a temperatura 25 °C

Tabela B.1 Constantes de regressão para os materiais estudados referentes ao modelo composto (temperatura 25°C)

SOLO	ENSAIO N°1				ENSAIO N°2			
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
1m Pto. 1	123,1	0,1129	-0,1381	0,27	598,88	2,1647	-2,0571	0,84
1m Pto. 2	32460	1,646	0,8692	0,82	273,90	-0,129	0,4596	<b>0,93</b>
1m Pto. 3	145,4	0,1507	0,2802	0,78	103,40	0,2638	-0,685	0,79
3m Pto. 1	623,7	0,8816	-0,7572	0,54	181,41	-0,188	0,2654	0,70
3m Pto. 2	242,1	0,3039	-0,0214	<b>0,79</b>	269,29	0,1172	0,1213	0,42
3m Pto. 3	536,8	0,7606	-0,0634	0,93	37,47	3,4739	-4,2338	0,79
5m Pto. 1	132,1	-0,1247	0,0999	0,25	275,70	0,5878	-0,5714	0,86
5m Pto. 2	528,3	0,6989	-0,3024	<b>0,91</b>	172,15	0,1927	-0,0734	0,57
5m Pto. 3	256,1	0,3589	-0,0715	0,90	233,77	0,3322	-0,0216	0,79
7m Pto. 1	35,12	-0,0210	-0,6618	0,91	352,06	0,1252	0,1586	0,94
7m Pto. 2	169,00	0,0806	-0,0131	0,22	236,70	0,2024	0,1201	<b>0,96</b>
7m Pto. 3	175,60	0,2726	-0,1448	0,55	129,30	0,7162	-1,064	0,44
9m Pto. 1	219,1	-0,0741	0,4106	0,78	243,88	-0,0146	-0,2300	0,72
9m Pto. 2	750,6	1,3432	-1,3416	0,57	215,56	-0,1485	0,4340	<b>0,87</b>
9m Pto. 3	2406	3,510	-2,719	0,96	90,510	-0,1098	0,0714	0,16
11m Pto. 1	51,67	0,1314	-0,4045	0,89	91,23	0,2246	-0,1011	0,55
11m Pto. 2	171,9	0,5921	-0,5641	<b>0,89</b>	57,55	9,3444	-0,2044	0,23
11m Pto. 3	46,58	0,0846	-0,2976	0,52	346,75	1,024	-1,2459	0,62

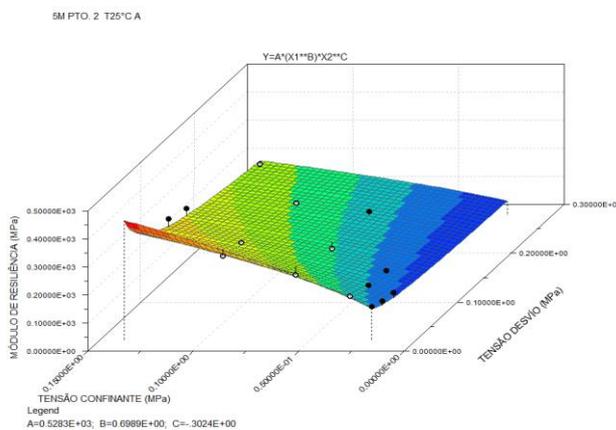


a)

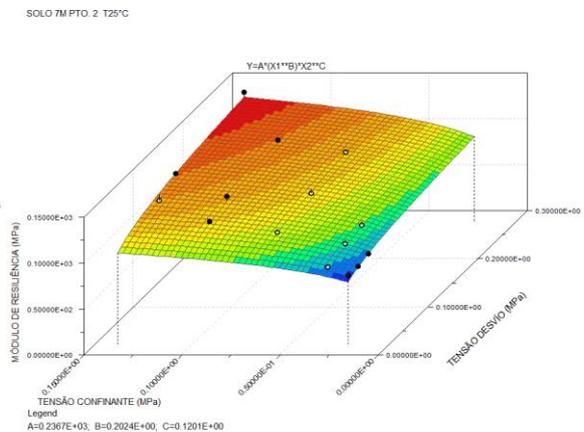


b)

Figura B.1 Gráfico 3D Modelo composto para a unidade ótima à temperatura 25°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

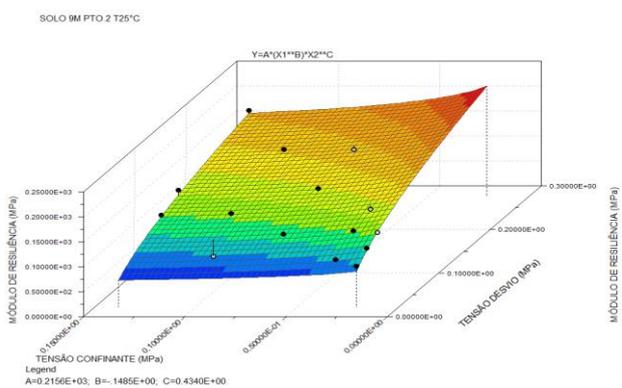


a)

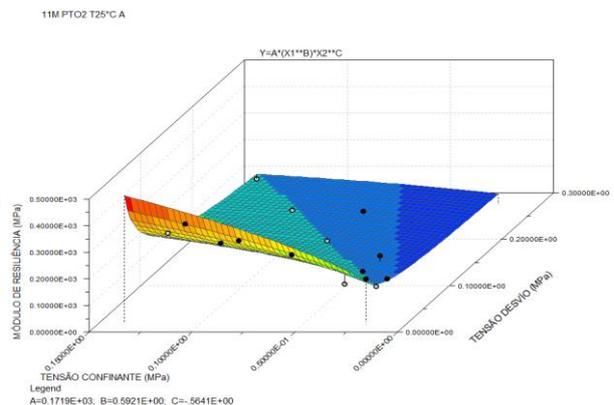


b)

Figura B.2 Gráfico 3D Modelo composto para a unidade ótima à temperatura 25°C: a) Solo de 5 m e b) Solo de 7 m de profundidade.



a)



b)

Figura B.3 Gráfico 3D Modelo composto para a unidade ótima à temperatura 25°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m

## APÉNDICE C: Resultados de módulo resiliente para a temperatura 40 °C

Tabela C.1 Constantes de regressão para os materiais estudados referentes ao modelo composto (temperatura 40°C)

SOLO Temperatura 40°C	ENSAIO N°1				ENSAIO N°2			
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
1m Pto. 1	262,5	0,03926	0,1829	0,77	165,02	-0,2379	0,47689	0,89
1m Pto. 2	899,3	1,802	-1,366	<b>0,82</b>	109,22	0,4735	-0,6527	0,63
1m Pto. 3	426,8	0,4786	0,1792	0,91	2381,6	2,6132	-2,0579	0,93
3m Pto. 1	575,0	0,4613	-0,1619	0,68	56,44	0,6925	-1,3644	0,74
3m Pto. 2	139,8	-0,0347	0,1322	0,18	1375,27	1,9327	-1,7107	<b>0,87</b>
3m Pto. 3	440,7	0,7245	-0,1272	0,92	317,50	0,5316	-0,2334	0,64
5m Pto. 1	318,8	0,1235	-0,0585	0,18	1393,59	2,0489	-1,7573	0,89
5m Pto. 2	188,8	0,01674	0,1973	0,41	258,9	0,2153	0,1578	<b>0,89</b>
5m Pto. 3	2191,0	2,174	-1,769	0,73	224,25	0,5486	-0,6249	0,72
7m Pto. 1	196,9	-0,1367	0,3673	0,46	126,91	-0,0816	0,05398	0,15
7m Pto. 2	252,8	0,2045	0,09479	<b>0,81</b>	112,21	4,329	-4,7333	0,78
7m Pto. 3	386,4	0,7114	-0,6079	0,68	2332,4	2,6322	-2,0751	0,94
9m Pto. 1	166,0	-0,0496	0,3279	0,75	518,10	0,6581	-0,7661	0,42
9m Pto. 2	394,9	-0,0375	0,4909	<b>0,90</b>	4,008	1,857	-1,8990	0,51
9m Pto. 3	689,3	1,331	-1,198	0,72	280,02	0,3475	-0,3480	0,50
11m Pto. 1	79,19	0,5866	-0,5574	0,46	124,03	0,1634	-0,6663	0,48
11m Pto. 2	37,89	0,3812	-0,7048	0,59	74,96	0,4128	-0,7488	<b>0,94</b>
11m Pto. 3	13,12	-0,3450	0,05657	0,13	101,86	0,3271	-0,6040	0,50

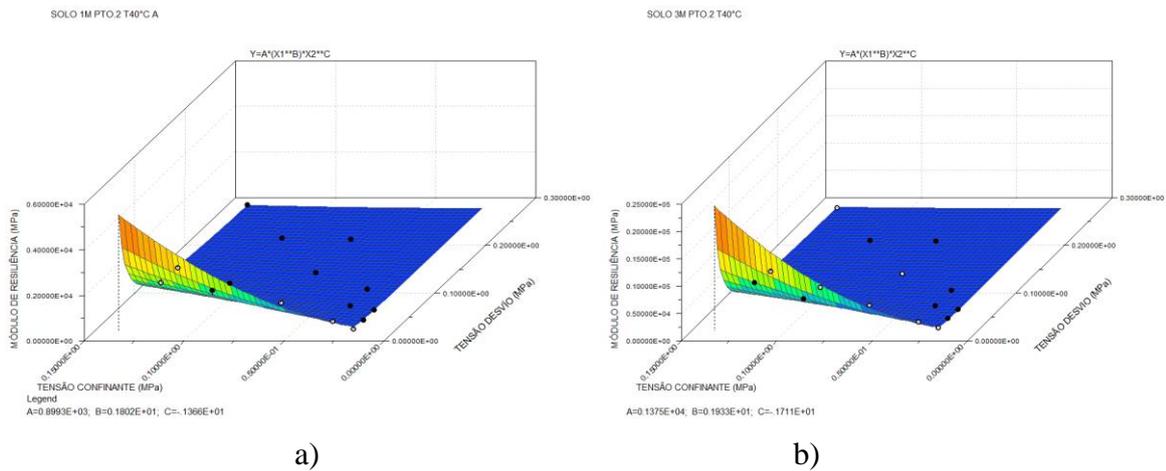


Figura C.1 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima à temperatura 40°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

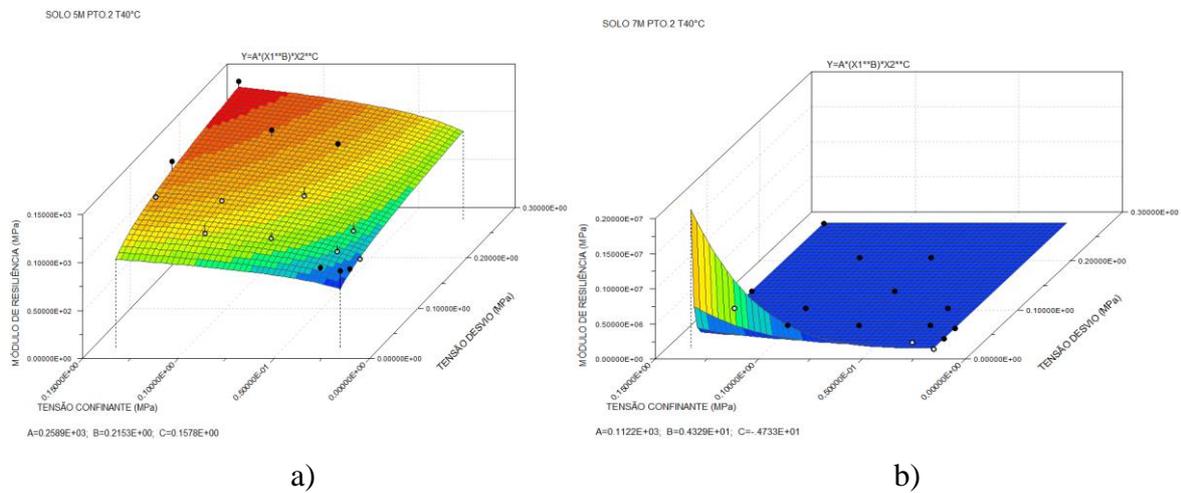


Figura C.2 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima à temperatura 40°C: a) Solo de 5 m e b) solo de 7 m de profundidade

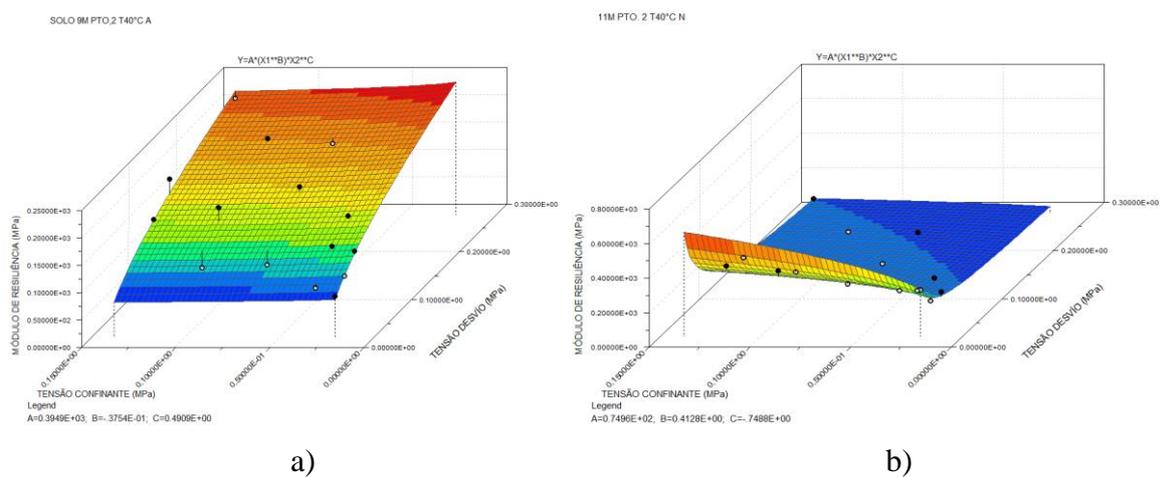
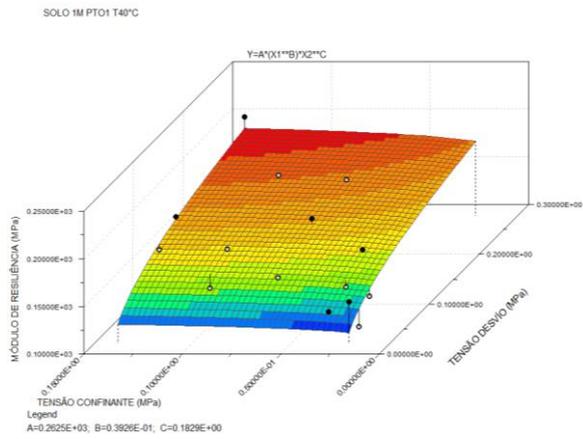
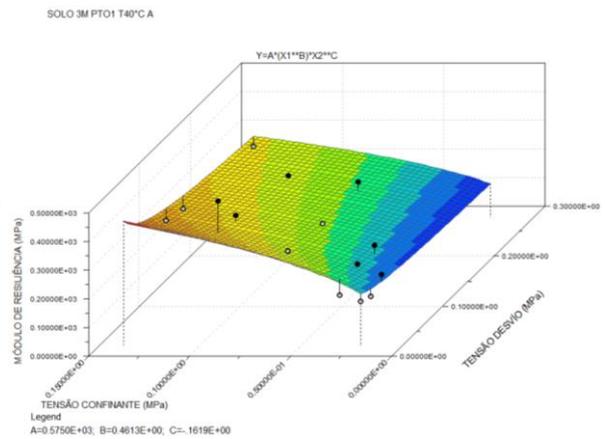


Figura C.3 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima à temperatura 40°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m de profundidade

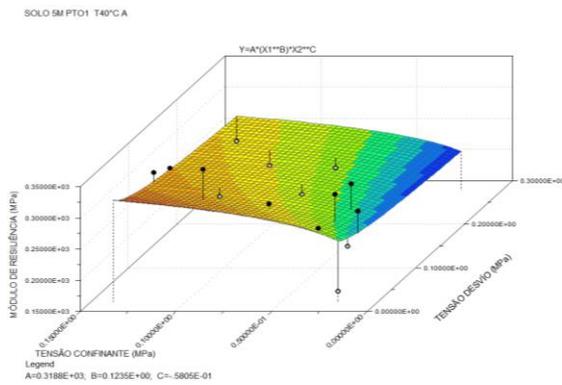


a)

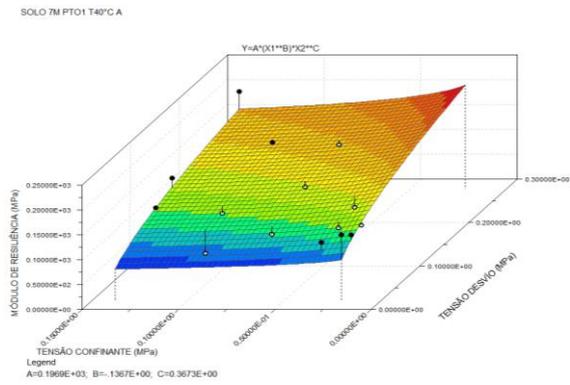


b)

Figura C.4 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima - 2% à temperatura 40°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

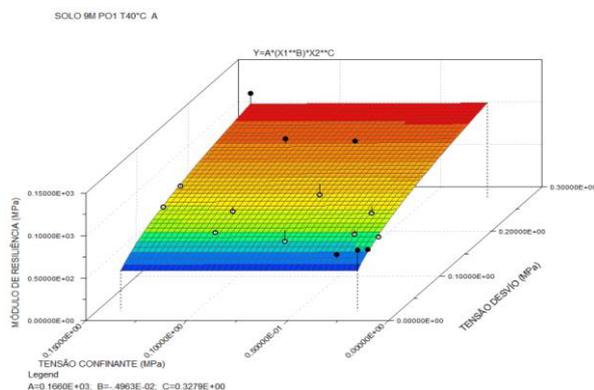


a)

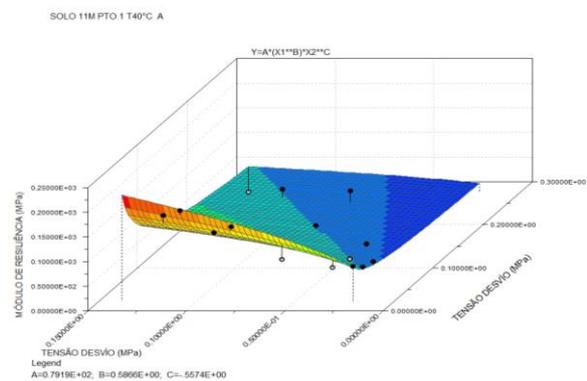


b)

Figura C.5 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima - 2% à temperatura 40°C: a) Solo de 5 m e b) solo de 7 m de profundidade



a)



b)

Figura C.6 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima - 2% à temperatura 40°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m de profundidade

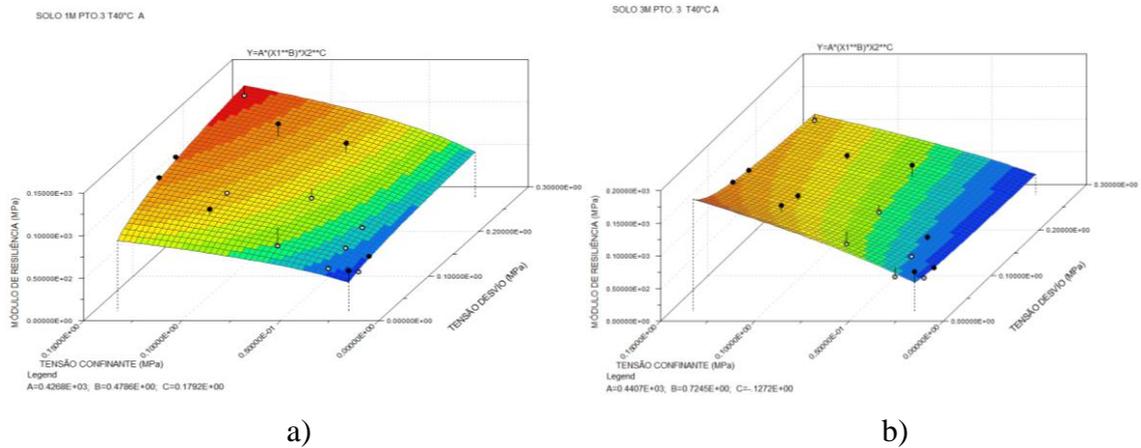


Figura C.7 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima + 2% à temperatura 40°C: a) Solo de 1 m e b) solo de 3 m de profundidade

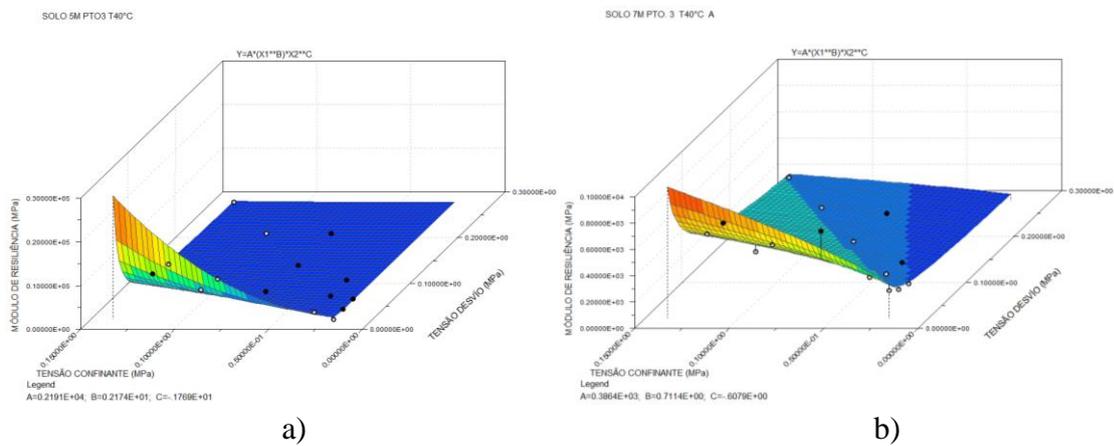


Figura C.8 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima + 2% à temperatura 40°C: a) Solo de 5 m e b) solo de 7 m de profundidade

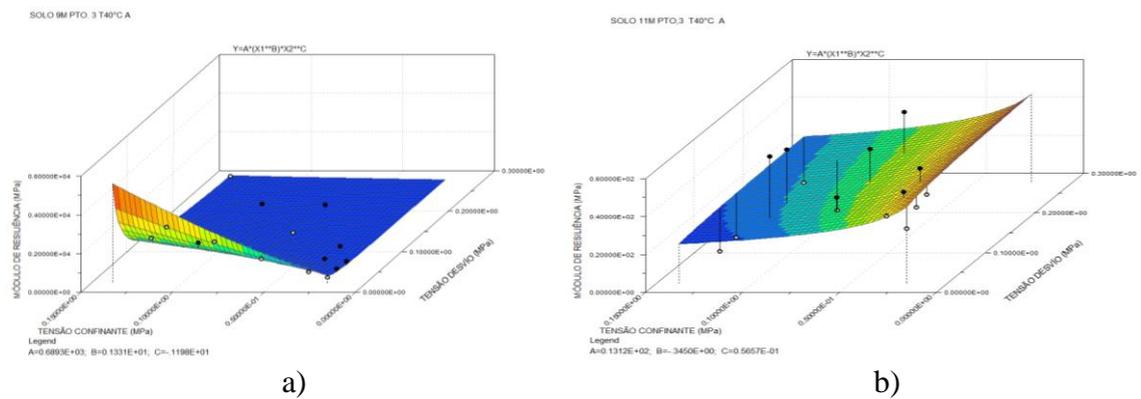


Figura C.9 Gráfico 3D Modelo composto para a umidade ótima + 2% à temperatura 40°C: a) Solo de 9 m e b) solo de 11 m de profundidade