

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE INSUMOS MINERAIS NO
COMPORTAMENTO DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL**

ANDREA CARDONA PÉREZ

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA/DF: JUNHO/2022

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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE INSUMOS MINERAIS NO
COMPORTAMENTO DE UM PERFIL DE SOLO TROPICAL

ANDREA CARDONA PÉREZ

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

APROVADA POR:

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

ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

EDER DE SOUZA MARTINS, D.Sc. (EMBRAPA)
(EXAMINADOR EXTERNO)

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ, D.Sc. (UNAL)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 JUNHO de 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

PÉREZ, ANDREA CARDONA

Análise da influência de insumos minerais no comportamento de um perfil de solo tropical. [Distrito Federal] 2022

xix, 138 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2022)

Tese de Doutorado-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- | | |
|--------------------------|----------------|
| 1. Desagregação | 2. Sucção |
| 3. Mudanças na estrutura | 4. Resistência |
| I. ENC/FT/UnB | II. Doutora |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PÉREZ, A.C. (2022). Análise da influência de insumos minerais no comportamento de um perfil de solo tropical. Tese de Doutorado, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Andrea Cardona Pérez

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Análise da influência de insumos minerais no comportamento de um perfil de solo tropical.

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.

Andrea Cardona Pérez

CLN 407, Bloco A, Sala 113

CEP:70855510, Asa norte, Brasília DF - Brasil.

andreita-29@hotmail.com

DEDICATÓRIA

*Esta tesis va dedicada a todos
aquellos que me acompañaron en este
proceso, especialmente a mi mamá y al amor, Jair.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de acordar cada dia com saúde e me acompanhar e proteger em cada passo da minha vida.

Mãe você já sabe tudo o que eu sinto por você e o tanto que eu agradeço à vida por ser a tua filha; obrigada por tudo. Sempre amarei compartilhar o mesmo pedacinho de céu contigo.

Ao meu amor e parceiro de vida, Jair, porque mesmo nos momentos mais difíceis, você me inspira. Obrigada por ser, estar e cuidar de mim. Te amo.

Agradeço a toda minha família por torcer por mim para seguir adiante, especialmente às minhas avós Lola e Leonor por me ter sempre em suas orações.

Ao meu orientador, o professor José Camapum de Carvalho, obrigada pelo apoio constante, a paciência nos meus dias mais difíceis, o ensino tanto no profissional quanto na vida, minha admiração e gratidão total.

A Aleja, Lu, Caro, Isa, Koral, Lau, Nieves, Cami, Julián P. e Anderson, pela sua amizade e apoio mesmo na distância e no tempo.

Aos meus amores Brasileiros (Débora, Ana Luisa, Giovanna, Ana Carolina, Narayanna, Ronaldo), Colombianos (Juliana, Daniela, Nataly, Julián, Carlos, Jaime), Costariquenhos (Maiky, Alonso) e da Bolívia (Janneth Blue), por ter sido parte importante durante todos esses anos na UnB, pelos momentos compartilhados, abraços e palavras de força, muito obrigada. Vocês foram de alguma forma, fonte de inspiração para mim.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia por me dar todo o conhecimento adquirido nestes anos e a oportunidade de conhecer pessoas tão maravilhosas que enriqueceram muito mais esta experiência.

Ao laboratório de Geocronologia e da Mecânica da UnB, pela ajuda com as imagens obtidas pelo MEV, assim como à Ingrid pela ajuda na metalização das amostras na faculdade de Biologia da UnB, muito obrigada.

Ao CNPq pelo apoio econômico durante estes 4 anos para o desenvolvimento desta pesquisa.

E finalmente, agradeço a todas aquelas pessoas que conheci e com as quais compartilhei alguma parte desse processo.

RESUMO

O aumento da demanda de alimento a nível global, tem feito com que a cada ano o uso de insumos minerais seja maior para repor todos os nutrientes perdidos ou consumidos pela vegetação e micro-organismos. São poucos os estudos que avaliam o efeito do acúmulo destes produtos químicos na estrutura e comportamento mecânico dos solos tropicais, motivando assim esta pesquisa. Em campo, os insumos minerais são incorporados à camada superficial de solo, no entanto, estes não permanecem fixos a esta camada. Observa-se três condições possíveis, primeira: com o tempo uma porção é consumida; segundo: o insumo é transportado, acompanhando o solo durante os processos erosivos; terceiro: migração dos insumos através do perfil de solo, fazendo com que solos submetidos a diferentes níveis de intemperismo se submetam aos seus efeitos. Mediante o exposto, optou-se por avaliar solos com diferentes níveis de intemperismo tropical. As amostras foram analisadas após mistura e cura em laboratório e após serem mantidas por um ano em condições de campo. Imagens da estrutura do solo, obtidas por diferentes metodologias, permitiram observar que a estrutura do solo passa por processos de alteração impactando na porosidade e tamanho de poros, gerando microfissuras, agregações e desagregações, estas modificações variam com o produto químico utilizado. Tendo em vista que o comportamento mecânico dos solos é afetado pela sucção nele atuante, também foram obtidas as curvas características das misturas com um solo laterítico e com um solo saprolítico, obtendo uma variação nos valores da sucção mátrica nas diferentes zonas de poros que compõem a curva, indicando também com isso mudanças na estrutura do solo. No caso da sucção osmótica foram observadas mudanças consideráveis para alguns dos insumos estudados, indicando um aumento da concentração de sais que fez com que a sucção osmótica aumentasse. O estudo do comportamento mecânico foi realizado em amostras de solo laterítico com e sem insumos minerais, por ensaios de resistência à tração por compressão diametral, ensaios de resistência à compressão simples, ensaios de cisalhamento direto, ensaios de adensamento e ensaios de módulo de elasticidade dinâmico estimado. Os resultados obtidos na pesquisa mostram que as propriedades e comportamento mecânico do solo são afetados pela introdução dos insumos minerais e que a sucção osmótica pode, em certos casos, ter um papel importante nesse comportamento.

Palavras chave: Desagregação, sucção, mudanças na estrutura, resistência.

ABSTRACT

The increase in food demand at a global level has made the use of minerals inputs greater every year, due to the necessity of replace all the nutrients lost or consumed by vegetation and microorganisms. There are few studies that evaluate the effect of the accumulation of these chemicals on the structure and mechanical behavior of tropical soils, thus motivating this research. In the field, minerals inputs are incorporated into the surface layer of soil, however, they do not remain fixed to this layer. Three possible conditions are observed, first: over time a portion is consumed; second: the input is transported, accompanying the soil during erosion processes; third: migration of inputs through the soil profile, causing soils subjected to different levels of weathering to undergo its effects. Based on the above, it was decided to evaluate soils with different levels of tropical weathering. The samples were analyzed after mixing and curing in the laboratory and after being kept for one year under field conditions. Images of the soil structure obtained with different equipment allowed us to observe that it undergoes alteration processes impacting porosity and pore size, generating micro-cracks, aggregations and disaggregations, all depending on the chemical used. Considering that the mechanical behavior of soils is affected by the suction acting on it, the characteristic curves of the mixtures with a lateritic soil and with a saprolitic soil were also obtained. The results showed a variation in the values of the matric suction in the different pore zones that make up the curve, also indicating changes in soil structure. In the case of osmotic suction, considerable changes were obtained for some of the studied inputs, indicating an increase in the concentration of salts that caused the osmotic suction to increase. The study of the mechanical behavior was carried out on the mixtures with lateritic soil through tests of tensile strength by diametrical compression, tests of simple compressive strength, direct shear tests, consolidation tests and estimated dynamic modulus of elasticity tests. The results obtained in the research show that the properties and mechanical behavior of the soil are affected by the introduction of minerals inputs and that osmotic suction can, in certain cases, play an important role in this behavior.

Keywords: Disaggregation; suction; structural changes, strength.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	HIPÓTESE DA TESE	2
1.2.	OBJETIVO GERAL.....	2
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.4.	ESTRUTURA DA TESE	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS ARGILAS	4
2.1.1.	Tipos de cargas presentes nas argilas	4
2.1.2.	Íons trocáveis.....	6
2.2.	CARACTERÍSTICAS DO SOLO PARA A AGRICULTURA	8
2.3.	CONTAMINANTES NO SOLO.....	9
2.4.	INFLUÊNCIA DE CONTAMINANTES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS	10
2.5.	INFLUÊNCIA DOS FERTILIZANTES NAS PROPRIEDADES DO SOLO	11
2.6.	SUCÇÃO NO SOLO.....	14
2.6.1.	Curvas características de retenção de água no solo.....	15
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	19
3.2.	AVALIAÇÕES QUÍMICAS	22
3.3.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS INSUMOS NA ESTRUTURA DOS SOLOS	23
3.3.1.	Curva característica de retenção de água no solo.....	23
3.3.2.	Análise visual com Lupa	26
3.3.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	27

3.3.4.	Microtomografia computadorizada (microCT)	27
3.4.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS INSUMOS NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS	28
3.4.1.	Resistência à tração por compressão diametral (σ_t)	29
3.4.2.	Resistência à compressão simples	30
3.4.3.	Módulo de elasticidade dinâmico estimado (E_d)	30
3.4.4.	Resistência ao cisalhamento	31
3.4.5.	Ensaio duplo edométrico	32
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	36
4.1.	AVALIAÇÕES DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS	36
4.2.	PROPRIEDADES FÍSICAS	43
4.2.1.	Massa Específica dos Sólidos	43
4.3.	ANÁLISES DA ESTRUTURA	53
4.3.1.	Análise visual com lupa	54
4.3.2.	Imagens feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	56
4.3.3.	Microtomografia computadorizada (microCT)	61
4.3.4.	Curvas características de retenção de água no solo	68
4.3.4.1.	Sucção mátrica	69
4.3.4.2.	Sucção osmótica	74
4.3.4.3.	Sucção total	77
4.4.	ANÁLISES DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	79
4.4.1.	Resistência à tração por compressão diametral (σ_t)	79
4.4.2.	Resistência à compressão simples	89
4.4.3.	Módulo de elasticidade dinâmico estimado (E_d)	94
4.4.4.	Resistência ao cisalhamento direto	95
4.4.5.	Ensaio duplo edométrico	99

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
5.1. CONCLUSÕES	104
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE_A: FIGURAS COMPARATIVAS DAS IMAGENS OBTIDAS COM O MEV	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Relação entre o índice de sensibilidade do solo ao entorno e o tamanho das partículas (Figura modificada e traduzida de: Sivapullaiah, 2009).	8
Figura 2.2. Tipos de curvas características solo-água. Modificada de.....	15
Figura 3.1. a) amostra de solo no interior do saco poroso sendo enterrada; b) distribuição das amostras enterradas.	22
Figura 3.2. Resultados do teste dos dois mecanismos de preparação da amostra para as misturas do solo laterítico com o calcáreo dolomítico (a e c) e com a ureia (b e d).....	25
Figura 3.3. À direita corpo de prova com a ureia dissolvida previamente em água e à esquerda com a ureia sem dissolver, 10 dias após serem compactados.	25
Figura 3.4. a) Montagem dos papéis filtro no corpo de prova, b) montagem no interior da capsula c) capsula vedada	26
Figura 3.5. Corpo de prova para ensaio de microtomografia. (a) amostra na base do equipamento indicando altura de interesse; (b) diâmetro de interesse.	28
Figura 3.6. Montagem do ensaio de tração indireta	29
Figura 3.7. Ultrasonic Tester E46 da marca Controls	31
Figura 3.8 Fluxograma mostrando a metodologia desenvolvida para a avaliação química (a) e as avaliações física e de comportamento (b).	35
Figura 4.1. Distribuição granulométrica dos insumos minerais estudados. Modificado de Pérez (2018)	38
Figura 4.2. Solo laterítico com 10% de teor dos aditivos químicos e tempo de exposição de 24h (a) e 7 dias (b) (Pérez, 2018).	39
Figura 4.3. Solo laterítico com 4% de teor dos aditivos químicos e tempo de exposição de 7 dias (Pérez, 2018).	39
Figura 4.4 CTC, MO, saturação por bases e acidez ao longo do perfil (Pérez, 2018).	43
Figura 4.5. Resultados do ensaio de sedimentação em água para o solo laterítico com as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB (a) e 24 horas após a mistura (b). .	45

Figura 4.6. Resultados do ensaio de sedimentação em água para o solo de transição com as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB (a) e 24 horas após a mistura (b).	47
Figura 4.7. Resultados do ensaio de sedimentação com defloculante para o solo laterítico e as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB.....	48
Figura 4.8. Resultados do ensaio de sedimentação com defloculante para o solo de transição e as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB.	48
Figura 4.9. Resultados dos Limites de Atterberg, com tempo de exposição de 24h: a) l_i ; b) l_p . Modificado de Pérez (2018).	50
Figura 4.10. Índices de vazios em função da umidade para o solo laterítico (a); saprolítico (b).	51
Figura 4.11. Índice de vazios em função do volume de sólidos estimado	51
Figura 4.12. Efeito dos fertilizantes cloreto de potássio e ureia no solo de saprolítico, para os menores valores de sucção.	53
Figura 4.13. Efeito da ureia na estabilidade estrutural de um solo laterítico (a); saprolítico (b).	54
Figura 4.14. Forma como o cloreto de potássio se cristaliza no solo laterítico (a); saprolítico (b).	54
Figura 4.15. Imagens obtidas com a lupa para o solo laterítico, misturado com 10% de teor dos diferentes aditivos químicos. Aumento de 200 vezes.	55
Figura 4.16. Imagens obtidas com a lupa para o solo saprolítico, misturado com 10% de teor dos diferentes aditivos químicos. Aumento de 200 vezes.....	56
Figura 4.17. MEV do solo natural: 100 x (a); 2000 x (b).	57
Figura 4.18. MEV da mistura solo-calcário dolomítico: 100 x (a); 2000 x (b).	57
Figura 4.19. MEV da mistura solo-ureia: 66 x (a); 1000 x (b); 2000 x (c).	58
Figura 4.20. MEV da mistura solo-cloreto de potássio: 100 x (a); 2000 x (b); 500 x (c); 5000 x (d).	59
Figura 4.21. MEV da mistura solo-Super simples: 100 x (a); 1000 x (b); 2000 x (c).	60

Figura 4.22. MEV da mistura solo-SUC: 100 x (a); 1000 x (b); 2000 x (c).	61
Figura 4.23. Capturas bidimensionais obtidas do ensaio de microCT	63
Figura 4.24. Perfis de atenuação com análise de densidade para os materiais sobre a linha vermelha	64
Figura 4.25. Análise 3D apresentando o volume de poros, de grãos e de partículas mais densas do solo laterítico em cada uma das misturas estudadas.	66
Figura 4.26. Distribuição do volume de poros para o solo natural e para cada mistura avaliada.	68
Figura 4.27. Fungos no papel filtro após o período de 15 dias.	69
Figura 4.28. Curvas características da sucção mátrica do solo laterítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).	70
Figura 4.29. Curvas características da sucção mátrica do solo saprolítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).	72
Figura 4.30. À esquerda mistura com o cloreto de potássio e à direita com o Super simples. Os dois corpos de prova apresentam aproximadamente o mesmo grau de saturação.	73
Figura 4.31. Curvas características transformadas das diferentes misturas com o solo laterítico (a) e saprolítico (b).	74
Figura 4.32. Curvas características da sucção osmótica em função da umidade para o solo laterítico (a) e saprolítico (b).	75
Figura 4.33. Curvas características da sucção total do solo laterítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).	77
Figura 4.34. Curvas características da sucção total do solo saprolítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).	78
Figura 4.35. Resistência à tração (RT) em função da umidade (w): solo laterítico (a); solo saprolítico (b).	81
Figura 4.36. Resistência à tração (RT) em função do índice de vazios (e): solo laterítico (a); solo saprolítico (b).	82
Figura 4.37. Resultados da resistência à tração (RT) em função da sucção mátrica para o solo laterítico (a); saprolítico (b).	82

Figura 4.38. Corpos de prova compactados para o solo laterítico misturado com a ureia. a) Efeito do umedecimento dos cristais da ureia e b) efeito de ciclos de secagem e umedecimento.	84
Figura 4.39. Resultados da resistência à tração (RT) em função do pF/e para o solo laterítico (a); saprolítico (b).....	85
Figura 4.40. Resultados da resistência à tração por compressão diametral (RT) para o solo laterítico (a) e o solo saprolítico (b), em função da sucção osmótica.	85
Figura 4.41. Resistência à tração (RT) do solo laterítico em função da soma da sucção mátrica normalizada pelo índice de vazios com a sucção osmótica transformada pela umidade.....	86
Figura 4.42. Número de golpes em função de: w (a); w/(pH/PCZ) (b) e w/(pH/7) (c).	87
Figura 4.43. Sucção mátrica (a), pF/e da sucção mátrica (b), sucção total (c) e pF/e as sucção total em função de I_p para as duas profundidades estudadas.....	88
Figura 4.44. pF da sucção osmótica/e em função de I_p para as duas profundidades estudadas.	89
Figura 4.45. RT máxima (a) e RT máx/e (b) em função de I_p (b).....	89
Figura 4.46. Índice de vazios em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).	90
Figura 4.47. Resultados do ensaio de compressão simples.....	91
Figura 4.48. Resultados do ensaio de compressão simples em função da umidade (a), sucção mátrica (b), e (c) e S_r (d).....	92
Figura 4.49. Resistência à compressão simples em função de pF/e (a); pF x e (b).	93
Figura 4.50. Corpos de prova após ruptura da mistura com ureia (a), solo natural (b) e mistura com o Super simples (c).....	94
Figura 4.51. Correlação entre E e E_d	95
Figura 4.52. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para 50 kPa de tensão normal aplicada no solo laterítico puro e nas diferentes misturas.	95
Figura 4.53. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para 100 kPa de tensão normal aplicada no solo laterítico puro e nas diferentes misturas.....	96

Figura 4.54. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para 200 kPa de tensão normal aplicada no solo laterítico puro e nas diferentes misturas.....	96
Figura 4.55. Envoltórias de ruptura para o solo laterítico puro e para as misturas solo-insumo mineral.....	97
Figura 4.56. Parâmetros de resistência para o solo laterítico puro e para as misturas feitas. ..	98
Figura 4.57. Relação entre a resistência ao cisalhamento obtida para deslocamentos cisalhantes de 1 mm, 3 mm e 6 mm e o I_p , considerando-se as tensões confinantes de 50 kPa (a) e 200 kPa (b).	98
Figura 4.58. Relação entre a coesão efetiva e o limite de plasticidade (I_p).	99
Figura 4.59. Curvas de compressão normalizadas pelo índice de vazios inicial para o solo laterítico puro e misturado com Super simples, ureia e cloreto de potássio.	100
Figura 4.60. Curvas de compressão normalizadas pelo índice de vazios inicial para o solo laterítico puro e misturado com o calcário dolomítico e o composto SUC.....	100
Figura 4.61. índice de colapso calculado para cada estágio de carga segundo (a) Vargas (1977) e (b) pela diferença entre a condição não inundada e inundada.	101
Figura 4.62. Índice de colapso segundo a proposta de Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (2009) (a) e colapso aos 15 segundos de aplicação de cada carga (b).	102
Figura 4.63. índice de colapso segundo a proposta de Jennings e Knight (1957) apud Maia (2005).	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Capacidade de troca catiônica de alguns argilominerais. Adaptada de Grim (1962).	7
Tabela 2.2. CTC de alguns coloides de solo sob condições tropicais. Adaptada de Mello <i>et al.</i> (1983).....	7
Tabela 2.3. Técnicas para medir a sucção nos solos (Marinho, 1997).....	17
Tabela 4.1. Composição química do solo laterítico (L) e misturas, com tempo de exposição de 3 anos no laboratório.	36
Tabela 4.2. Composição química do solo laterítico (L) e misturas, com tempo de exposição de 1 ano no campo experimental.....	37
Tabela 4.3. Correlação estatística das propriedades químicas do solo laterítico e suas misturas com tempo de exposição de 1 ano no campo experimental.	40
Tabela 4.4. Correlação estatística das propriedades químicas do solo laterítico e suas misturas com tempo de exposição de 3 anos na condição de laboratório.....	41
Tabela 4.5. Composição química do solo de transição (T) e misturas, com tempo de exposição de 1 ano no campo experimental.....	42
Tabela 4.6. Massas específicas dos sólidos (ρ) do solo puro, dos insumos usados e das misturas solo-insumo.	44
Tabela 4.7. Porcentagens para diferentes tamanhos de partículas do solo laterítico com 1 ano de exposição no campo experimental e 24 horas após a mistura, sem uso de defloculante.	46
Tabela 4.8. Porcentagens para diferentes tamanhos de partículas do solo de transição com 1 ano de exposição no campo experimental da UnB e 24 horas após a mistura, sem uso de defloculante.	47
Tabela 4.9. Porcentagens para diferentes tamanhos de partículas do solo laterítico e de transição com 1 ano de exposição no campo experimental e com uso de defloculante.	49
Tabela 4.10. Valores de sucção mátrica para cada uma das misturas durante o ensaio de compressão simples.....	90
Tabela 4.11. Resultados E e Ed.....	94

NOMENCLATURA, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Al	Alumínio.
c'	Coesão efetiva do solo.
Ca	Cálcio.
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio.
Ca^{2+}	Cátion cálcio.
CC	Curva característica de retenção de água no solo.
CP	Corpo de prova.
CTC	Capacidade de troca catiônica.
e	Índice de vazios.
E	Módulo de elasticidade tangente para o 50% da resistência à compressão simples.
e_{0inund}	Índice de vazios inicial do solo inundado.
$e_{0médio}$	Índice de vazios inicial médio do solo.
e_{0nat}	Índice de vazios inicial do solo na umidade natural.
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico estimado.
e_{inund}	Índice de vazios final do solo inundado para uma determinada tensão aplicada.
e_{nat}	Índice de vazios final do solo na umidade natural para uma determinada tensão aplicada.
F	Carga aplicada no ensaio de tração indireta.
G _s	Peso específico dos grãos.
H	Hidrogênio.
h	Altura do corpo de prova no ensaio de ultrassom.
H ⁺	Cátion Hidrogênio.
H+Al	Acidez total.
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico.
HCL	Ácido clorídrico.
HNO ₃	Ácido nítrico.
IFA	Associação Internacional de Fertilizantes.
K	Potássio.
K ⁺	Cátion potássio.
KCl	Cloreto de Potássio.
KOH	Hidróxido de potássio.
L	Laterítico

Li	Lítio.
l _l	Limite de liquidez
l _p	Limite de plasticidade
MCV	Metodologia de compactação de Valor da Condição de Umidade (Moisture Condition Value)
meq	Miliequivalente.
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura.
Mg	Magnésio.
Mg ²⁺	Cátion magnésio.
MO	Matéria orgânica presente no solo.
MO	Matéria orgânica.
Na	Sódio.
Na ⁺	Cátion sódio.
NaOH	Hidróxido de sódio.
NBR	Norma Brasileira.
NH ₄	Amônio.
NH ₄ ⁺	Cátion de amônio.
NO ₃	Nitrato.
NPK	Fertilizante constituído principalmente por nitrogênio, fósforo e potássio.
OH ⁻	Ânion hidroxila.
P	Fósforo.
PCZ	Ponto de Carga Zero.
pF	Sucção dada em termos do logaritmo decimal por centímetros de coluna de água.
PF	Papel filtro.
pH	Potencial hidrogeniônico.
pH _{H₂O}	pH do solo medido em solução de água.
pH _{KCL}	pH do solo medido em solução de cloreto de potássio.
PPGG	Programa de pós-graduação em geotecnia.
S	Superfície específica.
Sr	Grau de saturação do solo.
SS	Fertilizante Super simples.
SUC	Mistura dos aditivos químicos puros Super simples, Ureia e Cloreto de Potássio.
T	Transição
u _a	Pressão de ar nos poros do solo.
UnB	Universidade de Brasília.

u_w	Pressão de água nos poros do solo.
$V\%$	Saturação por bases.
VOI	Volume de interesse.
v_p	Velocidade da onda primária.
w	Teor de umidade gravimétrico.
π	Sucção é a osmótica.
ρ	Massa específica do corpo de prova.
ρ_s	Massa específica dos sólidos.
σ_t	Resistência à tração por compressão diametral.
ϕ	Diâmetro do corpo de prova no ensaio de tração indireta.
ψ	Sucção total.
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo do solo.
θ	Teor de umidade volumétrico.

1. INTRODUÇÃO

O uso de fertilizantes no Brasil e no mundo é cada vez maior, devido a diferentes fatores como aumento da demanda de alimentos, escassez de determinados nutrientes e necessidade de ajustes no potencial hidrogeniônico (pH) do solo. Segundo o plano nacional de fertilizantes 2050, apresentado em novembro de 2021, o Brasil é o quarto país que mais utiliza fertilizantes, consumindo aproximadamente 8% do consumo global; destaca-se como principais nutrientes aplicados o potássio (38%), o fósforo (33%) e o nitrogênio (29%) (PNF, 2021).

No entanto, o uso em si desses insumos minerais e, de modo mais significativo, o seu uso desequilibrado e/ou em excesso, assim como a substituição da flora, terminam propiciando a contaminação do solo e a quebra na cadeia da microfauna (fungos, bactérias, minhocas etc.) importante para a fertilidade do mesmo, tornando necessária com o tempo uma maior quantidade de fertilizantes (Kist *et al.*, 2011). Ao mesmo tempo, a prática de monoculturas, a compactação do solo por ciclos de molhagem e secagem (Momoli *et al.* 2017), as erosões superficiais e as lixiviações atuantes no solo, ampliam o problema tornando o solo menos apropriado à prática da agricultura e exigindo mais intervenções de ordem química.

O impacto da excessiva fertilização do solo na agricultura e no meio ambiente tem sido estudado com maior detalhe na área agrícola, sendo escassos os estudos relacionados para a área geotécnica. Os poucos estudos geotécnicos sobre o tema são, geralmente, voltados apenas para a análise de propriedades físicas, deixando a desejar os estudos voltados para o entendimento do impacto que os insumos minerais geram no comportamento mecânico dos solos. Assim, por exemplo, nos estudos feitos com cal tem se obtido que este produto químico, a depender do tipo de solo, pode gerar agregação ou desagregação das partículas, alterar os valores dos parâmetros físicos e de resistência, podendo melhorá-los ou piorá-los (Chahal *et al.* (2011), Aguiar (2014), Llanque (2020), Marino (2022)). Adicionalmente, nas pesquisas desenvolvidas por Ezeokonkwo (2011) e Jiang-tao & Bin (2007) os fertilizantes como o NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) mostraram uma diminuição nos limites de Atterberg e na estabilidade do solo, além de um incremento na porosidade do solo. Por outro lado, Perez (2018) obteve variações nas propriedades físicas dos solos estudados ao serem misturados com diferentes tipos de fertilizantes, ressaltando principalmente a desagregação de partículas gerada por eles. Com fundamento nesses estudos de propriedades físicas tem-se que a ação dos adubos

dependerá da natureza do próprio solo, de sua composição químico-mineralógica, de sua estrutura e presença ou não de agregações assim como do próprio teor de insumo utilizado.

Como existe uma relação entre as propriedades físicas e químico-mineralógicas dos solos e o comportamento hidromecânico que apresentam, torna-se relevante o estudo do impacto dos fertilizantes mais usados no comportamento mecânico dos solos. No presente estudo optou-se por analisar o impacto dos aditivos químicos utilizados na prática da agricultura brasileira quanto ao comportamento dos solos que se encontram em diferentes níveis de intemperismo na natureza. De modo a ampliar a percepção do impacto que apresentam no comportamento dos solos após os estudos preliminares realizados por Pérez (2018) optou-se pelo uso do teor 10% em peso para cada aditivo

Esta pesquisa mostra como a depender do tipo de solo, nível de intemperização, composição químico-mineralógica, etc., ocorrerão em consequência do uso de insumos minerais, mudanças na composição química, na estrutura, nas curvas de retenção de água do solo e no comportamento mecânico do solo.

1.1. HIPÓTESE DA TESE

Considerando-se que a hipótese é uma suposição que se faz buscando explicar o que não se conhece, conforme pontua Lucena (2012) fundamentando-se em Rudio (1999), tem-se nesse estudo como premissa o fato de que os insumos minerais afetam tanto a estrutura e propriedades físico-químicas como o comportamento mecânico do solo.

1.2. OBJETIVO GERAL

Avaliar experimentalmente quais são as alterações que se apresentam na estabilidade estrutural, na curva de retenção de água do solo e no comportamento mecânico de solos integrando um perfil de intemperismo tropical, quando estes são misturados com diferentes insumos minerais.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram definidos como objetivos específicos:

- Estudar o efeito na sucção de um solo laterítico e de um solo saprolítico ao serem misturados com diferentes produtos agrícolas.

- Identificar possíveis alterações na estrutura de um solo laterítico tropical por meio de imagens obtidas com lupa, microscópio electrónico de varredura (MEV) e microtomografia computadorizada (microCT), quando exposto a insumos minerais.
- Avaliar por meio de ensaios, as alterações apresentadas na resistência à tração de um solo laterítico e de um solo saprolítico quando misturado com diferentes tipos de fertilizantes.
- Avaliar qual ou quais insumos minerais geram as maiores alterações tanto de comportamento mecânico quanto da estrutura do solo.
- Avaliar mediante ensaios, as alterações apresentadas na resistência à compressão simples, no módulo de elasticidade dinâmico estimado, na resistência ao cisalhamento direto e na compressibilidade de um solo laterítico quando misturado com diferentes tipos de insumos minerais.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

Com o objetivo de facilitar a compreensão do desenvolvimento desta pesquisa, o trabalho foi dividido em 5 capítulos explicados brevemente a seguir.

O Capítulo 1 compreende a introdução ao estudo realizado, ressaltando brevemente os motivos pelos quais foi desenvolvido, a hipótese do estudo e os seus objetivos.

No Capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica abordando os conceitos fundamentais para o entendimento dos resultados obtidos.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia utilizada nos diversos ensaios e as especificações dos materiais estudados.

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos dos diferentes ensaios realizados.

No Capítulo 5, estão as principais conclusões obtidas desta pesquisa, bem como sugestões para futuras pesquisas.

Finalmente são apresentadas as referências citadas nesta tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento dos resultados obtidos nesta pesquisa.

2.1. ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DAS ARGILAS

2.1.1. Tipos de cargas presentes nas argilas

Os argilomineráls são considerados colóides tanto por possuírem na sua maioria, partículas com tamanhos inferiores a 0,002 mm de diâmetro, quanto pela sua forma e carga superficial. Elas são caracterizadas por apresentarem uma relação elevada da área total exposta por unidade de peso, conhecida como superfície específica, e carga elétrica permanente ou variável, a qual gera alta reatividade (Grim, 1962)

A carga permanente, típica dos solos de clima temperado, é a que geralmente apresenta a partícula desde sua formação, sendo negativa e pouco dependente das condições do meio. Esta carga é gerada por substituições isomórficas as quais consistem na troca de um elemento de maior por um de menor valência (Jaramillo, 2000) e se situam nas faces do mineral.

A carga variável pode ser positiva ou negativa e é gerada pela adsorção de íons na superfície dos colóides que podem alterar a carga da partícula. Estes íons são conhecidos como íons determinantes de potencial, sendo que os principais são o ânion hidroxila (OH^-) e o cátion hidrogênio (H^+). Quando se apresenta uma variação da concentração destes íons, a carga varia, por isso os colóides de carga variável são dependentes do pH do meio. Com isso, quando se apresenta neste tipo de solo um incremento de cátions de hidrogênio produto de reações químicas, o pH diminui, tendendo o solo a ficar ácido, e com isso também diminui sua capacidade de absorção de cátions (Campillo & Sadzawka, 2006).

Um solo com pH inferior a 7, apresenta maior facilidade no transporte de metais pesados (tipo de contaminante) no interior de sua estrutura, enquanto, os solos que apresentam valores de pH superior a 7, tem a retenção destes favorecida (Sodré *et al.*, 2001). No entanto, a retenção de contaminantes com pH superior a 7 não acontece comumente em solos tropicais. A facilidade do transporte dos contaminantes no solo, varia de acordo com o teor e tipo de argila, pH, capacidade de troca catiônica, teor de matéria orgânica, entre outros. Estes fatores influenciam

nas reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução (Oliveira & Mattiazzo, 2001).

No Brasil, os solos predominantes nas camadas mais superficiais são os solos lateríticos como os Latossolos e Argissolos. Na zona central do Brasil estes solos possuem principalmente minerais hidróxidos, mais especificamente a gibbsita, minerais silicatados do tipo 1:1 do grupo da caulinita, óxi-hidróxidos de ferro e alumínio e outros minerais em menor quantidade (Reatto *et al.* 2009). Estes solos podem também serem ricos em quartzo, mineral resistente ao intemperismo, onde uma parte dele, segundo hipótese apresentada por Rodrigues (2017) e Senaha (2019), pode ser oriundo de alteração da caulinita ao dar origem à gibbsita, e outra parte ser residual da rocha mãe que deu origem ao solo. Estes tipos de solos apresentam como principais características: estrutura metaestável, alta porosidade com distribuição de poros bimodal, alta permeabilidade, baixa capacidade de troca catiônica e alta capacidade de adsorção aniônica. A troca iônica acontece no espaço interlamelar, quando íons fracamente ligados na argila são trocados por outros quando ela entra em contato com soluções ionizadas (Fontes *et al.*, 2001).

As cargas elétricas variáveis e positivas são as que predominam na maioria dos Latossolos. Entretanto, como não pode existir um desequilíbrio elétrico no solo, quando o solo é misturado com uma substância solvente, como por exemplo a água contendo produtos químicos, os cátions dessa solução são atraídos formando uma dupla camada de cargas conhecida como dupla camada difusa (Marchi *et al.*, 2006).

Esta concentração de cátions é maior na superfície da partícula carregada negativamente e diminui com a distância até ficar com a mesma concentração da solução externa, definindo com isso o limite da dupla camada difusa. Dependendo do cátion, as duplas camadas difusas apresentam uma certa espessura que podem se sobrepor, gerando forças eletrostáticas que tornam as partículas susceptíveis à dispersão. A dispersão do solo em função do cátion diminui na ordem: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$ (Fertiyeso, 2017).

A presença de cargas elétricas positivas e negativas é importante para promover a atração entre as partículas coloidais do solo. Esta floculação pode ser causada por forças de atração de van der Waals, pelas variações nos campos eletromagnéticos dos átomos dos minerais ou por um rearranjo dos contraíons na medida que os campos eletrostáticos das partículas se sobrepõem (Azevedo & Bonumá, 2004). Um contraíon é o íon que acompanha um ânion ou cátion e gera a neutralidade elétrica.

Cabe aqui destacar que um perfil de intemperismo tropical é geralmente composto de partículas de minerais que vão de estados simplesmente floculados ou dispersos, solos pouco intemperizados, até estados agregados, solos profundamente intemperizados (Guimarães (2002), Camapum de Carvalho *et al.* (2012)). No caso dos solos profundamente intemperizados o pH do meio pode exercer influência sobre a estabilidade estrutural e da textura do solo. Os resultados apresentados por Pérez (2018), mostram que as variações no pH das diferentes misturas estavam relacionadas com as desagregações observadas dos resultados de sedimentação sem o uso de defloculante.

2.1.2. Íons trocáveis

Os íons são divididos em cátions (carga positiva) e ânions (carga negativa) e quando há ocorrência de troca iônica, promove-se alterações nas propriedades físicas. Destaca-se que a troca de íons gera uma mudança na carga da partícula, mas não em sua estrutura. Nos argilominerais os principais cátions trocáveis são: cálcio, magnésio, hidrogênio, potássio, sódio e o composto amônia. Pelo contrário, os ânions mais comuns na troca são os sulfatos, o cloro, os fosfatos, nitratos e silicatos (Grim, 1962).

Outro conceito a considerar corresponde à saturação por bases, a qual representa a porcentagem de íons básicos (Ca, Mg, Na e K) disponíveis na superfície das partículas para troca iônica, a porcentagem restante representa os cátions ácidos (Al e H). Então, quanto maior o grau de saturação por bases, maior a possibilidade de absorção de cátions e maior o pH (Espinoza *et al.*, 2000). Ao adicionar calcário em solos ácidos com uma baixa saturação de bases é gerado um incremento do pH, o qual obriga a saída de íons de H^+ , ficando mais espaços disponíveis na superfície da partícula para absorver outros cátions (Garrido Valero, 1993).

A capacidade de troca de cátions (CTC) consiste na capacidade do solo para liberar e reter íons positivos (Ronquim, 2010). Este fenômeno em solos com minerais argilosos, geralmente aumenta com a diminuição do tamanho de partículas devido ao aumento da sua área superficial (Grim, 1962), com o tipo e quantidade de argila presente no solo e com o incremento do conteúdo de matéria orgânica (Besoain *et al.*, 1985). Em sentido oposto, é muito difícil promover uma troca aniônica sem afetar a estrutura do argilomineral, pois estes podem se decompor durante a reação (Grim, 1962). A Tabela 2.1 foi obtida a partir de Grim (1962) e apresenta a capacidade de troca catiônica de alguns argilominerais.

Tabela 2.1. Capacidade de troca catiônica de alguns argilominerais. Adaptada de Grim (1962).

CTC de argilominerais (em miliequivalentes por 100 g)	
Caulinita	3-15
Haloisita 2H ₂ O	5-10
Haloisita 4H ₂ O	10-40
Montmorillonita	80 – 150
Ilita	10-40
Vermiculita	100 – 150
Clorita	10 – 40
Sepiolita-Atapulgita	20 – 30

Para os solos tropicais Ronquim (2010) apresenta com base em Mello *et al.* (1983) os valores de CTC apresentados na Tabela 2.2. É importante destacar a introdução dos óxidos de ferro e alumínio e das substâncias húmicas nessa tabela, compostos presentes nos perfis de intemperismo tropicais.

Tabela 2.2. CTC de alguns coloides de solo sob condições tropicais. Adaptada de Mello *et al.* (1983)

Coloide	CTC (mmolc dm ⁻³)
Caulinita*	50 - 150
Montmorilonita*	500 - 1.000
Ilita*	100 - 500
Vermiculita*	1.000 - 1.500
Alofana*	250 - 700
Óxidos de Fe e Al	20 - 50
Substâncias húmicas	1.500 - 5.000

*Minerais de Argila

Muitos estudos têm sido desenvolvidos para conhecer como os diferentes íons se relacionam com as macromoléculas em sistemas tão diferentes que podem variar desde a qualidade do solo até o sistema nervoso. O ordenamento do efeito destes íons na estrutura das macromoléculas é conhecido como series liotrópicas (ou de Hofmeister) (Fernández-d'Arlas, 2016).

Nos solos, as séries liotrópicas representam a ordem de preferência de absorção de íons de uma substância ou partícula. Primeiramente, a superfície do solo absorve os íons de maior valência, posteriormente, se a valência for a mesma, a absorção será feita com os íons que

apresentem maior raio iônico (Pérez García *et al.*, 2007). Por exemplo, no caso da caulinita, sua série liotrópica é Li-Na-H-K-Mg-Ca, sendo o lítio o de maior preferência para essa troca e o cálcio o de menor preferência (Fernández-d'Arlas, 2016).

As argilas por apresentarem as características anteriormente mencionadas, como sua capacidade de troca iônica, sua composição mineralógica diversificada, o pequeno tamanho das suas partículas, o modo de interação entre essas partículas, entre outras, fazem com que elas constituam o tipo de solo mais sensível ao meio ambiente, exemplificando a influência da mineralogia, uma argila com muita montmorilonita é mais sensível que um solo com muita Caulinita (Sivapullaiah, 2009). Na Figura 2.1 é apresentada a relação entre o índice de sensibilidade do solo à poluição e o tamanho ou superfície específica das partículas; esta superfície específica (S) foi calculada tomando como referência os diâmetros das partículas mostrados no eixo inferior, assumindo que elas apresentam forma esférica e um valor de Gs igual a 2,7. É observado na figura que as argilas e coloides apresentam maior sensibilidade à contaminação, ao apresentarem maiores valores de S, característica que permite uma maior capacidade de troca iônica com os contaminantes, tal e como foi mencionado anteriormente.

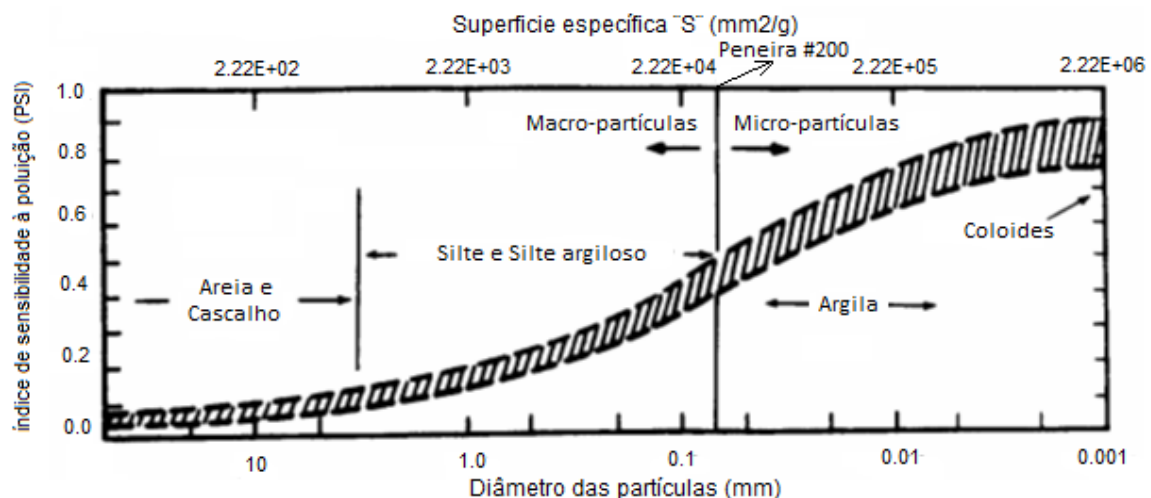


Figura 2.1. Relação entre o índice de sensibilidade do solo ao entorno e o tamanho das partículas (Figura modificada e traduzida de: Sivapullaiah, 2009).

2.2. CARACTERÍSTICAS DO SOLO PARA A AGRICULTURA

Um fator indispensável para o correto crescimento das plantas é considerar o tipo de solo, não apenas a nível nutricional, mas também a sua estrutura e características físicas tais como a porosidade (distribuição e tamanho), a distribuição do tamanho de partículas, o índice de compressão, a condutividade hidráulica, o potencial de retenção de água, a estabilidade dos

agregados, entre outros (Singer & Ewing, 2000; Santos *et. al*, 2011). Assim, solos com baixa porosidade ou muito densos, dificultam o fluxo do ar, o desenvolvimento das raízes, a permeabilidade à água, o transporte de nutrientes, entre outros, potencializando com isso o risco das raízes se deteriorarem devido ao excesso de umidade. Em sentido contrário, tem-se também que se o solo apresenta alta permeabilidade a retenção dos nutrientes pode ser afetada.

As propriedades físicas do solo geralmente dependem umas das outras, ou seja, se uma delas é alterada isso leva a que outras mudem (Stefanoski *et. al*, 2013).

Tem-se ainda, que se um solo apresenta desagregação das partículas gerando um aumento no teor de argila, isso faz com que a resistência tênsil dos agregados aumente e, portanto, se reduza a friabilidade (Kemper *et al.*, (1987), Imhoff, (2002)), propriedade física que representa a condição fofa do solo e que é importante para a germinação das sementes e crescimento das plantas.

2.3. CONTAMINANTES NO SOLO

O solo apresenta diferentes funções como a retenção do carbono, regulação das inundações, ciclo de nutrientes, regulação do clima, purificação da água e diminuição dos contaminantes no solo, ou seja, trabalha como um filtro (Murphy, 2014). Com o tempo, a acumulação, infiltração e deposição de diferentes substâncias como os poluentes atmosféricos, defensivos agrícolas, fertilizantes, resíduos industriais entre outros, vão quase sempre diminuindo a capacidade de filtração do solo, mas algumas características como a mineralogia, conteúdo de argila, nível de umidade, temperatura e a presença de outros compostos químicos, podem influenciar no comportamento dessas substâncias. (Hannah *et al.*, 2009). Esses agentes químicos podem ainda atuar modificando a estrutura do solo e influenciar na capacidade de infiltração ao promover alterações na porosidade e na distribuição de poros no solo.

Os contaminantes podem ser inorgânicos como os metais pesados ou orgânicos como os herbicidas, os fertilizantes, o lixo doméstico e grande parte dos resíduos agroindustriais. Todos esses tipos de contaminantes geram uma quebra na cadeia da microfauna (fungos, bactérias, minhocas etc) importante para a fertilidade do solo, tornando necessária com o tempo uma maior quantidade de fertilizantes (Kist *et al.*, 2011).

O tempo de permanência dos contaminantes no maciço depende de suas características e das propriedades do solo, por isso deve-se conhecer as propriedades físico-químicas dessas

sustâncias, tais como a solubilidade e a estabilidade química, para determinar o que acontece na estrutura do solo. Quando os contaminantes apresentam baixa solubilidade em água, tendem a se tornar fortemente absorvidos pela superfície da argila e da matéria orgânica (Peres *et al.*, 2003), isto porque estes dois materiais apresentam potencial de sorção, principalmente o último.

2.4. INFLUÊNCIA DE CONTAMINANTES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS

Cabe esclarecer que nesta pesquisa o termo contaminante abrange todos os produtos de origem química ou biológica que são estranhos aos solos estudados.

Muitas pesquisas têm avaliado o efeito de diferentes produtos químicos no comportamento dos solos, mostrando que a modificação de suas propriedades, produto da reação com o contaminante, pode gerar problemas geotécnicos. A mineralogia, a estrutura e as características físicas e químicas do solo, são os fatores que mais influenciam no momento da reação com um contaminante (Sivapullaiah, 2009). Por exemplo, pesquisadores indianos (Prakash & Arumairaj, 2013), avaliaram o efeito de diferentes concentrações de três contaminantes ácidos (HCl, HNO₃, H₂SO₄) e três básicos (NaOH, KOH, Ca(OH)₂), na resistência à compressão não confinada, compactação, peso específico e diferencial de expansão livre, obtendo que com o aumento do teor dos contaminantes ácidos utilizados, se gerava um incremento gradual do diferencial de expansão livre mas também se provocava uma diminuição do peso específico, do teor de umidade ótima, da densidade seca máxima e da resistência à compressão não confinada. Por outro lado, os resultados correspondentes aos contaminantes básicos mostraram que o aumento de seus teores promovia um acréscimo tanto na massa específica quanto a resistência à compressão não confinada, em contrapartida o diferencial de expansão livre, o conteúdo de umidade ótima e a densidade seca máxima são reduzidos (Prakash & Arumairaj, 2013).

Na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, também foram feitos ensaios de compactação, compressão simples e lixiviação, numa argila contaminada com 5% e 10% em peso de Cloreto de Zinco. Os resultados do Proctor normal mostraram que o peso específico aparente seco aumentava com o aumento de teor do contaminante (5% e 10%) e a umidade ótima diminuía com o aumento da concentração. Por outro lado, os resultados de compressão simples mostraram uma redução da resistência com o incremento do contaminante. Nesta

pesquisa também avaliaram o efeito de agentes encapsulantes (cal e cimento), os quais reduziram a concentração do lixiviado de cloreto de zinco (Perez, 2017).

Valencia *et al.* (2022) avaliaram o efeito de lixiviados, produto da decomposição de resíduos orgânicos domésticos, no comportamento mecânico de um solo residual de intemperismo do Batólito Antioquia na Colômbia. Os diferentes ensaios foram feitos num solo indeformado exposto ao lixiviado num recipiente hermeticamente fechado durante 30 dias e num solo indeformado coletado da parte inferior de um aterro exposto há mais de 15 anos a esses lixiviados. Os resultados mostraram que a exposição dos solos aos lixiviados gerou um acréscimo do conteúdo da matéria orgânica, da capacidade de troca catiônica, da permeabilidade, do índice de vazios e da porosidade tanto da amostra preparada no laboratório quanto da amostra coletada do aterro, tendo estes últimos dois parâmetros uma influência no comportamento mecânico dos solos, já que se obteve uma diminuição da sucção matricial (principalmente na zona dos mesoporos), da resistência à compressão simples e uma leve diminuição da resistência ao cisalhamento.

2.5. INFLUÊNCIA DOS FERTILIZANTES NAS PROPRIEDADES DO SOLO

Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar o efeito de diferentes tipos de fertilizantes nas propriedades físicas e mecânicas dos solos, sendo algumas delas apresentadas a seguir.

Celik *et al.*, (2010) determinaram o efeito a longo prazo de um fertilizante orgânico e outro mineral na densidade aparente e na resistência à penetração de um solo semiárido. Os autores concluíram que há uma diminuição da densidade aparente do solo misturado com o fertilizante orgânico, gerado pela reação entre os componentes orgânicos e os minerais mais densos, enquanto que a mistura com o fertilizante mineral incrementou a densidade, ou seja, o solo apresentou uma diminuição na macro-porosidade promovendo diminuição na infiltrabilidade. A resistência à penetração também diminuiu com a aplicação a longo prazo do fertilizante orgânico e aumentou com o fertilizante mineral o que é condizente com as variações de densidade.

Em outra pesquisa desenvolvida na universidade da Nigéria (Ezeokonkwo, 2011), foram estudadas outras propriedades do solo ao ser misturado com 4 teores do fertilizante NPK (4 partes de nitrogênio, 2 de fósforo e 1 de potássio). Os ensaios feitos foram limites de Atterberg,

compactação, permeabilidade e triaxial, obtendo-se como resultado que com o acréscimo de fertilizante, o limite liquidez, o limite de contração, o limite plástico e o coeficiente de permeabilidade diminuíam, ou seja, segundo o autor, é necessária uma menor quantidade de água para amolecer o solo, aumentando sua erodibilidade, e portanto, o solo tende a se tornar mais colapsível e amplia a superfície de escoamento. Não ocorreram alterações significativas na umidade ótima, e a densidade seca máxima do primeiro teor de fertilizante aumentou em relação ao solo sem contaminante, mas a partir desse teor começou a diminuir.

Outro estudo foi feito pelo período de 22 anos na Universidade de Nanjing na China, neste avaliaram a estabilidade no estado úmido, a resistência à tração e à penetração de um solo de região subtropical composto principalmente de Caulinita, nas condições: sem fertilizantes, com o fertilizante NPK, com dupla concentração e com este fertilizante mais matéria orgânica (Jiang-tao & Bin, 2007). Os autores obtiveram que o fertilizante misturado com matéria orgânica promoveu no ensaio de umedecimento rápido (o qual está influenciado pelo conteúdo de argila, tamanho da partícula e a umidade inicial), um acréscimo na porosidade e redução na resistência à tração e no grau de fragmentação (incremento da estabilidade). Já o solo sem fertilizante apresentou maior resistência à penetração e maior resistência à tração. E finalmente o solo com dupla concentração do produto químico (2NPK) apresentou diminuição da estabilidade em estado úmido e melhoramento das propriedades mecânicas (Jiang-tao & Bin, 2007).

Em estudo desenvolvido na Universidade de Alberta, no Canadá (Goh *et al.*, 1987), avaliou-se a longo prazo os efeitos físico, químico e micromorfológico de altos teores de ureia, fertilizantes baseados em amônia (nitrato de amônia e sulfato de amônia) e do nitrato de cálcio, em um solo com alto conteúdo de húmus e fósforo (Solo *Chernossolo*). O estudo concluiu que para um período curto usando altas concentrações do fertilizante, o conteúdo de carbono orgânico incrementava, mas não apresentava um melhoramento na microagregação da superfície do solo. Para uso prolongado de fertilizantes de amônia gerou-se acréscimo na desagregação da argila, podendo romper a microestrutura aceleradamente devido à substituição dos cátions trocáveis dominantes (Ca^{2+} e Mg^{2+}) por NH_4^+ . Em geral, o uso da ureia e dos fertilizantes com amônia baixaram o pH acidificando o solo, entre estes, o sulfato de amônia foi o que gerou maior variação de pH, enquanto a ureia promoveu a menor variação.

Outros resultados obtidos por Goh *et al.* (1987) mostraram que o nitrato de amônia e o nitrato de sulfato geraram um rearranjo dos grãos em unidades maiores na qual sua estrutura

era menos perceptível. Determinou-se que embora o tempo de exposição tenha sido curto, com a elevada concentração dos fertilizantes de amônia pode-se alterar significativamente o balanço entre os cátions básicos e A1 da superfície do solo (o balanço catiônico do solo é um parâmetro importante na microagregação)

Em todas as misturas não foram apresentadas alterações significativas na compactação ou porosidade total dos solos, mas a distribuição do tamanho dos poros foi diferente entre eles. Pelas análises de microscopia foi possível determinar a formação do solo de referência, sendo este composto por várias estruturas, destacando como a principal a *mullgranoidic* com diâmetros de partículas de 170 μ m. Já a estrutura dos solos com os fertilizantes de amônia, foi a *granic* e *granoidic* com um diâmetro de partícula médio de 70 μ m. Com a ureia o tamanho foi de 200 μ m com vazios maiores entre as partículas em comparação com os outros solos (Goh *et al.*, 1987).

Finalmente, a pesquisa desenvolvida por Pérez (2018), consistiu em avaliar os efeitos dos fertilizantes nas propriedades físicas de solos compondo um perfil de intemperismo tropical, mediante ensaios de sedimentação, limites de Atterberg, pH e imagens obtidas com lupa. Os resultados mostraram que a depender do tipo de solo, ou seja, composição mineralógica, nível de intemperização e tipo de estrutura, os fertilizantes utilizados geram maior ou menor desagregação. Os resultados de pH assim como as imagens obtidas com lupa, permitiram verificar os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação e as mudanças na textura dos solos. Por último os resultados dos limites de Atterberg mostraram uma diminuição nos valores das misturas com relação ao solo sem tratamento, indicando que para um mesmo teor de umidade, o solo está apresentando mudanças nas suas propriedades mecânicas, apontando para a redução da resistência (Grim, 1962).

Segundo o obtido por Goh *et al.* (1987) e Pérez (2018), foram observados que a ureia tende a gerar desagregação das partículas de argila e variações na textura do solo, ocorrendo em solos superficiais um incremento nos diâmetros dos grãos ou geração de grumos, isto mesmo que os solos apresentassem características físico-mineralógicas diferentes. Com respeito aos resultados de pH para o solo mais superficial e o mesmo fertilizante, estas duas pesquisas obtiveram resultados opostos, enquanto Pérez (2018) obteve um pequeno incremento do pH, Goh *et al.* (1987) obtiveram uma diminuição, esta diferença é relacionada ao solo utilizado por eles, no trabalho de Goh *et al.* (1987) o solo tem um 7% de matéria orgânica (MO), material que contribui com a acidificação dos solos, enquanto que o solo utilizado por Pérez

apresenta apenas um 0,8%; além disso há a ocorrência de processo de nitrificação da ureia, no qual acontece a liberação de H^+ (Campillo & Sadzawka, 2006), contribuindo também para a acidificação do solo. Cabe ressaltar que o tempo de exposição da ureia na pesquisa de Goh *et al.* (1987), foi de aproximadamente 5 anos, enquanto que na pesquisa de Pérez foi de 7 dias e, considerando que antes do processo de nitrificação, a ureia passa por um processo de hidrólises, no qual há a liberação de OH^- (Campillo & Sadzawka, 2006), é provável que o aumento no pH obtido por Perez se deva à reação dos OH^- com os H^+ disponíveis nesse momento no solo, diminuindo a atividade dos H^+ e gerando portanto essa pequena alcalinização.

Adicionalmente os resultados obtidos por Ezeokonkwo (2011) e Pérez (2018), observaram que o composto formado por Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK/SUC) tende a diminuir os valores dos limites de Atterberg, reduzindo a quantidade de água necessária para modificar o estado do solo, podendo aumentar a sua erodibilidade.

2.6. SUCCÃO NO SOLO

Em qualquer estudo de solos não saturados, a sucção é um dos principais fenômenos a ser considerado, já que ela intervém significativamente no comportamento mecânico, em função das variações de fatores que se apresentem tais como, a umidade, a porosidade, as condições climáticas e a química do meio.

A sucção corresponde à energia por unidade de volume de água, necessária para desprender a água retida ou adsorvida pelo solo (Lee & Wray, 1995). A sucção é expressa geralmente em unidades de pressão, como kPa, ou também na escala pF, a qual corresponde ao logaritmo decimal em base 10 da sucção em centímetros de coluna de água. Existem três tipos de sucções: matricial, osmótica e total. A primeira está relacionada com a matriz do solo, ou seja, com o tipo de partículas e o arranjo estrutural, e é expressa pela diferença entre a pressão de água e a pressão de ar nos poros ($u_a - u_w$). A sucção matricial resulta da somatória de duas parcelas, a primeira é a sucção capilar associada com o nível macroestrutural do solo, neste as partículas ficam ligadas entre elas dependendo do gradiente de pressão capilar exercido sobre a água que se encontra ao redor delas. A segunda parcela corresponde à sucção de absorção, relacionada ao nível microestrutural do solo, ou seja, a variação da umidade no interior e envolvendo as partículas (De Campos *et al.*, 1992, Fredlund & Rahardjo, 1993, Houston *et al.*, 1994, Marinho, 1997). A sucção osmótica (π), está relacionada à concentração de sais

dissolvidos na água, os quais geram uma diminuição da umidade relativa, e a necessidade de maior energia para remover uma molécula de água. Finalmente, a sucção total (ψ), está correspondente à somatória das duas sucções anteriores [$\psi = (u_a - u_w) + \pi$].

2.6.1. Curvas características de retenção de água no solo

A forma de relacionar a sucção à quantidade de água num solo é mediante a curva característica de retenção de água no solo, a qual representa como varia a sucção em função do teor de umidade gravimétrico (w) ou volumétrico (θ) ou do grau de saturação (S_r). Essas curvas podem apresentar diferentes formas segundo as características do solo (mineralogia, orientação das partículas, distribuição de poros, índice de vazios etc.), como por exemplo, as apresentadas na Figura 2.2 com a sucção em função do grau de saturação (S_r). Neste gráfico pF corresponde ao logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água.

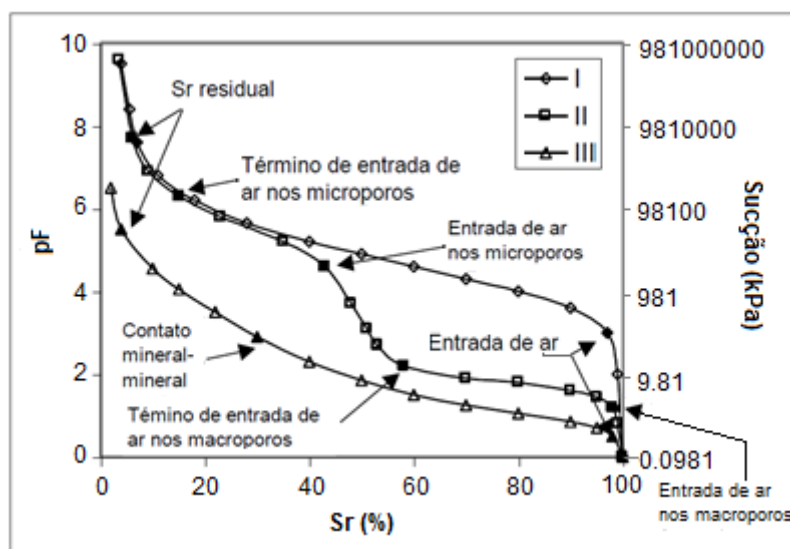


Figura 2.2. Tipos de curvas características solo-água. Modificada de Camapum de Carvalho & Leroueil (2004).

Para um melhor entendimento das análises que serão feitas no item de resultados, é mostrada na Figura 2.2 a distribuição das zonas de uma curva característica de retenção de água no solo. O formato dessa curva alterando a distribuição da sucção em função da umidade depende da distribuição dos poros e o nível de sucção para cada ponto depende principalmente da porosidade e da composição químico-mineralógica do solo.

No início da curva, independentemente do tipo de solo se tem a sucção residual que corresponde a umidade higroscópica de equilíbrio. Em seguida tem-se a zona de microporos que corresponde a valores de sucção elevados e que dependem do tamanho dos poros e/ou da

composição mineralógica do solo. No gráfico em escala logarítmica essa zona se horizontaliza apesar de muitas vezes estar ocorrendo variações significativas na sucção atuante ao longo do trecho. Sua extensão depende do volume desses poros sendo que nos solos agregados ela corresponde predominantemente aos microporos contidos nas agregações e nos solos pouco intemperizados ao volume de partículas mais ativas e/ou de menor dimensão.

A parte final da curva (Figura 2.2) correspondente à zona de macroporos está geralmente presente em solos contendo agregações como é o caso do solo laterítico estudado. Geralmente esta zona de macroporos se horizontaliza e apresenta valores de sucção abaixo de 10 kPa sendo esta horizontalidade função em especial da uniformidade dos macroporos presentes. Sua extensão depende do volume desses macroporos, extensão esta que diminui com o adensamento ou compactação do solo que também impactam nos valores da sucção. A zona compreendida entre os macroporos e microporos, aqui intitulada zona de mesoporos é geralmente linear e tem sua inclinação definida pela distribuição desses poros. Esse modelo descrito é geralmente intitulado bimodal por apresentar predominância de macroporos e de microporos que estabelecem dois patamares, no entanto, o material pode ser marcado por três ou mais patamares passando, por exemplo, a um modelo trimodal.

Segundo Camapum de Carvalho & Lerouil (2004), na Figura 2.2 a curva I corresponde à de um solo com uma distribuição de poros bem graduada, a curva II faz referência a um solo no qual a sua distribuição de poros é mal graduada ou de graduação aberta, e a III representa aqueles materiais que apresentam fluência com o incremento da sucção. Nesta figura as curvas 1 e 3 são consideradas unimodais e a 2 bimodal.

A inexistência de zonas marcadas pela predominância de micro e de macroporos leva a definição de curvas características de retenção de água no solo intituladas monomodais. Essas curvas apresentam o trecho intermediário mais ou menos inclinado a depender da graduação dos poros, sendo ela mais horizontalizada em solos uniformes e mais inclinada em solos com maior graduação nos poros. As sucções atuantes no solo dependerão das dimensões dos poros e da natureza químico-mineralógica que ele apresenta. No início da curva tem-se um trecho verticalizado limitado pela pressão de entrada de ar no solo que vai depender da porosidade e da natureza químico-mineralógica que ele apresenta, por exemplo a sucção correspondente ao limite superior desse trecho ampliará ao passar de uma areia grossa para uma areia fina, assim como ao passar de partículas de quartzo para partículas de caulinita e destas para partículas de montmorilonita.

Outras particularidades das formas das curvas características de retenção de água no solo existem como ilustrado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021).

Outro conceito importante, corresponde à curva de sucção transformada estabelecida por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), onde visam integrar na curva os aspectos físicos e químicos do solo, simplificando o estudo e a análise do comportamento dos solos não saturados. A transformação da curva característica de retenção de água no solo é realizada multiplicando-se a sucção em pF pelo índice de vazios (e), resultando numa curva única representativa de diferentes índices de vazios para a mesma distribuição de poros. Embora a curva resultante seja independente do índice de vazios, ela não contempla diferenças na distribuição dos poros, fato que não invalida a sua aplicação prática, por se trabalhar no campo com faixas específicas de umidade e peso específico nos solos compactados e por tender a baixa variação na distribuição de poros em uma camada de solo natural.

A curva característica de retenção de água no solo pode ser obtida mediante diferentes metodologias como apresentado na Tabela 2.3. Cabe ressaltar que na maioria das técnicas não se mede diretamente a sucção, se não parâmetros dependentes do conteúdo de água, o que faz necessárias as equações de calibração para o cálculo da sucção.

Tabela 2.3. Técnicas para medir a sucção nos solos (Marinho, 1997).

Técnica	Sucção Mátrica	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Psicrômetro		X	X	100 - 8000
Papel Filtro	X		X	0 - 29000
Tensiômetro	X		X	0 - 90 0 - >1000
Translação de eixos	X			0 - 1500
Condutividade térmica	X			0 - 400
Condutividade elétrica	X	X		20 - 1500

Nessa pesquisa o método para a obtenção da curva característica de retenção de água no solo foi o do papel filtro, por ser a técnica mais simples para quantificar tanto a sucção mátrica quanto a sucção total e não precisar de equipamentos especiais para sua execução. O princípio do método consiste em que um material poroso capaz de absorver água entra em equilíbrio com o solo uma vez terminada a transferência de água ou vapor de água entre os dois meios. Esse

equilíbrio representa, que tanto o papel filtro quanto o solo, apresentam o mesmo valor de sucção, mas cada um deles com umidades diferentes (Marinho, 2005). Apesar de ser esse método um dos mais simples, a falta de cuidados na execução de cada um dos passos do ensaio, pode gerar erros significativos nos resultados, além disso, o método pode não ser tão preciso para valores muito baixos (próximo à saturação) e muito altos (abaixo da umidade higroscópica) de sucção. Segundo a norma do ensaio, o tempo mínimo para atingir o equilíbrio do sistema papel – solo devidamente isolado do meio ambiente é de 7 dias. Leong *et al.* (2002) mostrou que esse tempo vai depender por exemplo, de como ocorre o contato solo-papel e do nível de sucção a ser medido. O tempo de equilíbrio adotado nessa pesquisa foi de 15 dias, isto considerando estudos feitos anteriormente com o mesmo tipo de solo (Valencia, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as características dos solos utilizados e os procedimentos seguidos em cada um dos ensaios desenvolvidos para avaliar o efeito dos fertilizantes no comportamento desses solos.

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para a execução dos diferentes ensaios de laboratório desenvolvidos nesta pesquisa, foram extraídas amostras de solo deformado compondo um perfil de intemperismo tropical, do campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG) da Universidade de Brasília (UnB). A posição geográfica do campo experimental é definida pelas coordenadas 15°45'56" de latitude sul e 47°52'20" de longitude oeste.

Guimarães (2002), fez uma divisão deste perfil de solo em três horizontes:

- O primeiro horizonte distribuído de 0 m a 3,5 m, se encontra uma camada areno-argilo siltosa com alto índice de vazios variando entre 1,27 e 1,6, peso específico em torno de 26,5 kN/m³ e índice de plasticidade de 10, caracterizada pela presença de macroporos e agregações das partículas. Entre os componentes mineralógicos desta camada se destaca a predominância da gibbsita, seguido do argilomineral do tipo caulinita, o mineral quartzo e os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio.

- O segundo horizonte se distribui entre os 3,5 m e os 8,5 metros de profundidade apresentando um peso específico e índice de plasticidade similar aos da camada anterior, mas o índice de vazios é menor, mudando entre 1,27 e 0,89. Nessa camada a partir dos 8 m de profundidade se considera como zona de transição, onde tem-se um aumento do peso específico devido provavelmente ao desaparecimento da gibbsita enquanto o teor hematita é mantido.

- O terceiro horizonte corresponde a camada a partir dos 8,5 metros de profundidade no qual há um solo residual mais jovem com uma camada de silte que apresenta índice de vazios, peso específico e índice de plasticidade maior quando comparado a 8 metros. Esse solo apresenta uma estrutura com distribuição de poros mais homogênea e não aparece mais o argilomineral gibbsita.

Assim, com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes produtos agrícolas em solos apresentando diferentes composições mineralógicas, químicas e tipos de estrutura, foram

utilizados um solo laterítico obtido a 1 m de profundidade, um solo de transição coletado a 9 m de profundidade e um solo saprolítico obtido a 11 m de profundidade. A caracterização físico-química e mineralógica dos solos sem tratamento e com as diferentes misturas, foi feita por Perez (2018) em sua dissertação de mestrado sendo que no âmbito desta tese serão apresentados apenas os resultados complementares.

Cabe ressaltar que o solo laterítico misturado com diferentes produtos agrícolas foi o mais estudado, isto considerando que são estes os que estão geralmente mais expostos aos fertilizantes. O estudo dos outros solos (transição e saprolítico), foi feito apenas usando alguns tipos de ensaios e condicionados à quantidade de solo disponível.

Pérez (2018) obteve que com o incremento do teor utilizado se apresentava um maior efeito dos insumos minerais nas propriedades físicas dos solos avaliados, sendo 10% o máximo teor avaliado pela autora. Considerando esses resultados e com o objetivo de visualizar o melhor possível o efeito dos diferentes produtos químicos nos solos estudados nesta pesquisa, se utilizou o teor de 10% em relação ao peso úmido da amostra de solo. Os diferentes solos foram analisados no estado natural e misturados com os seguintes insumos minerais:

- Calcário dolomítico: ele é o mais utilizado para diminuir a acidez do solo, têm uma solubilidade em água menor que 0,3 g/L, por essa razão a reação do calcário com o solo depende do contato entre as partículas de calcário e os ácidos do solo, e de aspectos como o tamanho das partículas (Queiroz & Boeira, 2006).
- Cloreto de potássio (KCl): é um fertilizante muito solúvel em água, com solubilidade de 340 g/L, e bastante usado mundialmente, sendo que cerca de 90% da produção mundial de potássio é na forma de cloreto de potássio (IPNI, 2017).
- Ureia ((NH₂)₂CO): é o fertilizante nitrogenado mais utilizado no mundo, com uma solubilidade em água de 1 g/L, a qual aumenta com a temperatura. Também apresenta dipolaridade, partículas com cargas opostas de igual magnitude, assim como higroscopicidade, absorção de água da atmosfera, onde a quantidade de água absorvida aumenta com o incremento da umidade relativa do ambiente (Alcarde *et al.*, 1992). No Brasil, o consumo projetado para o ano 2021, foi de 8 milhões de toneladas (IFA, 2020).
- Superfosfato Simples: foi o primeiro fertilizante fabricado industrialmente no mundo, é pouco solúvel em água e seu consumo estimado para 2021 foi de 6 milhões de toneladas (IFA, 2020).

- SUC: corresponde à mistura do Super simples (fosfato acidulado), ureia (nitrogênio) e cloreto de potássio, os quais são elementos que compõem um dos principais fertilizantes utilizados no Brasil conhecido como NPK (Nitrogênio, Fosforo e Potássio).

Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) a demanda dos insumos minerais em toneladas de produto no Brasil, passou de 40.564.138 em 2020 a 45.855.071 em 2021, com um acréscimo significativo tanto na produção interna quanto na importação.

Cabe destacar que o teor utilizado dos diferentes produtos químicos nas misturas com os solos foi nesse estudo alto se comparado com o usualmente utilizado nas atividades agrícolas. O motivo pelo qual decidiu-se utilizar o teor elevado, foi potencializar o seu efeito nos diferentes tipos de solos estudados e também pensando nas possíveis acumulações que podem ocorrer no solo com o tempo.

Todos os produtos químicos foram moídos manualmente até atingir um tamanho inferior a 0,149 mm, ou seja, passar na peneira com malha número 100 de modo a aumentar a superfície específica, para facilitar a sua solubilização e interação com as partículas de solo contribuindo assim para a aceleração das reações.

Outro aspecto importante é a secagem prévia dos solos, neste processo os solos podem apresentar microfissuras e/ou ficar mais suscetíveis à quebra, devido a dois fatores: 1) durante a extração da água que se encontra no exterior (macroporosidade) e no interior dos agregados (microporosidade), o aumento da sucção pode gerar contração diferenciada induzindo o surgimento de fissuras e trincas no solo; 2) sendo o solo e os próprios agregados compostos por minerais com diferentes índices de dilatação térmica, a secagem por acréscimo de temperatura pode induzir o aparecimento de fissuras e trincas (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015). Diante disso, optou-se por realizar as misturas com os insumos minerais assim como os diferentes ensaios, usando o solo na sua condição natural. Outro aspecto que levou à adoção desse procedimento foi o fato de que em campo, a incorporação dos insumos minerais aos solos se dá com estes em condições naturais de umidade, e a secagem do solo conduz as agregações e microagregações a se desidratarem, proporcionando assim condições distintas de interação da química dos insumos com as partículas que compõem o interior dos agregados.

3.2. AVALIAÇÕES QUÍMICAS

Com o objetivo de avaliar como o fator externo clima intervém nas reações químicas e migração de elementos e compostos químicos que compõem os insumos minerais incorporados ao solo, foram enterrados 200 g tanto de um solo laterítico com e sem misturas quanto com um solo de transição com e sem misturas, ambos oriundos do mesmo perfil de intemperismo. O objetivo de utilizar esses dois solos, foi avaliar as diferenças que gera nas eventuais mudanças de composição química o nível de intemperização e composição mineralógica de cada um deles. Destaca-se a adoção da mesma condição de contorno para todas as amostras, um solo tropical profundamente intemperizado presente no local de coleta das amostras para o estudo. As amostras tanto dos solos sem tratamento quanto das respectivas misturas, foram colocadas individualmente e no interior de um tecido permeável tipo tule (ver Figura 3.1a), em poços com profundidade igual a 50 cm e espaçados 1 m entre si como mostrado na Figura 3.1b. As amostras ficaram enterradas por um ano. Após este período retirou-se as amostras e determinou-se a composição química, o pH, condutividade elétrica e a distribuição granulométrica das mesmas seguindo para este último ensaio a norma NBR 7181 (ABNT, 2016).

Para auxiliar nas análises, foi determinada a composição química das amostras de solo laterítico obtidas dos corpos de prova que foram utilizados no ensaio de determinação da sucção pela técnica do papel filtro, os quais foram embalados com papel filme e armazenados em caixa de isopor em condições de laboratório pelo período de 3 anos. Estas análises químicas foram feitas para serem comparadas com os resultados obtidos para as amostras que ficaram enterradas em campo durante um ano e assim avaliar melhor o efeito do clima nas reações e migrações. Todas as análises químicas apresentadas nesta tese foram desenvolvidas por laboratório especializado e complementam aqueles realizados por Pérez (2018).

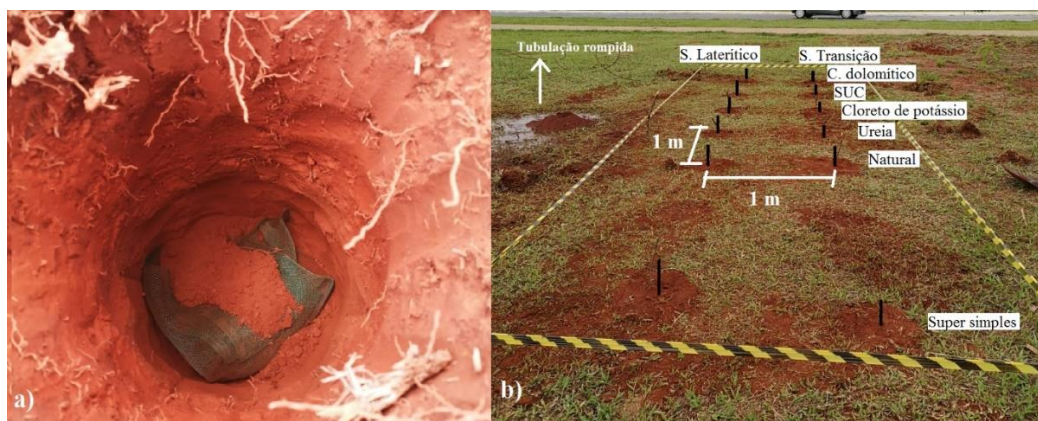


Figura 3.1. a) amostra de solo no interior do saco poroso sendo enterrada; b) distribuição das amostras enterradas.

3.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS INSUMOS NA ESTRUTURA DOS SOLOS

3.3.1. Curva característica de retenção de água no solo

Perez (2018) mostrou, mediante imagens obtidas com lupa, que as misturas dos solos com os diferentes produtos agrícolas, geravam agregações de partículas. Para conhecer se esses grumos se formaram pela sucção/coesão entre os insumos e o solo, ou se efetivamente foi produto da união de partículas menores oriundas da desagregação, o qual estaria alterando a estrutura original do solo, foram feitas as curvas características de retenção de água no solo tanto para os solos naturais laterítico e saprolítico, quanto para as misturas com os fertilizantes e com o regulador de acidez anteriormente mencionados. Os ensaios foram realizados seguindo a norma americana ASTM D5298 (2016) para determinação da curva característica de retenção de água no solo pelo método do papel filtro. Por meio de análises comparativas estes ensaios serviram também para se avaliar o impacto dos insumos na sucção do solo.

O papel filtro utilizado foi da marca Quanty e segundo a calibração feita por Borges *et al.* (2010) para este papel, as equações para a obtenção dos valores de sucção a partir de suas respectivas umidades são:

$$\text{Sucção (kPa)} = e^{[161,44-w]/24,07}, \text{ para } w > 55\% \quad (3.1)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = e^{[79,782-w]/6,26}, \text{ para } w \leq 55\% \quad (3.2)$$

Para a execução do ensaio, foram preparados 14 corpos de prova para cada uma das curvas características de retenção de água no solo determinadas. Esses 14 pontos representam a variação do grau de saturação entre 5% e 100%. Para esse ensaio o solo foi compactado dinamicamente na sua umidade natural (18,5%) fazendo uso do compactador adotado na metodologia MCV e aplicando-se 6 golpes com o soquete pequeno (Peso = 2270 gf), formando corpos cilíndricos de aproximadamente 2,5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, com índice de vazios inicial médio igual a 0,7 para o solo laterítico e 0,8 para o solo saprolítico. Essas dimensões foram adotadas com o objetivo de os corpos de prova serem submetidos posteriormente a compressão diametral, para a obtenção da resistência à tração. No caso das misturas, as compactações foram realizadas logo após a homogeneização com os aditivos químicos de modo a limitar as trocas iônicas imediatas passíveis de intervirem na própria compactação. Para obter a altura anteriormente mencionada, foram necessários

aproximadamente 100 g de solo na umidade natural e a essa quantidade de solo foi adicionado 10% em peso para cada insumo utilizado.

Inicialmente foram projetados dois procedimentos de preparação das amostras para compactação dos corpos de prova, um deles misturando o produto químico diretamente com o solo e um outro fazendo a dissolução previa do fertilizante na água, isto com o objetivo de determinar se o procedimento adotado afetava a curva característica de retenção de água no solo. Para desenvolver esses dois mecanismos, foram utilizados os insumos minerais calcário dolomítico e ureia, misturados ao solo laterítico. O procedimento do método no qual o insumo foi dissolvido na água foi o seguinte: inicialmente a amostra que se encontrava na umidade natural, foi exposta ao ar até apresentar uma perda de umidade de aproximadamente 1%, perda que foi controlada pelo peso do material. Concluída esta etapa, o agente químico foi misturado na quantidade de água que se evaporou do solo durante a secagem, até conseguir a maior dissolução possível. Posteriormente essa solução foi adicionada ao solo e se misturou até obter uma amostra visualmente homogênea, para depois realizar a compactação dinâmica.

Os resultados desse teste são mostrados na Figura 3.2, na qual se observa que a diferença entre os dois procedimentos de preparação da amostra, varia segundo o aditivo químico usado, sendo nesse caso mais significativa na mistura solo-ureia (b e d). Analisados os resultados por meio da relação $e.pF \times Sr$ (Figura 3.2c e d) verifica-se que as tendências se mantêm, ou seja, não se trata de uma influência da compactação nos resultados.

Os resultados indicam que a dissolução do fertilizante, tende a gerar uma diminuição dos valores de sucção mátrica e portanto, em princípio, da resistência, comportamento atribuído a uma aceleração das reações com o produto quando do contato prévio com a água, sendo esta dedução corroborada qualitativamente pela Figura 3.3, que indica que a dissolução prévia da ureia na água, tende a gerar uma maior área de cobertura e maiores comprimentos dos filamentos de cristalização, 10 dias após os corpos de prova terem sido compactados.

Segundo o exposto, as demais amostras para os ensaios de sucção, foram preparadas aplicando-se a técnica de dissolução do produto químico.

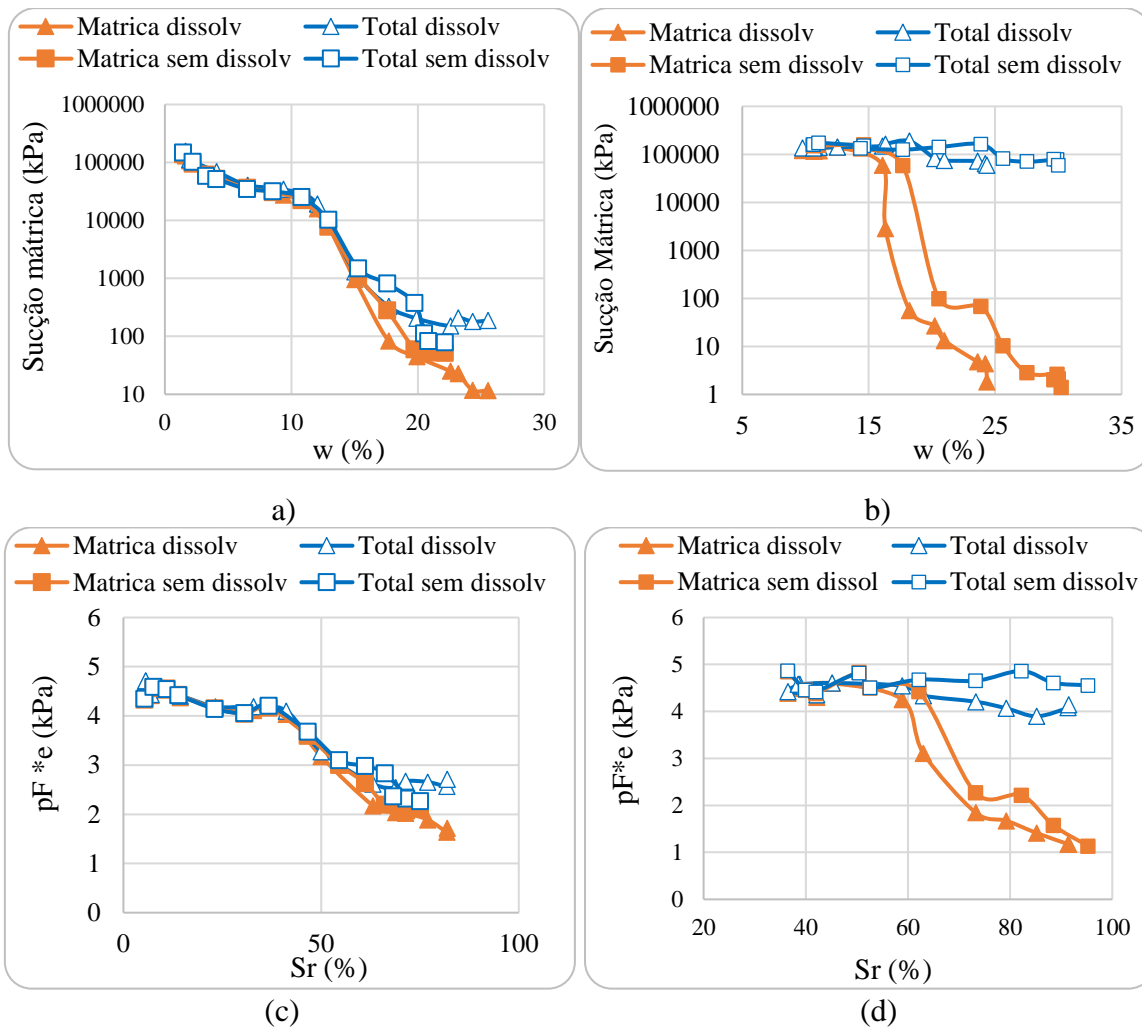


Figura 3.2. Resultados do teste dos dois mecanismos de preparação da amostra para as misturas do solo laterítico com o calcáreo dolomítico (a e c) e com a ureia (b e d).

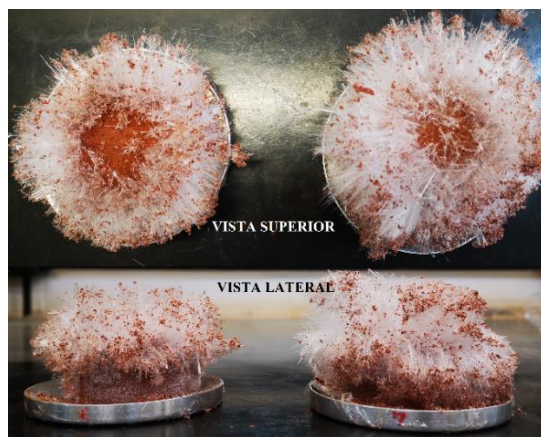


Figura 3.3. À direita corpo de prova com a ureia dissolvida previamente em água e à esquerda com a ureia sem dissolver, 10 dias após serem compactados.

Uma vez compactados todos os pontos de cada curva na umidade natural do solo, o controle do grau de saturação foi feito pelo peso do corpo de prova, de modo determinar se era

necessário adicionar água ou, ao contrário, deixar secar ao ar. Quando os corpos apresentavam a porcentagem de saturação correspondente à pré-definida, iniciava-se o processo de montagem do ensaio segundo a norma. Nesse caso decidiu-se determinar para o mesmo corpo de prova, tanto a sucção mátrica quanto a sucção total, fazendo a montagem tal como mostrado na Figura 3.4. Terminada a montagem, os corpos de prova foram colocados no interior de uma caixa de isopor para evitar ao máximo variações de temperatura e umidade externas às capsulas. Feito isso, a caixa era mantida na câmara úmida durante um período de 15 dias para garantir que o conjunto solo-papel filtro atingisse o equilíbrio. Esse tempo de equilíbrio foi o mesmo adotado por outros autores (Delgado (2002); Valencia (2009); Aguiar (2014)).

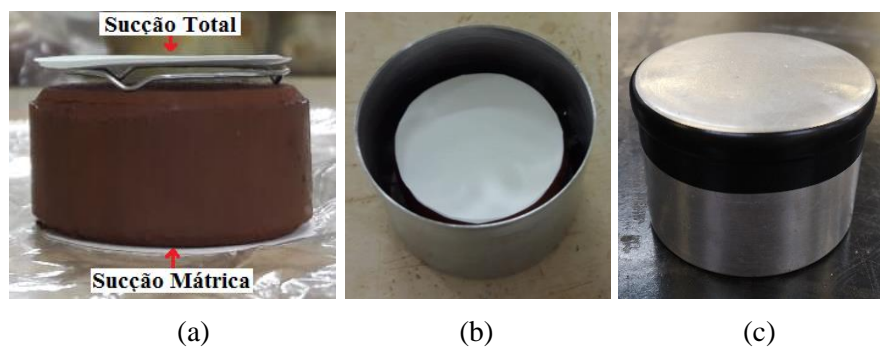


Figura 3.4. a) Montagem dos papéis filtro no corpo de prova, b) montagem no interior da capsula c) capsula vedada

A realização desse ensaio faz-se relevante nessa pesquisa porque permite conhecer, baseados nas curvas características de retenção de água no solo, se os diferentes aditivos químicos geram mudanças na estrutura dos corpos de prova compactados, mudanças que se refletem no nível de sucção do solo para um determinado grau de saturação e portanto, na sua resistência. A determinação das sucções total e matricial permitem estimar a sucção osmótica possibilitando averiguar a sua influência no comportamento mecânico dos solos.

3.3.2. Análise visual com Lupa

Os solos tropicais profundamente intemperizados estão caracterizados por apresentar partículas agregadas e com difícil orientação, ao contrário dos solos pouco intemperizados e daqueles presentes em regiões de clima temperado e frio onde as partículas são independentes, ou seja, é rara a presença de agregações (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015). Portanto, nos solos tropicais, faz-se difícil a análise de uma partícula isolada, devendo-se analisar a estrutura em geral ou aquelas agregações presentes nos solos, já que uma vez misturados com substâncias químicas, estas estruturas podem sofrer variações.

Mediante o uso de uma lupa eletrônica manual da marca AVANTSCOPE, foram obtidas as imagens das estruturas dos 14 corpos de prova que formam as curvas características de retenção de água no solo de cada uma das misturas solo-fertilizante. As imagens foram obtidas para aumentos de 100 vezes e 200 vezes.

3.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Devido ao baixo aumento que a lupa eletrônica pode gerar, pequenos detalhes da estrutura do solo não foram detectados pela análise com a lupa, deste modo, foi realizada a obtenção de imagens com aumento de até 2.000 vezes, por outra metodologia. Estas imagens foram obtidas mediante o uso de um microscópio eletrônico de Varredura (MEV) da marca QUANTA 450, pertencente ao laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília.

Este equipamento é dotado de diferentes sensores entre eles o EBSD o qual corresponde a uma difração de elétrons retroespalhados para criação de mapas de orientação cristalográfica. Para obter uma melhor qualidade das imagens o ensaio foi executado a alto vácuo e as amostras foram metalizadas com impregnação de ouro. O processo de metalização foi feito no laboratório do Instituto de Biologia.

Esse ensaio foi executado apenas para amostras de solo laterítico. O solo saprolítico mostrou-se muito quebradiço após secagem e processo de metalização, o que impediu a sua análise por meio do MEV a alto vácuo. As amostras utilizadas foram obtidas dos corpos compactados utilizados no ensaio de curva característica de retenção de água no solo e ficaram expostas aos produtos químicos durante aproximadamente, 1 ano.

3.3.4. Microtomografia computadorizada (microCT)

O ensaio de microtomografia computadorizada foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas (LPFR) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. O equipamento utilizado foi o Microtomógrafo SkyScan 1172 da Bruker.

Para obter os corpos de prova (CP) utilizados nesse ensaio, aproximadamente 67,2 g de material na umidade natural, foram compactadas estaticamente a uma velocidade de 0,021 mm/s com uma prensa digital de CBR/MARSHALL da marca SOLOTEST, obtendo CP com 2,5 cm de altura por 5 cm de diâmetro. A massa utilizada foi calculada considerando a densidade de campo ($1,37 \text{ g/cm}^3$). Uma vez compactados, foram embalados com papel filme e colocados

em uma caixa de isopor por um período de aproximadamente 8 meses, tempo de cura que foi condicionado à disponibilidade de uso do equipamento. Passado esse tempo foram talhados até atingir um diâmetro igual a 1,7 cm, diâmetro necessário para entrar no suporte utilizado no equipamento de microCT. Para descontar os efeitos de borda, a aquisição dos dados foi feita numa região de interesse (ROI) de 1,6 cm x 1,4 cm conforme a Figura 3.5.

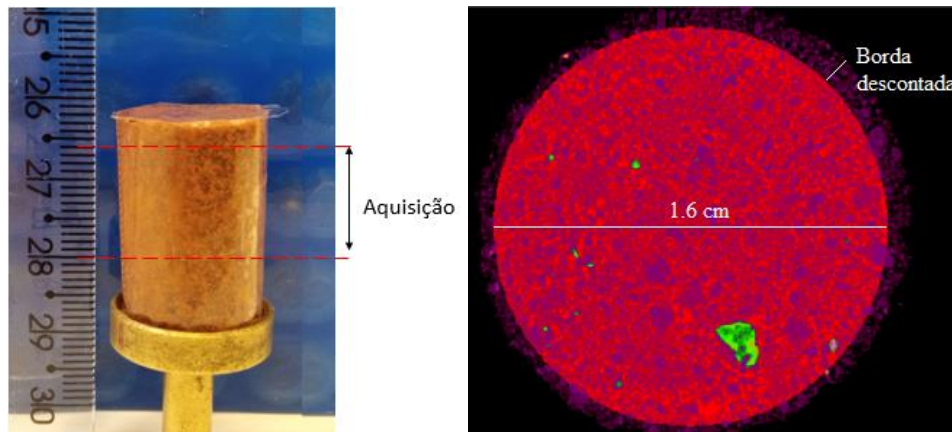


Figura 3.5. Corpo de prova para ensaio de microtomografia. (a) amostra na base do equipamento indicando altura de interesse; (b) diâmetro de interesse.

Devido ao custo de execução, este ensaio foi feito apenas para o solo laterítico sem tratamento e as misturas com os fertilizantes Super simples, ureia e cloreto de potássio.

Cabe lembrar que devido a que este ensaio fornece informação da estrutura interna dos CP, se decidiu compactar as amostras estaticamente para representar melhor a densidade de campo, fato que dificilmente se conseguiria com a compactação dinâmica.

3.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS INSUMOS NO COMPORTAMENTO DOS SOLOS

Quando o solo apresenta baixa plasticidade ou é submetido a mudanças na sucção, seja pela variação das condições atmosféricas ou por atividades antrópicas, podem ser geradas trincas que contribuem, tanto na formação de planos de ruptura quanto no aumento da água infiltrada, o que pode gerar uma queda na resistência do solo. Cabe destacar que o solo pode ainda sofrer contração sem que surjam trincas o que conduz à redução da taxa de infiltração. Nas atividades agrícolas a céu aberto, o solo pode apresentar ambos os tipos de fenômeno a depender do solo e do nível de variação da umidade.

Com o objetivo de avaliar se os insumos minerais poderiam contribuir na formação de microfissuras, ou se geram mudanças na estrutura do solo de tal forma que afetariam o seu comportamento mecânico, foram feitos os ensaios constantes dos subitens a seguir.

3.4.1. Resistência à tração por compressão diametral (σ_t)

Para obter a resistência à tração do solo (σ_t) é aplicada uma carga de compressão diametral ao longo do eixo central como mostrado na Figura 3.6.

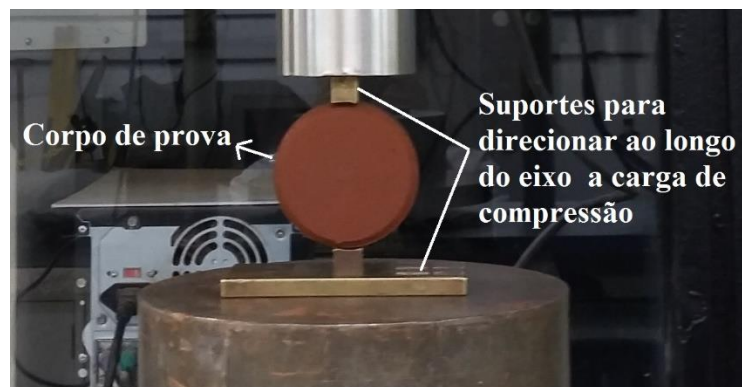


Figura 3.6. Montagem do ensaio de tração indireta

Segundo Carneiro & Barcellos (1953) o cálculo da tensão de tração se faz por meio da equação:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi h D} \quad (3.3)$$

onde:

D: diâmetro do corpo de prova (cm)

h: espessura do corpo de prova (cm)

F: carga aplicada (N)

Para a execução desse ensaio foram utilizados os corpos de prova com os quais se determinaram as curvas de retenção de água no solo. Para aplicar a tensão normal ao longo do eixo do corpo de prova, se utilizou uma prensa digital CBR/MARSHALL da marca SOLOTEST, utilizando-se uma velocidade constante de 0,021 mm/s. Uma vez rompido diametralmente o corpo, uma metade foi utilizada para determinar a umidade e com a outra metade se determinou a massa específica mediante o método da balança hidrostática seguindo a norma NBR MB-2887 (ABNT, 1988)

3.4.2. Resistência à compressão simples

Para determinar a resistência à compressão simples das misturas, foram compactados pelo método dinâmico e na umidade natural (18,5%), dois corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para cada mistura avaliada, com o objetivo de verificar a repetibilidade dos resultados. A compactação foi feita em 4 camadas, aplicando em cada uma delas, 4 golpes com o soquete leve utilizado na compactação mini MCV. No topo dos corpos de prova foram implantados os papéis filtro para determinação da sucção mátrica e em seguida eles foram embalados e colocados numa caixa de isopor por 15 dias para evitar ao máximo a perda de umidade. Atingido o tempo de equilíbrio retirou-se os papéis filtro, determinou-se a sucção e realizou-se os ensaios de compressão simples a uma velocidade constante do pistão de 0,021 mm/s. Usou-se nos ensaios uma prensa digital de CBR/Marshall da marca SOLOTEST. A norma utilizada para a execução deste ensaio foi a NBR 12770 (ABNT, 1992).

3.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico estimado (E_d)

Um ensaio menos usual nos estudos do comportamento mecânico dos solos é o de ultrassom. Esse é um ensaio simples e rápido que permite determinar de modo estimativo o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) das diferentes misturas. Para a realização dos ensaios foram compactados estaticamente dois corpos de prova de 5 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura considerando-se a densidade e umidade de campo. Após compactados, foram embalados com papel filme e colocados ao interior de uma caixa de isopor por um período de 15 dias. Uma vez completado o tempo de cura, foi executado o ensaio utilizando o equipamento Ultrasonic Tester E46 da marca Controls com uma tensão de emissão de 2,5 kV. Mediante um emissor e um receptor de ondas longitudinais instalados nos extremos do corpo de prova, após ter sido colocado gel condutor em suas duas faces (Figura 3.7), o equipamento faz passar uma onda primária (v_p) ao longo dele e registra o tempo desse percurso em microssegundos (μs) (Silva *et al.* 2019). Esse tempo conjuntamente com a altura do corpo de prova (L), permitem determinar a v_p e com ela estimar o E_d mediante a equação:

$$E_d = \rho * v_p^2 \quad (3.4)$$

onde ρ corresponde à densidade do corpo de prova em kg/m^3 .

Cabe ressaltar que esse parâmetro no presente estudo vai permitir fazer comparações com respeito à rigidez dos corpos constituídos por solo submetido a ação de diferentes compostos químicos a ele adicionados. Destaca-se que para o cálculo mais exato do módulo de elasticidade

faz-se necessário o valor da onda secundária (v_s), a qual não é fornecida pelo equipamento utilizado.

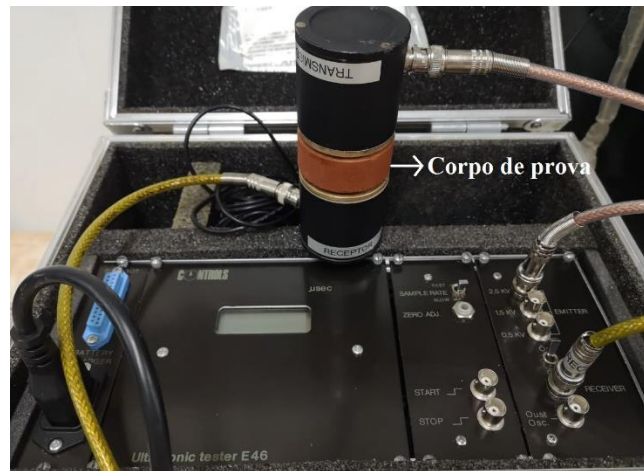


Figura 3.7. Ultrasonic Tester E46 da marca Controls

3.4.4. Resistência ao cisalhamento

Este ensaio foi realizado objetivando determinar os parâmetros de resistência, coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ'), do solo laterítico natural e das misturas feitas com os diferentes insumos minerais estudados nesta pesquisa. Os ensaios foram executados no laboratório de geotecnia da UnB, com um equipamento da marca ELE e seguindo a norma americana ASTM D3080 (2004).

A preparação das amostras consistiu em compactar estaticamente corpos de prova quadrados de 10 cm de lado por 2 cm de altura. Uma vez compactados os corpos de prova foram colocados individualmente em sacos plásticos e armazenados no interior de caixas de isopor para evitar ao máximo a perda de umidade. Atendido o tempo de cura de 15 dias, foram talhados até ficar com os lados com comprimento igual a 6 cm correspondentes às dimensões da caixa de cisalhamento. Uma vez feita a montagem no equipamento de cisalhamento, foi aplicada uma tensão normal até a estabilização das deformações verticais (término da consolidação primária). Posteriormente foi preenchida a caixa de cisalhamento com água destilada por 24 horas inundando-se assim o solo. Após esse período de tempo prosseguiu-se com o cisalhamento da amostra a uma velocidade de 0,05 mm/min. As tensões normais aplicadas para obtenção da envoltória de resistência, foram de 50, 100 e 200 kPa.

3.4.5. Ensaio duplo edométrico

O ensaio duplo edométrico foi executado para estimar o potencial de colapso a qualquer nível de tensão e avaliar se a compressibilidade do solo laterítico mudava quando se mistura com os diferentes insumos minerais estudados. A metodologia empregada para a execução dos ensaios de adensamento está descrita na norma NBR 16853 (ABNT, 2020). Para determinar o potencial de colapso que ocorrerá ao aplicar qualquer nível de tensão, se utilizaram diferentes metodologias. Essas metodologias são a original proposta por Vargas (1977) tendo como referência a porosidade inicial, ou seja, o solo se submeteu diretamente àquela tensão, a metodologia proposta por Jennings e Knight (1957) apud Maia (2005), onde se avalia o solo na condição natural e inundada e finalmente a proposta feita por Camapum de Carvalho *et al.* (2009).

Fazendo uso da equação (3.5) foi determinado o potencial de colapso mediante a metodologia proposta por Jennings e Knight (1957).

$$i = \left[\frac{\Delta e_c}{1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{0\ nat}} \right) * e_{0\ médio}} \right] \quad (3.5)$$

em que: $\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{0\ nat}} \right) - \left(\frac{e_{inundado}}{e_{0\ inundado}} \right) \right] * e_{0\ médio}$; $e_{0\ médio} = \frac{e_{0\ nat} + e_{0\ inundado}}{2}$

onde:

e_{nat} e e_{inund} = índice de vazios final do solo para uma determinada tensão aplicada (ensaio na umidade natural e inundado, respectivamente);

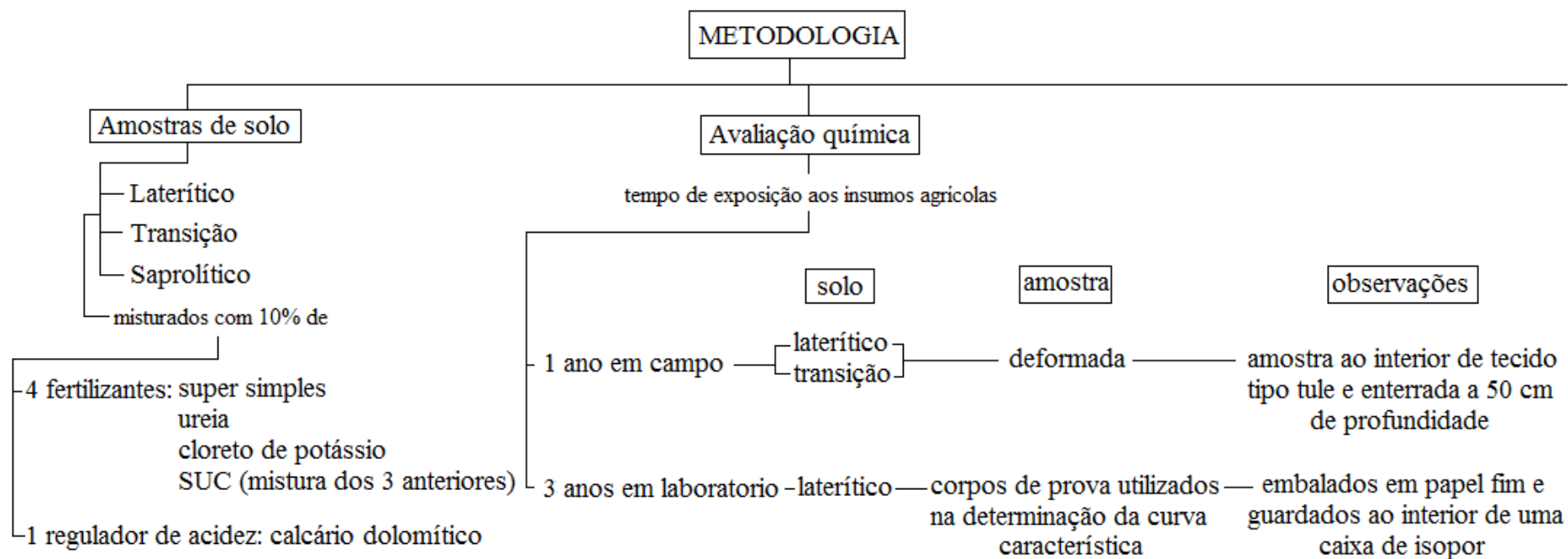
e_{0nat} e e_{0inund} = índice de vazios inicial do solo para o ensaio na umidade natural e inundado respectivamente.

Durante a execução do ensaio, para evitar a perda de umidade dos corpos de prova que não iam ser inundados, as células de adensamento foram cobertas com plástico transparente fixado com um anel de vedação. Os estágios de tensão adotados para o solo na condição saturada foram 11, 41, 87, 158, 323 e 698 kPa e para o solo na condição não saturada foram 9, 41, 86, 155, 325 e 689.

O procedimento de preparação de amostras consistiu em compactar estaticamente uma amostra de 10 cm de lado por 1.9 cm de altura, isto considerando a umidade e densidade de campo. Para evitar a perda de umidade do corpo de prova compactado durante os 15 dias de cura, este foi colocado ao interior de um saco plástico e deixado numa caixa de isopor. Atingido

esse tempo, foi talhado o corpo de prova de 7.5 cm de diâmetro por 1.9 cm de altura e colocado no anel de adensamento para a realização do ensaio. A determinação da sucção por meio da pesagem do papel filtro também foi realizada. Os ensaios foram executados na prensa manual de adensamento do laboratório de pós-graduação em geotecnia da UnB.

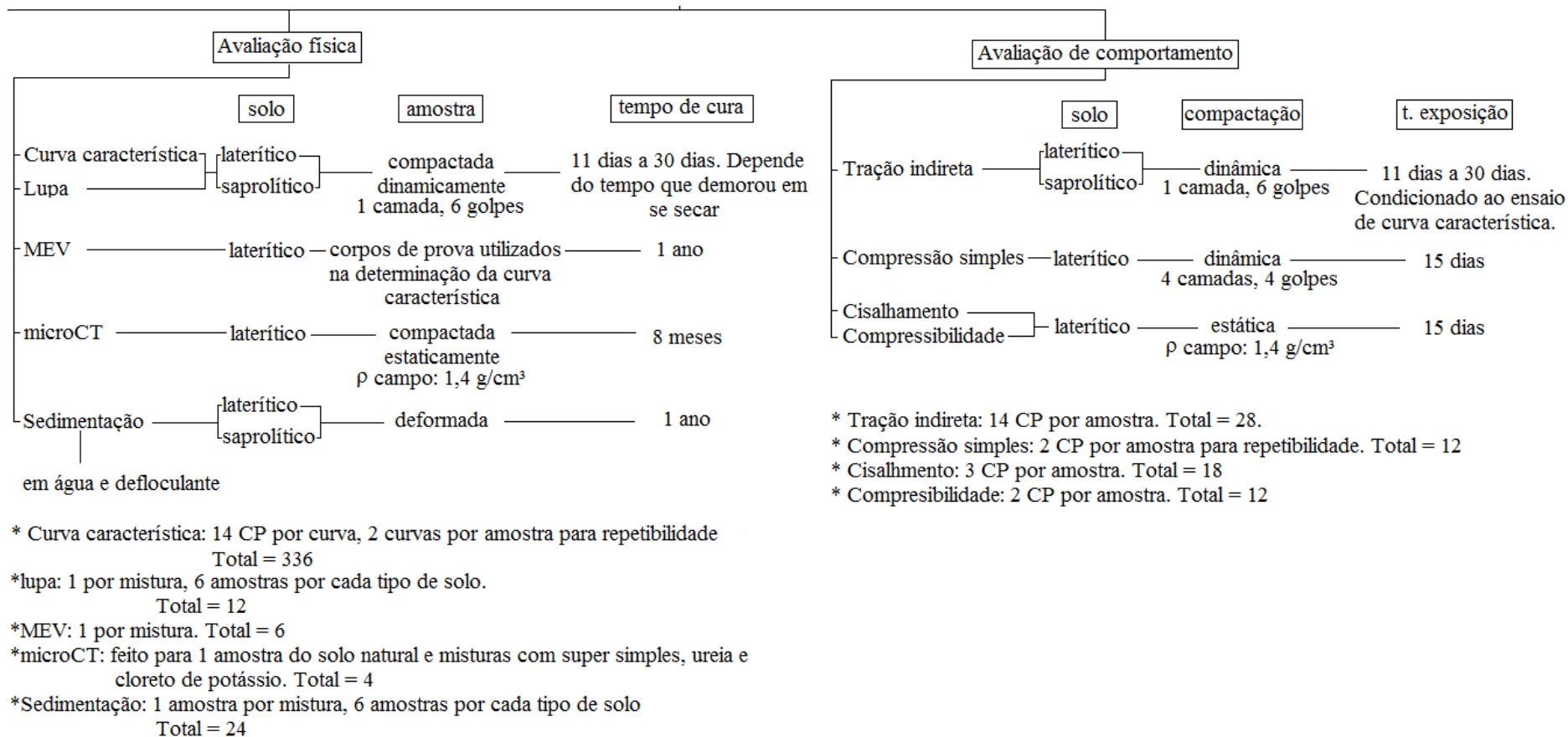
A Figura 3.8 apresenta o fluxograma que amostra de modo resumido a metodologia desenvolvida nesta pesquisa.



*Total amostras do campo: 12, 6 para cada tipo de solo

*Total amostras do laboratório: 6

(a)



(b)

Figura 3.8 Fluxograma mostrando a metodologia desenvolvida para a avaliação química (a) e as avaliações física e de comportamento (b).

Nota: Cabe ressaltar que quando uma curva ou ponto fugia da tendência, o ensaio correspondente era refeito. Estas repetições não foram consideradas nas quantidades previamente descritas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. AVALIAÇÕES DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS

Pérez (2018) apresenta a caracterização química obtida para as amostras em estado natural coletadas a 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 9 m e 11 m de profundidade no mesmo perfil de intemperismo. Tanto aqueles resultados como os agora apresentados foram determinados por um laboratório especializado.

Para analisar o impacto dos insumos nas propriedades químicas do solo laterítico optou-se por realizar os ensaios em material mantido em condições de cura no laboratório pelo período de 3 anos e em campo pelo período de 1 ano.

A Tabela 4.1 apresenta a composição química das diferentes misturas com tempo de exposição de 3 anos no laboratório, incluindo-se nessa tabela os resultados obtidos por Pérez (2018) para o solo natural.

Tabela 4.1. Composição química do solo laterítico (L) e misturas, com tempo de exposição de 3 anos no laboratório.

Composição Química	Unidades	Pérez (2018) natural	Lab. 3 anos natural	L+ dolomít	L+SS	L+ureia	L+ cloreto	L+SUC
Fosforo (P)	mg/dm ³	2,6	1,2	0,3	14,7	1,5	1	3,4
Cálcio (Ca)	cmolc dm ⁻³	0,6	2,1	4,6	7,9	2,3	6	15,6
Magnésio (Mg)	cmolc dm ⁻³	0,1	0,3	0,4	2,8	0,2	0,4	1,1
Potássio (K)	cmolc dm ⁻³	0,55	0,01	6,29	1,85	2,78	116,5	65,6
Sódio (Na)	cmolc dm ⁻³	0,06	0,01	0,14	0,59	0,3	7	2
Alumínio (Al)	cmolc dm ⁻³	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Acidez (H+Al)	cmolc dm ⁻³	2,5	1,5	1,5	3,2	2	1,9	3,7
Soma das bases (V%)	cmolc dm ⁻³	1,3	2,4	11,4	84,2	5,6	129,9	84,2
CTC	cmolc dm ⁻³	3,8	3,9	12,9	87,4	7,6	131,8	87,9
Saturação por bases	%	34	62	89	96	73	99	96
Saturação por Al	%	7	4	2	0	2	0	0
Saturação por Na	%	5	0	1	1	5	5	2
Carbono Orgânico	g/kg	5,1	2	5,1	4,7	5,6	4,1	5,4
Matéria Orgânica (MO)	g/kg	8,8	3,4	8,8	8,1	9,6	7,1	9,3
pH em H ₂ O		6,2	6	8	6,4	7,3	6,6	5,7
pH em KCl		5,9	5,5	6,9	5,4	6,9	5,4	6,7
ΔpH		-0,3	-0,6	-1,1	-1,0	-0,4	-1,2	1,0

Nos resultados apresentados se observa que a mistura com o cloreto é a que apresenta os maiores valores de CTC e V%, fato pelo qual é uma das misturas que mais alterações gera no solo. Comparando estes resultados com os da Tabela 4.2, correspondente às amostras deixadas

por um período de 1 ano no campo experimental, é possível observar a grande diferença entre os valores de CTC, sendo muito maiores para as misturas deixadas no laboratório, as quais também apresentaram maior saturação de bases. Essa análise comparativa indica o forte processo de migração dos insumos químicos que ocorre em campo. Impactam nesse processo tanto a infiltração da água da chuva como as evaporações sendo que em ambos os casos a ação da sucção e do gradiente de sucção presente no perfil de solo são fatores de grande relevância.

Tabela 4.2. Composição química do solo laterítico (L) e misturas, com tempo de exposição de 1 ano no campo experimental

Composição Química	Unidades	S. Laterítico	L+dolomít	L+SS	L+ureia	L+cloreto	L+SUC
Fosforo (P)	mg/dm ³	1,3	1,2	9,5	1,7	1,3	4,2
Cálcio (Ca)	cmol _c dm ⁻³	1,9	4,4	7,8	1,9	1,5	9
Magnésio (Mg)	cmol _c dm ⁻³	0,3	0,7	0,4	0,3	0,3	0,2
Potássio (K)	cmol _c dm ⁻³	0,03	0,91	0,12	0,47	0,26	0,32
Sódio (Na)	cmol _c dm ⁻³	0,03	0,16	0,12	0,03	0,04	0,13
Alumínio (Al)	cmol _c dm ⁻³	0	0,1	0	0,1	0	0
Acidez (H+Al)	cmol _c dm ⁻³	2	1,5	3,4	1,9	2	1,4
Soma das bases	cmol _c dm ⁻³	2,3	6,2	8,4	2,7	2,1	9,7
CTC	cmol _c dm ⁻³	4,3	7,7	11,8	4,6	4,1	11,1
Saturação por bases (V%)	%	53	80	72	59	51	87
Saturação por Al	%	0	2	0	4	0	0
Saturação por Na	%	1	3	1	1	2	1
Carbono Orgânico	g/kg	6,4	4,5	9,6	5,4	6,2	6,4
Matéria Orgânica (MO)	g/kg	11	7,7	16,5	9,3	10,7	11
pH em H ₂ O		6,5	7,8	5,8	7,6	6,5	6,2
pH em KCl		5,5	7,2	4,3	5,5	5,3	4,9
ΔpH		-1,0	-0,6	-1,5	-2,1	-1,2	-1,3

A capacidade de troca catiônica (CTC) de um solo depende de diferentes fatores, entre eles do conteúdo de matéria orgânica, geralmente quanto maior o teor de MO implica em maior CTC, e da quantidade e tipo de argila que integra a estrutura do solo (Besoain *et al.*, 1985). Lembrando que se trata do mesmo solo, na Tabela 4.2 é observado que as misturas com o Super simples e o SUC são efetivamente as que registraram maior teor de MO e maior CTC, mas comparando as misturas com o cloreto de potássio e a ureia, se observa que apesar da primeira apresentar maior teor de MO, a sua CTC foi levemente menor que a da ureia e estas duas misturas por sua vez apresentaram menor teor de MO e menor CTC que a mistura com o calcário dolomítico.

Considerando os resultados obtidos por Perez (2018), onde o calcário dolomítico quase não gerou nenhum efeito na distribuição granulométrica do solo e onde ao contrário o cloreto de potássio foi o que mais desagregação gerou, principalmente nas partículas com tamanho

inferior a 0,015 mm, se esperava que a CTC deste último fosse uma das maiores, mas ao se observar os resultados da solubilização dos produtos químicos também avaliados pela autora (Figura 4.1), nota-se que foi o calcário dolomítico o que apresentou menor solubilização quanto a mistura com água, podendo isto lhe permitir um maior número de partículas fiquem distribuídas e reagindo com os grãos do solo, reações que não estariam a exercer uma influência imediata significativa nas ligações entre partículas mantendo-se assim a estabilidade das agregações.

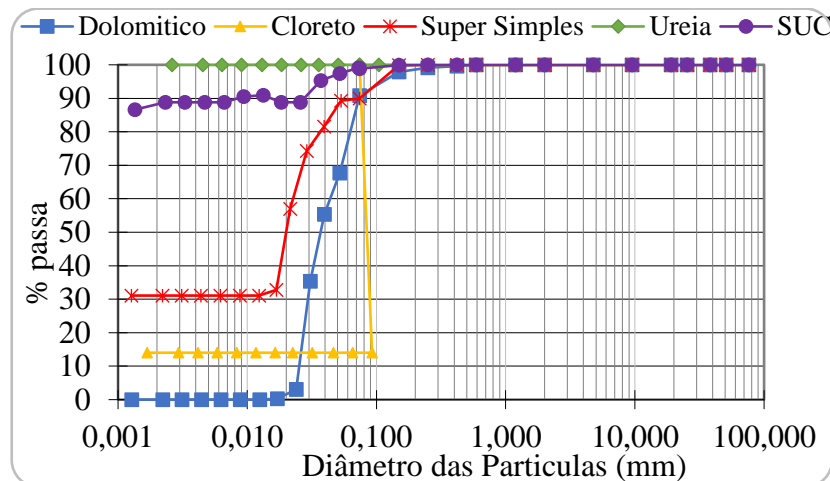


Figura 4.1. Distribuição granulométrica dos insumos minerais estudados. Modificado de Pérez (2018)

Cabe destacar que a ruptura de um duto de água na proximidade dos pontos onde estavam enterradas as misturas (Figura 3.1b), em especial as misturas com ureia, cloreto de potássio e o solo puro que estavam mais perto do ponto de rompimento, poderia ter acelerado o processo de lixiviação dessas amostras. Observa-se na Tabela 4.2 que foram essas amostras as que registram menor CTC e saturação de bases. Destaca-se, no entanto, conforme mostra a Tabela 4.5, que menores valores de CTC foram também encontrados para esses dois aditivos misturados ao solo de transição localizado a maior distância do ponto de vazamento. Com essa constatação torna-se pouco provável que os menores valores de CTC registrados para as misturas com o cloreto de potássio e a ureia seja devido ao vazamento de água ocorrido.

Todos os valores de CTC das misturas apresentados na Tabela 4.2, foram superiores ao registrado por Pérez (2018) para o mesmo solo sem tratamento ($3,8 \text{ cmolc dm}^{-3}$) e inferiores aos obtidos para as misturas sem que fossem submetidas à cura in situ. Tais constatações mostram que a adição dos insumos minerais afeta a curto prazo a química do solo, porém de modo relativamente rápido nos solos lateríticos, esse impacto é perdido por processos de lixiviação sem que ocorra um efetivo consumo dos mesmos pela vegetação, pois esta foi

removida durante o processo de escavação dos furos para deposição das amostras. Estas constatações colocam em evidência que a exposição às variações climáticas *in situ* fazem com que a ação dos insumos minerais sobre a interação entre as partículas varie ao longo do tempo, impactando de modo distinto na estabilidade textural do solo e implicando na necessidade de maiores cuidados na adoção das técnicas de manejo. Exemplificando, ao se comparar as granulometrias apresentadas na Figura 4.2a obtida 24 h após as misturas com 10% de aditivo (Pérez 2018), na Figura 4.2b obtida 7 dias após a mistura com 10% de aditivo (Pérez 2018) e na Figura 4.3 obtida 7 dias após a mistura com 4% de aditivo (Pérez 2018), verifica-se que o teor de aditivo, o tempo de interação e a ação dos fatores ambientais naturais e antrópicos interferem diretamente na estabilidade textural do solo podendo potencializar fenômenos como o da erosão.

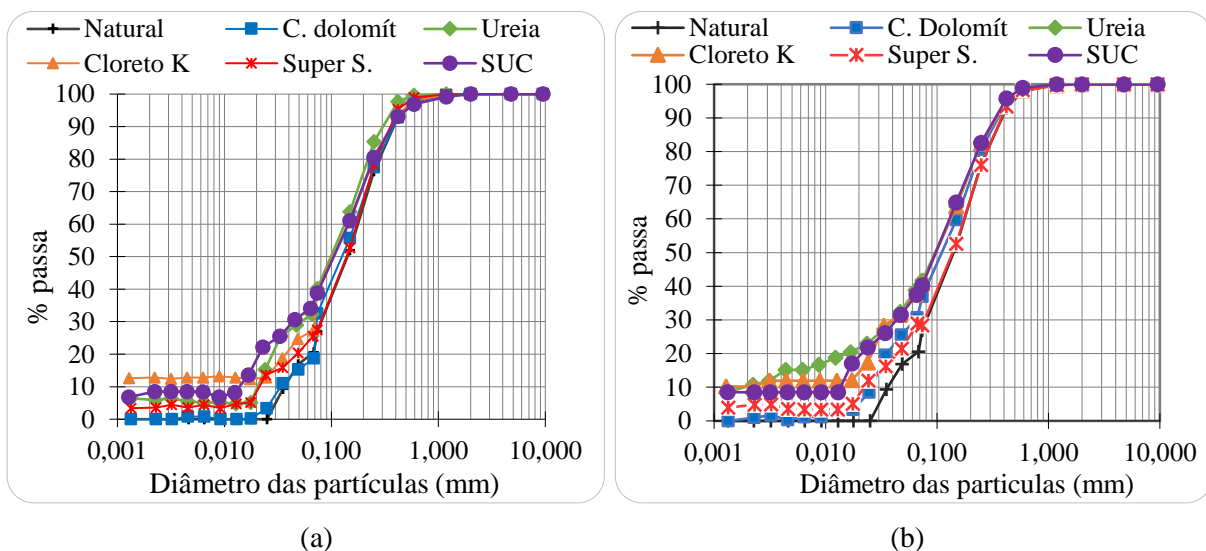


Figura 4.2. Solo laterítico com 10% de teor dos aditivos químicos e tempo de exposição de 24h (a) e 7 dias (b) (Pérez, 2018).

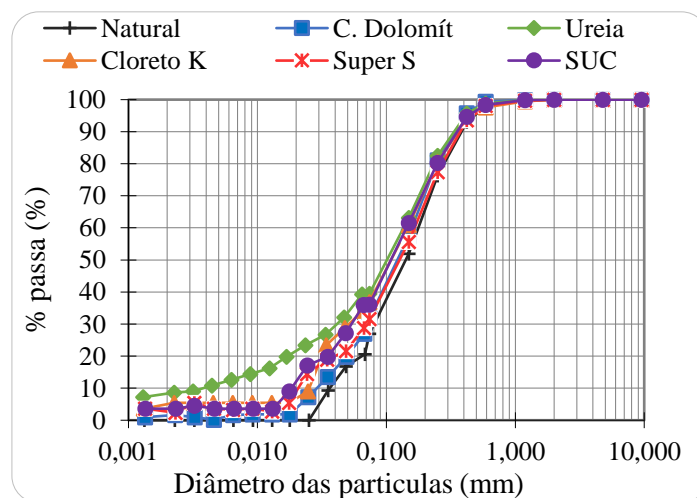


Figura 4.3. Solo laterítico com 4% de teor dos aditivos químicos e tempo de exposição de 7 dias (Pérez, 2018).

Na Tabela 4.2 também é observado que o solo natural e as misturas com ureia e cloreto, são as que apresentam a menor saturação por bases (V%), ou seja, possuem menor disponibilidade de íons básicos (Ca, Mg, Na e K) na superfície das partículas para troca iônica, fato que faz com que sejam levemente mais ácidos do que as outras 3 misturas. A mistura com o SUC foi a que apresentou a maior V% sendo o íon básico Ca o mais disponível na superfície das partículas. Esta característica junto com o maior valor de CTC faz com que seja um dos aditivos que mais gera desagregação no solo como mostrado nas Figura 4.2 (a) e (b) (Perez 2018). Ao comparar o resultado de V% obtido pela mesma autora para este solo em estado puro (34%) com os resultados das amostras enterradas, se observa que todas elas apresentam maior V%, ou seja, o solo tornou-se mais ativo em termos de reações já que disponibiliza maiores quantidades de íons básicos para trocas iônicas. Cabe salientar ser relevante considerar comparativamente os solos aditivados quanto a mistura assim como suas alterações progressivas ao longo do tempo em condições de campo.

As Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresentam correlações estatísticas entre as propriedades químicas do solo laterítico e suas misturas, avaliados tanto na condição de campo quanto de laboratório respectivamente.

Tabela 4.3. Correlação estatística das propriedades químicas do solo laterítico e suas misturas com tempo de exposição de 1 ano no campo experimental.

	P	Ca	Mg	K	Na	Al	H+Al+ bases	CTC	v%	Sr por Al	Sr por Na	C orgânico	MO	pH _{H2O}	pH _{KCl}	ΔpH	
Fósforo (P)	1																
Cálcio (Ca)	0,74	1															
Magnésio (Mg)	-0,09	-0,04	1														
Potássio (K)	-0,39	-0,03	0,74	1													
Sódio (Na)	0,40	0,77	0,57	0,52	1												
Alumínio (Al)	-0,41	-0,30	0,59	0,84	0,13	1											
Acidez (H+Al)	0,79	0,19	-0,02	-0,53	-0,05	-0,36	1										
Soma das bases	0,69	0,99	0,09	0,11	0,85	-0,18	0,13	1									
C.T.C	0,82	0,98	0,08	0,00	0,80	-0,25	0,33	0,98	1								
Sr por bases (V%)	0,39	0,86	0,28	0,45	0,92	0,13	-0,20	0,92	0,84	1							
Sr por Al	-0,36	-0,37	0,27	0,61	-0,14	0,93	-0,27	-0,29	-0,33	-0,05	1						
Sr por Na	-0,43	-0,22	0,82	0,78	0,43	0,46	-0,37	-0,09	-0,16	0,16	0,14	1					
Carbono orgânico	0,91	0,49	-0,30	-0,70	0,07	-0,66	0,89	0,40	0,56	0,02	-0,55	-0,56	1				
Matéria orgânica (MO)	0,91	0,49	-0,30	-0,71	0,06	-0,66	0,89	0,39	0,56	0,01	-0,55	-0,56	1,00	1			
pH (água)	-0,69	-0,50	0,56	0,82	0,00	0,94	-0,56	-0,38	-0,48	-0,02	0,84	0,57	-0,85	-0,85	1		
pH (KCL)	-0,70	-0,39	0,75	0,83	0,24	0,72	-0,62	-0,26	-0,37	0,10	0,46	0,82	-0,84	-0,84	0,86	1	
ΔpH	-0,27	0,03	0,57	0,30	0,47	-0,10	-0,31	0,10	0,04	0,23	-0,45	0,69	-0,27	-0,28	0,07	0,5786	1

Tabela 4.4. Correlação estatística das propriedades químicas do solo laterítico e suas misturas com tempo de exposição de 3 anos na condição de laboratório.

	P	Ca	Mg	K	Na	Al	H+Al + bases	CTC	v%	Sr por Al	Sr por Na	C orgânico	MO	pHH ₂ O	pHKCl	ΔpH	
Fósforo (P)	1																
Cálcio (Ca)	0,30	1															
Magnésio (Mg)	0,98	0,45	1														
Potássio (K)	-0,25	0,44	-0,17	1													
Sódio (Na)	-0,19	0,22	-0,14	0,96	1												
Alumínio (Al)	-0,30	-0,18	-0,23	-0,26	-0,28	1											
Acidez (H+Al)	0,63	0,88	0,71	0,18	0,03	-0,42	1										
Soma das bases	0,34	0,59	0,42	0,82	0,82	-0,38	0,52	1									
C.T.C	0,35	0,60	0,42	0,82	0,82	-0,38	0,53	1,00	1								
Sr por bases (V%)	0,36	0,67	0,49	0,61	0,57	0,10	0,55	0,83	0,83	1							
Sr por Al	-0,47	-0,71	-0,56	-0,61	-0,56	0,20	-0,71	-0,87	-0,87	-0,94	1						
Sr por Na	-0,29	-0,09	-0,35	0,55	0,61	-0,30	-0,06	0,35	0,34	0,22	-0,38	1					
Carbono orgânico	0,13	0,42	0,18	0,07	-0,02	0,23	0,45	0,15	0,15	0,54	-0,60	0,44	1				
Matéria orgânica (MO)	0,13	0,42	0,18	0,08	-0,01	0,23	0,45	0,16	0,17	0,55	-0,60	0,44	1,00	1			
pH (água)	-0,29	-0,53	-0,32	-0,30	-0,19	0,77	-0,58	-0,42	-0,42	-0,02	0,18	0,21	0,40	0,40	1		
pH (KCL)	-0,42	0,13	-0,38	-0,23	-0,39	0,49	0,03	-0,47	-0,47	-0,06	0,08	0,16	0,69	0,69	0,49	1	
ΔpH	-0,09	0,70	0,00	0,11	-0,16	-0,33	0,65	0,01	0,02	0,00	-0,15	-0,05	0,28	0,27	-0,56	0,45	1

As correlações foram feitas mediante a ferramenta de Excel “Análise de dados – correlações”, a qual fornece um fator de correção que, no caso de ser positivo indica uma correlação direta entre os elementos e um valor negativo indica correlação inversa. Adicionalmente, quanto mais próximo de +1 ou -1, a correlação é melhor. Normalmente correlações acima de $\pm 0,85$ são consideradas boas, assim nas tabelas foram ressaltados os valores que atingiam esta característica, sendo aqueles de cor vermelha os valores próximos a +1 e os roxos próximos a -1.

Das Tabela 4.3 e Tabela 4.4 se observa que as correlações mudam a depender do lugar e tempo de exposição aos insumos minerais, assim por exemplo, o cálcio e a soma de bases das misturas deixadas no campo experimental (Tabela 4.3), impactam direta e significativamente na CTC e na V% enquanto que na condição de laboratório esta correlação é menor. Em sentido contrário, se observa na Tabela 4.3 que o carbono e a matéria orgânica se correlacionam de forma negativa com o pH em água, ou seja, um aumento na concentração destes elementos diminui o pHH₂O do solo, fato que não se evidencia na condição de laboratório (Tabela 4.4) provavelmente devido a alterações na atividade microbiana a qual intervém na mineralização da matéria orgânica (Cruz-Macías *et. al.*, 2020). Estas constatações são corroboradas ao se observar na Tabela 4.3 que a acidez (H+Al) aumenta com o aumento do carbono e matéria orgânica, ou seja, se correlacionam positivamente.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados da composição química do solo de transição ao ser misturado com os diferentes insumos minerais estudados e ser mantido em cura *in situ*

por um ano. Da mesma forma como se evidenciou para o solo laterítico, todas as misturas apresentaram maior CTC em comparação com o valor obtido por Pérez (2018) para o solo natural. As misturas com a ureia e o cloreto de potássio foram as que apresentaram menor CTC, contrariando o estabelecido por Besoain *et. al* (1985) visto que foram estas as que registraram maior conteúdo de MO. Esse menor registro de CTC nas análises químicas destas duas misturas pode estar relacionado com processos de lixiviação.

Dos resultados de saturação por bases se observa a mesma tendência obtida no solo laterítico, onde o solo natural junto com as misturas com ureia e cloreto, tem menor disponibilidade de íons básicos na superfície das partículas e, portanto, maior acidez que as outras três misturas. Novamente o SUC e o Super Simple foram os que geraram maior V%, maior CTC e, segundo Perez (2018), mais desagregação, apenas inferior ao cloreto de potássio.

Tabela 4.5. Composição química do solo de transição (T) e misturas, com tempo de exposição de 1 ano no campo experimental.

Composição Química	Unidades	S. Transição 0%	T+dolomít	T+SS	T+ureia	T+cloreto	T+SUC
Fosforo (P)	mg/dm ³	1,2	0,1	7,4	1,1	0,9	4,7
Cálcio (Ca)	cmol _c dm ⁻³	2,5	6,1	9,5	3,1	2,4	7,1
Magnésio (Mg)	cmol _c dm ⁻³	0,6	1	0,4	0,7	0,4	0,1
Potássio (K)	cmol _c dm ⁻³	0,04	0,1	0,12	0,04	0,7	0,52
Sódio (Na)	cmol _c dm ⁻³	0,02	0,09	0,11	0,02	0,04	0,11
Alumínio (Al)	cmol _c dm ⁻³	0	0	0	0	0	0
Acidez (H+Al)	cmol _c dm ⁻³	2,2	2	4	2	3,4	3
Soma das bases	cmol _c dm ⁻³	3,2	7,3	10,1	3,9	3,5	7,8
CTC	cmol _c dm ⁻³	5,4	9,3	14,1	5,9	6,9	10,8
Saturação por bases (V%)	%	59	78	72	65	51	72
Saturação por Al	%	0	0	0	0	0	0
Saturação por Na	%	1	1	1	1	1	1
Carbono Orgânico	g/kg	2,7	1,6	2,3	3	1,9	1,8
Matéria Orgânica (MO)	g/kg	4,6	2,8	4	5,2	3,3	3,1
pH em H ₂ O		6,4	6,7	5,3	6,4	6,3	5,7
pH em KCl		3,4	7,0	2,9	2,9	3,4	3,9
ΔpH		-3,0	0,3	-2,4	-3,5	-2,9	-1,8

Os resultados apresentados por Pérez (2018) conforme ilustrado na Figura 4.4 mostram que as propriedades químicas apresentam significativa variação ao longo do perfil de intemperismo. Destaca-se nesta figura o comportamento diferenciado do solo coletado a 1 m de profundidade, solo profundamente intemperizado. Cabe ainda destacar o fato do solo de transição, profundidade 9 m, fugir à tendência registrada para o perfil. O solo mais superficial situa-se na zona ativa mais sujeita aos fluxos de umidade oriundos da infiltração de águas pluviais e da evapotranspiração. Já o solo de transição encontra-se no contato com a zona menos

permeável do maciço facilitando o acúmulo de água no período chuvoso e sua evacuação no período de seca. Portanto, as condições de fluxo assumem grande relevância no processo de alteração do maciço e por similaridade podem ser igualmente consideradas relevante em relação ao carreamento de elementos e compostos químicos provenientes dos insumos minerais.

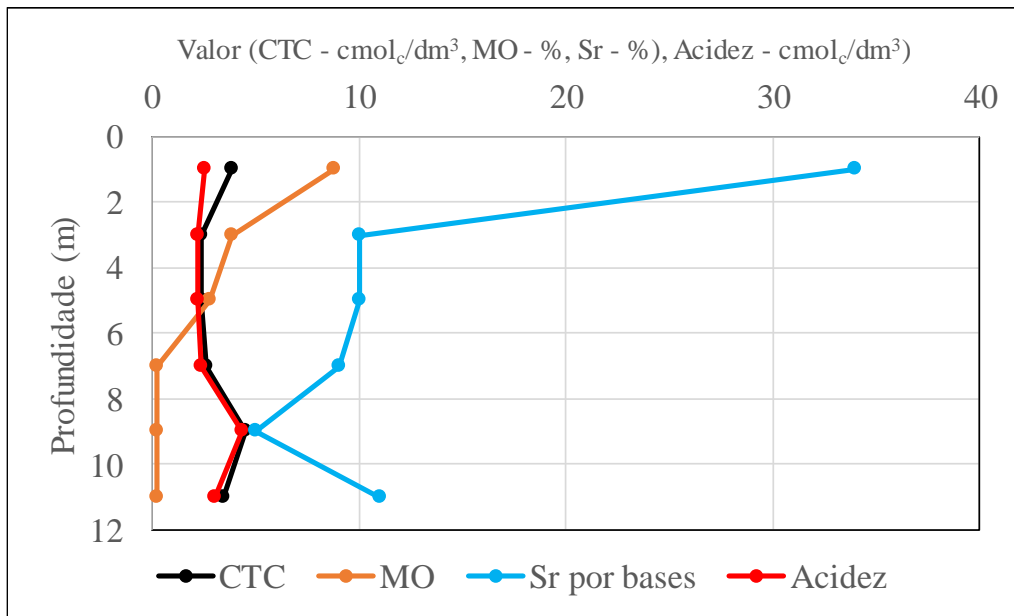


Figura 4.4 CTC, MO, saturação por bases e acidez ao longo do perfil (Pérez, 2018).

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

4.2.1. Massa Específica dos Sólidos

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de massa específica dos sólidos (ρ) obtidos para os solos e insumos puros assim como para mistura do solo puro com 10% dos respectivos insumos. Na determinação foi utilizado o equipamento pentapicnômetro a gás. Os resultados obtidos mostram que as massas específicas resultantes das misturas não correspondem à ponderação das massas específicas do solo com a do insumo usado, indicando assim, a possibilidade de ocorrência de interações que podem transformar e formar novos compostos impactantes nos resultados e análises contidas nesta pesquisa.

Tabela 4.6. Massas específicas dos sólidos (ρ) do solo puro, dos insumos usados e das misturas solo-insumo.

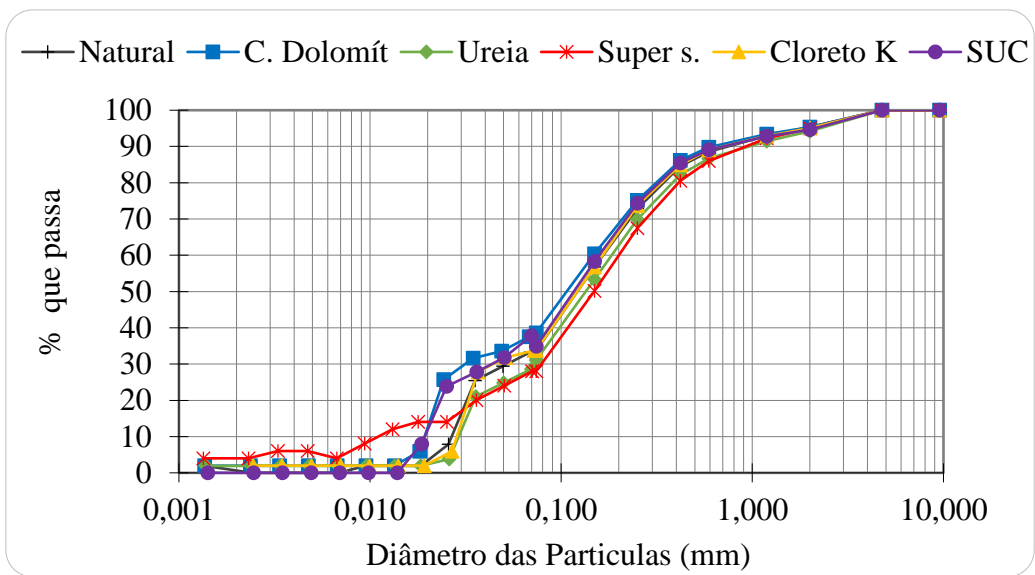
Material	Massa específica (ρ) (g/cm ³)	
	Solo laterítico	Solo Saprolítico
Solo puro	2,68	2,88
Calcário Dolomítico puro	2,87	2,87
Ureia pura	1,34	1,34
Super simples puro	2,53	2,53
Cloreto de potássio puro	2,01	2,01
SUC puro	1,96	1,96
Solo + 10% de Calcário Dolomítico	2,65	2,86
Solo + 10% de Ureia	2,69	2,65
Solo + 10% de Super simples	2,68	2,76
Solo + 10% de Cloreto de potássio	2,55	2,76
Solo + 10% de SUC	2,60	2,69

4.2.2. Granulometria

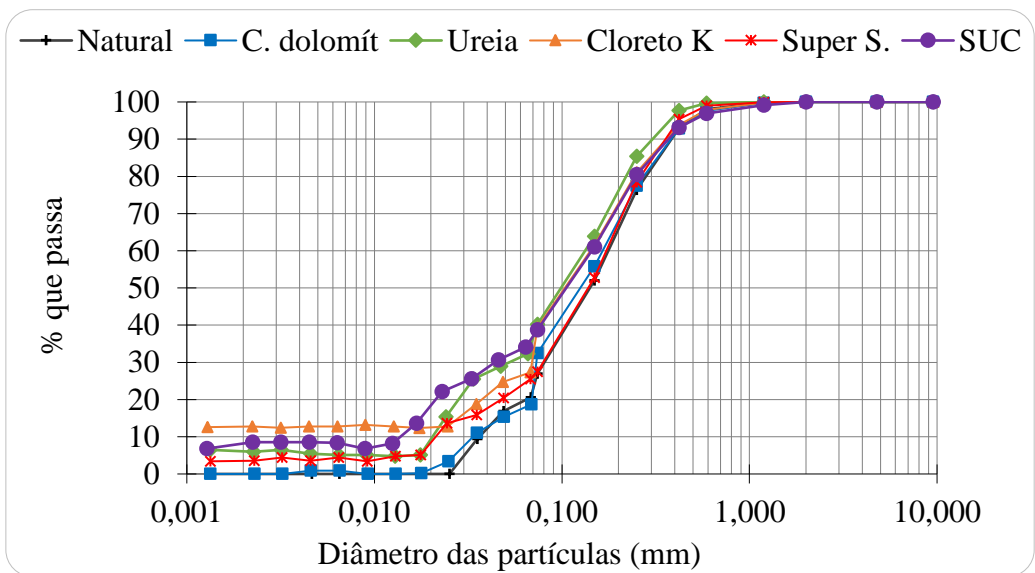
As análises granulométricas das misturas obtidas em condições de cura em laboratório estão apresentadas na dissertação de Mestrado de Pérez (2018) para alguns teores de insumos e diferentes tempos de cura, sendo aqui apresentados os resultados obtidos após um ano de cura *in situ* e comparativamente os resultados obtidos por Pérez (2018) 24 horas após as misturas em laboratório.

Na Figura 4.5 e Figura 4.6 são apresentadas respectivamente as distribuições granulométricas sem uso de defloculante do solo laterítico e do solo de transição, com as respectivas misturas, após 1 ano de cura *in situ* (a) e 24 horas após mistura (b). Da mesma forma as porcentagens de pedregulho, areia, silte e argila do solo laterítico e do solo de transição, são apresentados na Tabela 4.7 e Tabela 4.8 respectivamente. Antes de dar início às análises, destaca-se que os materiais analisados quando mantidos em cura *in situ*, podem ter sofrido processos de lixiviação em especial devido à infiltração da água da chuva.

Comparando-se para o solo laterítico os resultados após um ano de cura *in situ* com os obtidos 24 horas após as misturas, os maiores destaques cabem ao fato de que enquanto nos resultados obtidos para 24 horas, a maioria, exceto a contendo calcário dolomítico, tenderam a desagregarem, enquanto 1 ano após as misturas a ureia e o Super simples tenderam a apresentarem agregações sendo pequenas as mudanças para as demais misturas.



(a)

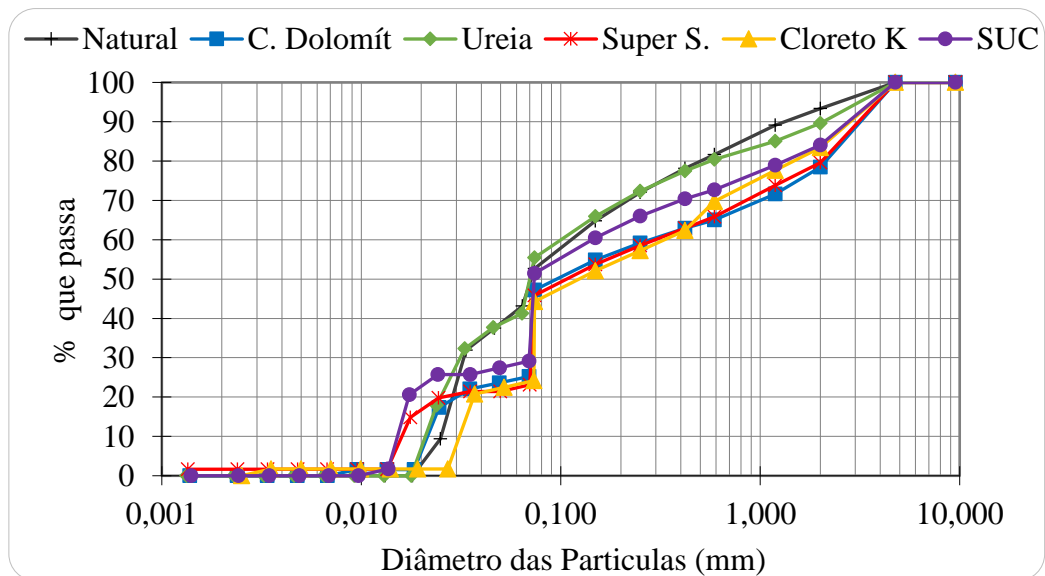


(b)

Figura 4.5. Resultados do ensaio de sedimentação em água para o solo laterítico com as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB (a) e 24 horas após a mistura (b).

Tabela 4.7. Porcentagens para diferentes tamanhos de partículas do solo laterítico com 1 ano de exposição no campo experimental e 24 horas após a mistura, sem uso de defloculante.

Tempo de cura	Material	Argila	Silte	Areia			Pedregulho fino
				Fina	Média	Grossa	
1 ano	Laterítico (L)	0,0	31,5	33,4	23,7	6,7	4,7
	L+Calcáreo dolomítico	2,0	33,9	32,0	22,0	5,4	4,7
	L+Ureia	1,9	24,9	34,9	25,1	7,4	5,8
	L+Super S.	4,0	21,9	33,0	27,2	8,8	5,0
	L+Cloreto	2,0	30,6	32,7	23,8	6,0	4,9
	L+SUC	0,0	34,7	31,6	22,8	5,5	5,4
24 horas	Laterítico (L)	0,0	19,0	45,3	33,8	1,9	0,0
	L+ Calcáreo dolomítico	0,0	17,2	49,5	30,9	2,3	0,0
	L+Ureia	5,6	25,7	43,4	24,9	0,3	0,0
	L+Super S.	3,7	19,7	42,3	33,3	1,0	0,0
	L+Cloreto	12,9	13,3	45,2	26,5	2,1	0,0
	L+SUC	9,8	23,5	37,5	26,0	3,1	0,0



(a)

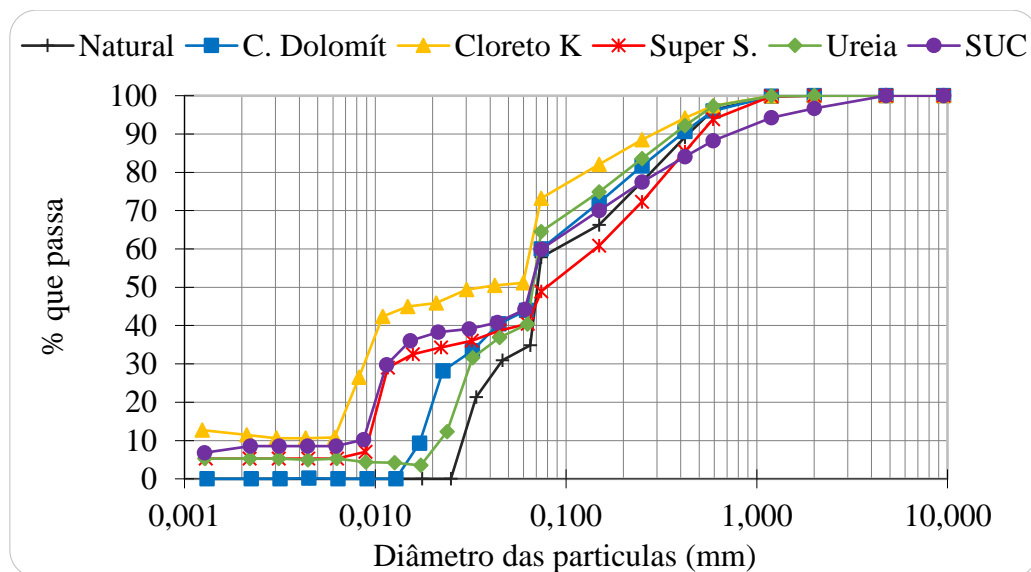


Figura 4.6. Resultados do ensaio de sedimentação em água para o solo de transição com as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB (a) e 24 horas após a mistura (b).

Tabela 4.8. Porcentagens para diferentes tamanhos de partículas do solo de transição com 1 ano de exposição no campo experimental da UnB e 24 horas após a mistura, sem uso de defloculante.

Tempo de cura	Material	Argila	Silte	Areia			Pedregulho fino
				Fina	Média	Grossa	
1 ano	Transição (T)	0,0	41,8	26,6	13,3	11,6	6,6
	T+Calcáreo dolomítico	0,0	24,5	32,6	8,1	13,3	21,6
	T+Ureia	0,0	40,5	28,7	11,3	9,1	10,4
	T+Super S.	1,6	20,6	33,9	9,9	13,6	20,4
	T+Cloreto	0,0	23,1	31,6	15,2	13,5	16,6
	T+SUC	0,0	28,4	34,9	9,5	11,3	15,9
24 horas	Transição (T)	0,0	33,8	38,1	24,3	3,7	0,0
	T+ Calcáreo dolomítico	0,0	43,6	33,4	19,1	4,0	0,0
	T+Ureia	5,3	34,6	39,4	18,0	2,7	0,0
	T+Super S.	5,3	34,9	26,5	27,3	6,0	0,0
	T+Cloreto	10,4	40,8	34,1	12,0	2,7	0,0
	T+SUC	9,8	34,2	29,7	14,6	8,3	3,3

Ao observar os resultados do solo de transição com um ano de cura *in situ* (Figura 4.6a), se confirma que nesta profundidade os diferentes insumos minerais alteram em maior proporção o solo em relação aos resultados obtidos sem tratamento. O mesmo comportamento é observado nos resultados obtidos por Pérez (2018) como mostrado na Figura 4.6b, isto é, devido à maior CTC que este solo tem (Tabela 4.5) interagindo de modo mais intenso com estes insumos.

Contudo, comparando-se os dois conjuntos de resultados, como já destacado, *in situ* ocorre a tendência a formação de agregações, para as misturas ensaiadas 24 horas após a preparação (Pérez 2018), a tendência é de desagregação. Os valores de pH destas misturas (Tabela 4.5) em comparação com os obtidos por Pérez (2018) são menos ácidos, ou seja, têm uma menor disponibilidade de H^+ na sua composição, o que indica que com um maior tempo de exposição e em condições de campo, uma maior troca catiônica acontece gerando no final essas agregações observadas.

Nas Figura 4.7 e Figura 4.8 são apresentadas respectivamente a distribuição granulométrica com uso de defloculante do solo laterítico e saprolítico, com as respectivas misturas, após 1 ano de cura *in situ* e na Tabela 4.9 são apresentadas as porcentagens de pedregulho, areia, silte e argila de cada um dos materiais avaliados com defloculante.

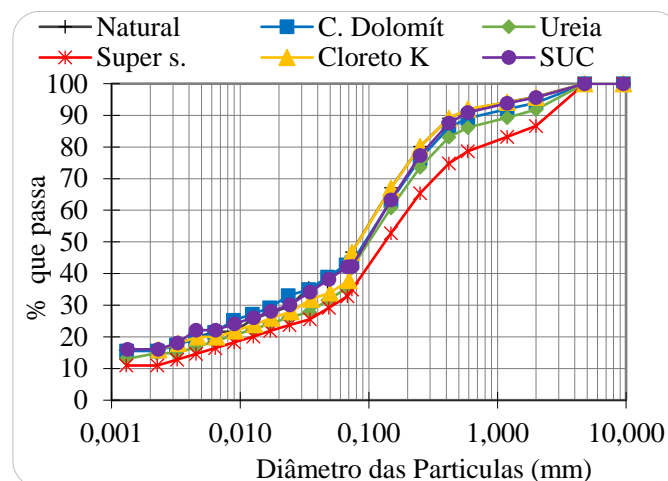


Figura 4.7. Resultados do ensaio de sedimentação com defloculante para o solo laterítico e as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB.

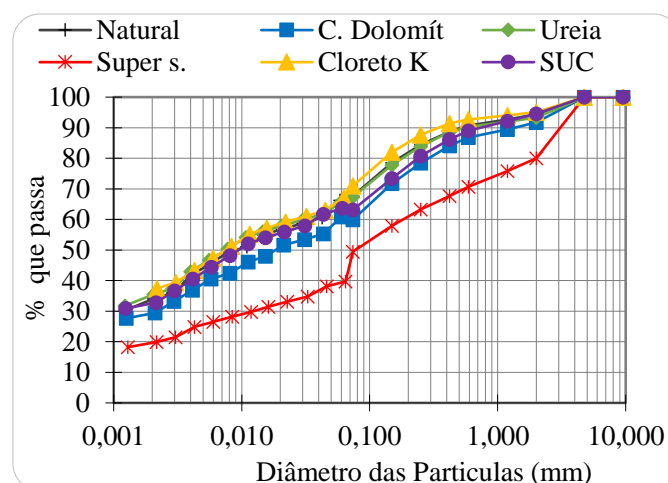


Figura 4.8. Resultados do ensaio de sedimentação com defloculante para o solo de transição e as misturas após 1 ano de exposição no campo experimental da UnB.

Tabela 4.9. Porcentagens para diferentes tamanhos de partículas do solo laterítico e de transição com 1 ano de exposição no campo experimental e com uso de defloculante.

Material	Argila	Silte	Areia			Pedregulho fino
			Fina	Média	Grossa	
Laterítico (L)	15,7	25,5	32,5	18,2	3,9	4,2
L+Calcáreo dolomítico	15,5	25,8	28,4	19,4	4,8	6,1
L+Ureia	16,3	17,7	33,3	19,0	5,6	8,2
L+Super S.	11,0	20,4	27,8	19,6	7,9	13,3
L+Cloroeto	17,3	18,6	37,8	18,4	3,6	4,3
L+SUC	16,1	24,4	29,9	20,6	4,7	4,4
Transição (T)	37,6	29,1	14,7	9,2	3,6	5,7
T+ Calcáreo dolomítico	31,1	29,7	14,4	11,6	4,9	8,2
T+Ureia	39,0	26,7	15,2	9,4	3,0	6,7
T+Super S.	21,2	18,1	21,3	10,2	9,2	20,0
T+Cloroeto	40,6	25,8	18,4	7,9	2,4	4,9
T+SUC	34,4	29,1	13,5	11,9	5,5	5,5

Observa-se nesses dois gráficos que o grande destaque é para a estabilidade conferida às agregações pelo Super simples. No solo de transição esse efeito foi maior devido tanto à maior CTC e saturação por bases (V%) (Tabela 4.5) que este solo apresenta, quanto pela presença da sericita nesta profundidade, pois em estudos anteriores foi verificado que a presença de ilita (mineral da mesma família), gerava a agregação do solo quando do uso de defloculante (Guimarães, 2002). O fato de ter sido a mistura com o Super simples a que mais gerou agregação nas duas profundidades, se deve ao fósforo, uma vez que ele pode reagir com a sericita. Tem-se ainda que Santos (1975) apresenta que a adição de cátions ao solo, como o Calcio (Ca), gera uma diminuição do potencial eletrocinético reduzindo desse modo a repulsão entre partículas, e foi precisamente a mistura com o Super simples a que registrou a maior concentração de Ca nas análises químicas (Tabela 4.5).

4.2.3. Limites de Atterberg

Os estudos realizados para os limites de Atterberg dos solos puros e das misturas foram desenvolvidos por Pérez (2018). Na Figura 4.9 são apresentados os resultados tanto do limite de liquidez (l_l) quanto do limite de plasticidade (l_p) das misturas avaliadas nesta pesquisa.

Se observa que os fertilizantes geram uma diminuição dos valores dos limites de Atterberg com relação aos resultados obtidos para o solo natural. Essa variação estaria a indicar

que para um mesmo teor de umidade, o solo está apresentando mudanças nas suas propriedades mecânicas apontando para a redução da resistência (Grim, 1962). A validação desse aspecto foi realizada por meio de ensaios de resistência.

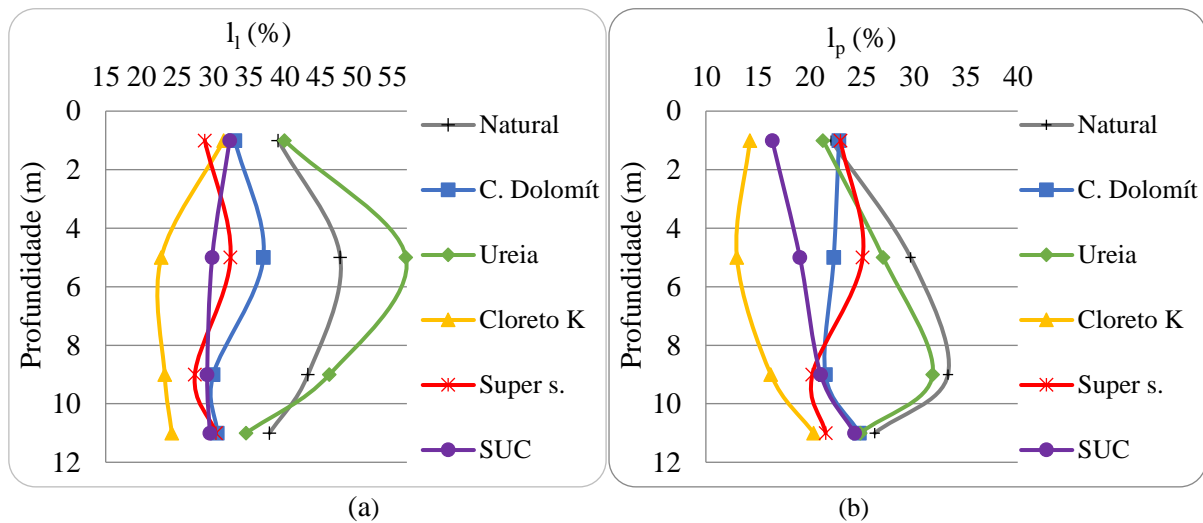


Figura 4.9. Resultados dos Limites de Atterberg, com tempo de exposição de 24h: a) I_L ; b) I_P . Modificado de Pérez (2018).

4.2.4. Índice de Vazios

A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos para os índices de vazios dos corpos de prova submetidos ao ensaio de determinação da curva característica de retenção de água no solo pela técnica do papel filtro, tanto para o solo laterítico (a) quanto para o solo saprolítico (b). Como o diâmetro do molde e o peso e a altura de queda do soquete foram os mesmos, admitiu-se que a energia de compactação seria a mesma ao se considerar a massa de 100 g para o solo puro e para as misturas. No entanto, se consideradas as massas específicas do solo puro e das misturas apresentadas na Tabela 4.6, pode ser verificado na Figura 4.11 que os índices de vazios estimados para as umidades 12% e 16%, umidades em que se dispõe de resultados para todas as misturas com o solo laterítico (Figura 4.10a), tendem a diminuir com o aumento do volume de sólidos.

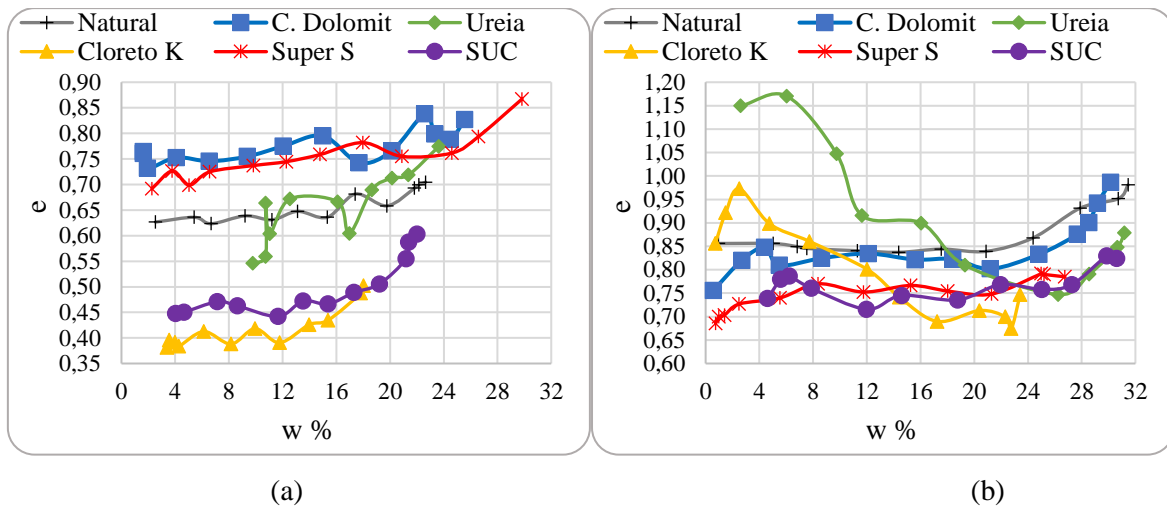


Figura 4.10. Índices de vazios em função da umidade para o solo laterítico (a); saprolítico (b).

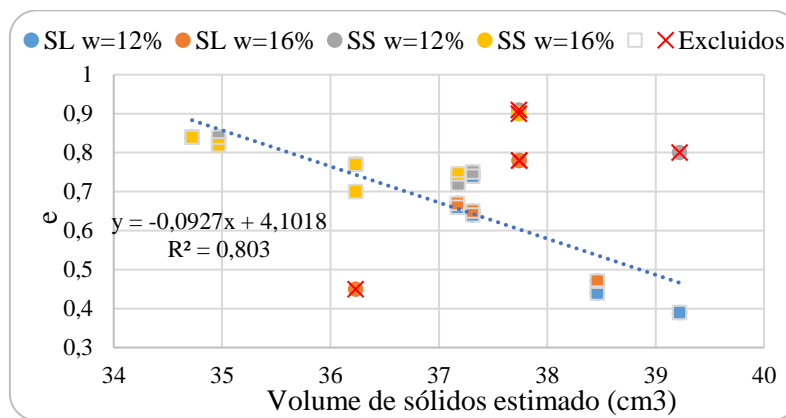


Figura 4.11. Índice de vazios em função do volume de sólidos estimado

Na relação mostrada na Figura 4.11, alguns pontos fogem à tendência indicando que outros fatores inerentes as próprias misturas interferem nos resultados. Portanto, os índices de vazios mostrados nestas figuras, guardam entre outros, certa relação com a energia efetiva de compactação e com a própria natureza das misturas. As variações dos índices de vazios com a umidade mostradas nas Figura 4.10a e Figura 4.10b, considerando-se o fato de que para cada mistura e tipo de solo todos os corpos de prova foram compactados com a mesma energia e com a mesma umidade, se devem a expansões, contrações e reações químicas ocorridas durante o período de cura mínimo de 10 dias, reforçando a ideia de mudanças na estrutura geradas pelos insumos estudados e por variações nas sucções total e osmótica

No caso do solo laterítico (Figura 4.10a), os menores valores de índice de vazios obtidos para as misturas com o composto SUC e o cloreto de potássio, em relação aos resultados obtidos para o solo puro, além de guardar relação com as análises realizadas a partir da Figura 4.5 eles são coerentes com a potencial desagregação do solo gerada por esses aditivos conforme

mostrado nas análises granulométricas feitas por Perez (2018), contribuindo assim para a redução da macro e mesoporosidade, e por consequência do índice de vazios do solo compactado. As misturas com o Super simples e o calcário dolomítico apresentam comportamento inverso, como apresentado mais à frente nas análises visuais com lupa, esse aumento é, dentre outros, produto de pequenas agregações, as quais uma vez em contato com a água se desmancham com facilidade gerando desagregação, principalmente na mistura com o Super simples (Pérez, 2018).

Finalmente, dos resultados obtidos por Pérez (2018) para o aditivo ureia, a granulometria foi pouco afetada com 24 horas de cura e os limites de liquidez e plasticidade são semelhantes aos obtidos para o solo puro o que, no conjunto, contribui para a expectativa de índices de vazios semelhantes aos obtidos para o solo puro como de fato ocorreu.

No solo saprolítico (Figura 4.10b) os menores valores de índice de vazios obtidos para o composto SUC e o Super simples em relação ao solo natural, se deve praticamente aos mesmos fatores mencionados para o solo laterítico, exceto que em lugar do potencial de desagregação se estabelece o potencial de defloculação, pois as partículas tendem a se encontrarem floculadas e não agregadas. Para o calcário dolomítico apesar da ampliação do pH potencializando a ampliação das forças de repulsão interpartículas, as análises granulométricas e a semelhança nos valores de limite de plasticidade com o solo puro obtidos por Perez (2018), sinalizam para a expectativa de semelhança nos resultados de compactação conforme indicam os índices de vazios próximos aos obtidos para o solo natural.

Os resultados obtidos para as misturas com o cloreto de potássio e principalmente a ureia, apresentam um incremento significativo nos seus valores de índice de vazios para as menores umidades, o qual sai da tendência esperada, como a apresentada pelo solo sem tratamento. Esse aumento, se deve ao processo de cristalização que ocorre com estes dois fertilizantes, o qual faz com que os corpos se tornem mais quebradiços com a diminuição do grau de saturação, e apresentem maior número de fissuras como mostrado na Figura 4.12, o qual faz com que na hora da determinação do índice de vazios tanto pelo método da parafina quanto pelo método do paquímetro sejam obtidos dados não coincidentes com o que se esperaria, tornando-se os valores de índice de vazios mais elevados. Merece destaque o fato dos pontos mostrados na Figura 4.11 para essas misturas, se afastarem da tendência geral obtida de aumento do índice de vazios com a redução do volume de sólidos. Observa-se também na Figura 4.12 que enquanto o cloreto de potássio, para as umidades mais baixas, tende a quebrar por completo o

corpo de prova, a ureia além disso gera um desprendimento da parte superficial onde se geram os filamentos produto da cristalização.



Figura 4.12. Efeito dos fertilizantes cloreto de potássio e ureia no solo de saprolítico, para os menores valores de sucção.

4.3. ANÁLISES DA ESTRUTURA

Como foi mostrado no item 4.1, dependendo da composição químico-mineralógica do solo e do insumo mineral utilizado, ocorrem uma série de reações químicas que fazem com que propriedades como massa específica dos sólidos, textura, consistência e a própria estrutura do solo sejam afetadas.

Nas Figura 4.13 e Figura 4.14, são apresentadas imagens exemplificando os efeitos gerados pelos fertilizantes ureia e cloreto de potássio, respectivamente, na aparência física visualizada externamente no solo profundamente intemperizado (a) e no solo saprolítico (b), ressaltando que a cada corpo de prova se adicionou a mesma quantidade de fluido (água mais insumo). Pode ser observado na Figura 4.13 que a ureia afetou os solos de modo distinto, apontando para a relevância da sua composição químico-mineralógica do solo nas reações que ocorreram quando em contato com os insumos minerais, lembrando que ao longo do tempo vão ocorrer solubilizações e cristalizações fazendo com que propriedades como massa específica dos sólidos (ρ) e índice de vazios (e) sejam alteradas. No caso do cloreto de potássio a cristalização gerada com a perda de umidade nesses dois tipos de solo (Figura 4.14) também pode afetar a estrutura do solo ao contribuir para o fechamento de poros.

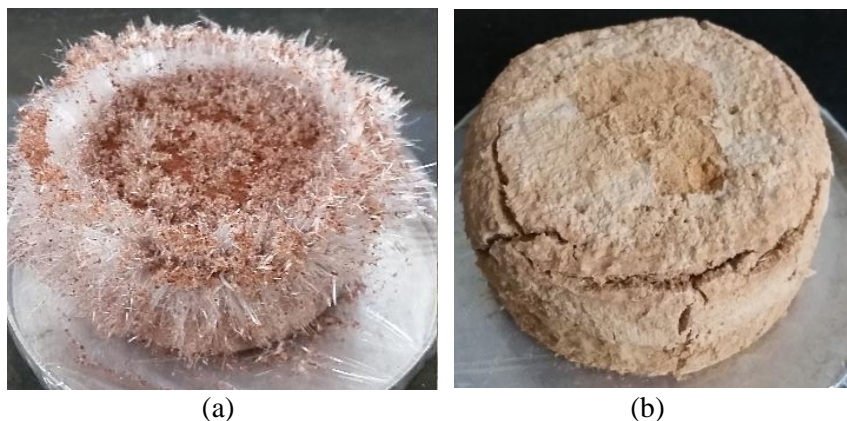


Figura 4.13. Efeito da ureia na estabilidade estrutural de um solo laterítico (a); saprolítico (b).



Figura 4.14. Forma como o cloreto de potássio se cristaliza no solo laterítico (a); saprolítico (b).

4.3.1. Análise visual com lupa

A Figura 4.15 mostra a estrutura dos corpos de prova compactados de cada uma das misturas, incluindo o solo laterítico sem tratamento, para as porcentagens de saturação mais baixas. As imagens foram obtidas com uma lupa eletrônica manual e apresentam um aumento de 200 vezes. Nelas se observa que o solo compactado com os produtos químicos Super simples e calcário dolomítico apresenta uma certa formação de grumos, dando lugar a uma estrutura com macroporos maiores o que estaria concordando com o apresentado na Figura 4.10a, na qual esses aditivos químicos apresentam maiores índice de vazios que o solo natural. Cabe destacar que segundo os resultados de Pérez (2018), quando estas misturas entram em contato com a água, tais agregações se desfazem chegando a apresentar desagregação do solo, principalmente da mistura com o Super simples. Destaca-se ainda que na imagem correspondente à mistura com o Super simples, se observam pontos brancos na superfície do solo, os quais correspondem às partículas não solubilizadas desse fertilizante, já que segundo apresentado por Perez (2018), ele não se solubiliza na sua totalidade.

As misturas correspondentes aos produtos químicos ureia, cloreto de potássio e SUC (Figura 4.15) apresentam uma estrutura visualmente mais compacta, com menor quantidade de macroporos, fato respaldado pelo apresentado na Figura 4.11a, na qual estes insumos apresentaram menores valores de índice de vazios em comparação com o solo de referência.

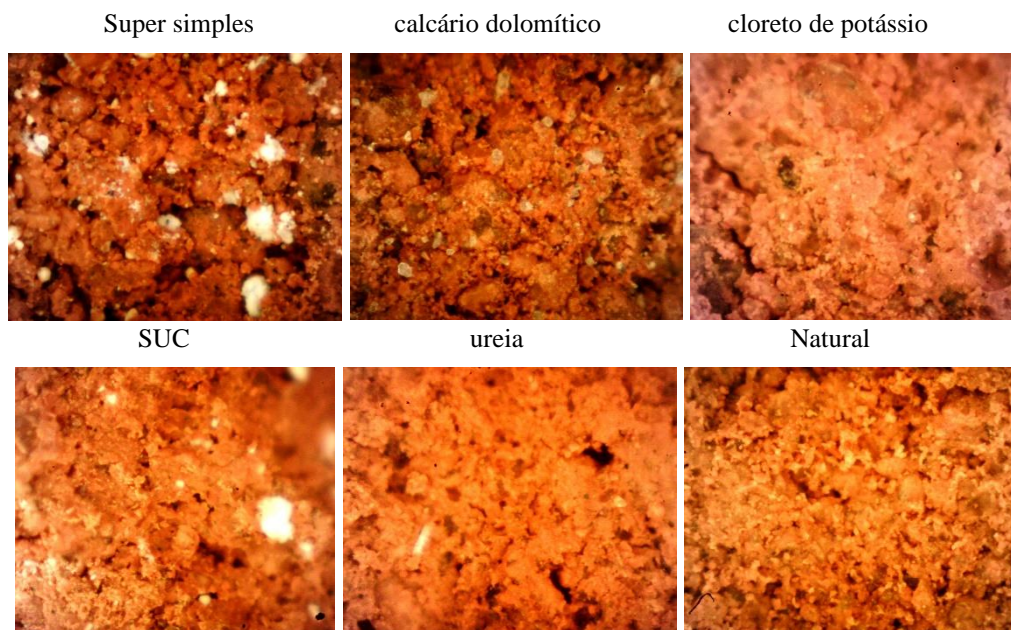


Figura 4.15. Imagens obtidas com a lupa para o solo laterítico, misturado com 10% de teor dos diferentes aditivos químicos. Aumento de 200 vezes.

Na Figura 4.16 são exibidas as imagens obtidas com a lupa eletrônica manual e aumento de 200 vezes, para o solo saprolítico puro e para cada uma das misturas feitas com os diferentes produtos químicos, na condição menos saturada. É observado nas imagens, claramente, a presença de vazios correspondentes a bolhas nas misturas com SUC, cloreto de potássio e ureia, bolhas formadas, seguramente, pelo ar que ficou aprisionado durante a compactação, fenômeno que não se apresentou nem no solo natural nem na mistura com o Super simples. Ressalta-se que uma vez que o solo entra em contato com os fertilizantes SUC, cloreto de potássio e ureia, este fica mais úmido que as outras misturas, conseqüentemente, há maior quantidade de água ao redor das partículas e oclusão da fase ar, impedindo assim o seu fluxo e distribuição na estrutura do solo durante a compactação, formando no final as bolhas observadas.

Das imagens obtidas com a lupa, também podem ser observadas pequenas fissuras para o caso da mistura com o cloreto de potássio, as quais devem ser produto da cristalização que apresenta este fertilizante no solo, tal como foi apresentado na Figura 4.12 e Figura 4.14b. Mesmo que a ureia, a qual também cristaliza, não apresente microfissuras nas imagens da lupa,

em outras imagens sem aumento, que são apresentadas mais adiante, estes fissuramentos foram visíveis.

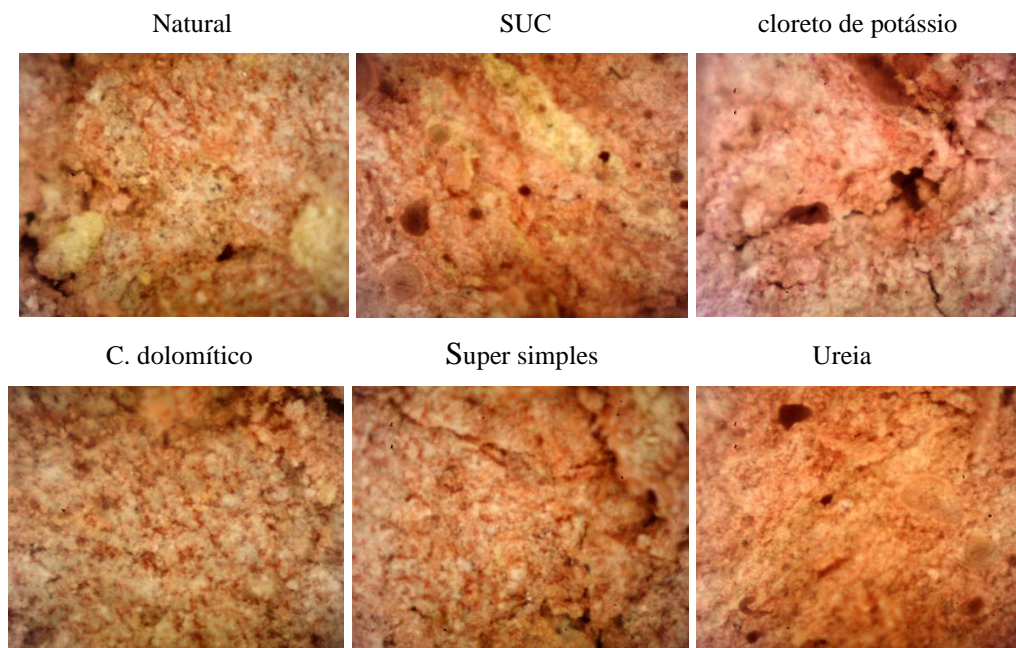


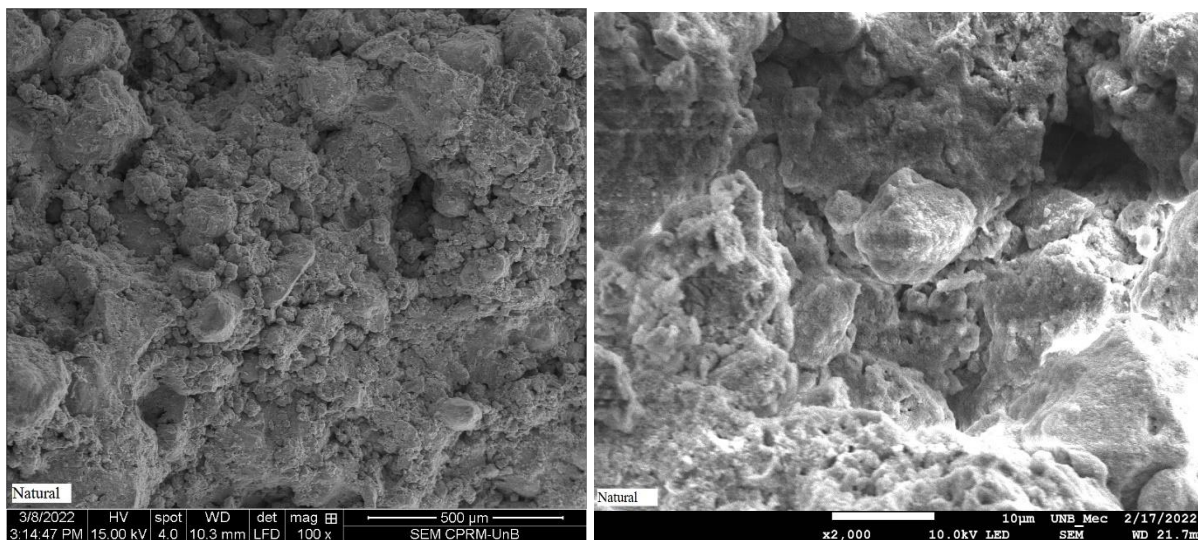
Figura 4.16. Imagens obtidas com a lupa para o solo saprolítico, misturado com 10% de teor dos diferentes aditivos químicos. Aumento de 200 vezes.

4.3.2. Imagens feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Utilizou-se complementarmente a microscopia eletrônica de varredura (MEV) a alto vácuo na observação da microestrutura do solo laterítico com e sem a adição dos diferentes insumos utilizados. Cabe lembrar que não foi possível fazer imagens das misturas com o solo saprolítico, pois com a desidratação objetivando a metalização elas se desintegravam.

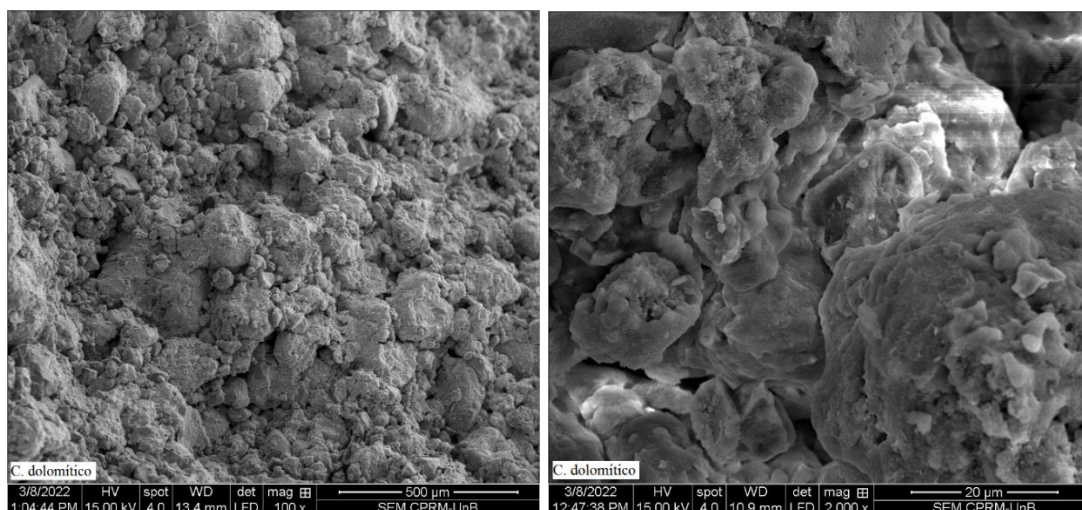
A Figura 4.17 apresenta imagens do solo natural com ampliações de 100 x (a) e 2000 x (b). Nestas imagens é possível observar a presença de macro e microagregações estáveis e interagindo entre elas por meio de contatos de superfície.

A Figura 4.18 indica, se comparada à Figura 4.17 obtida para o solo natural, que a adição de calcário dolomítico não gerou a agregação ou desagregação do solo. Essa observação confirma os resultados obtidos por Pérez (2018) quando das análises granulométricas realizadas sem o uso de defloculante 24 horas após a mistura. No entanto, a mesma autora mostra que após dias de cura esse calcário atua facilitando a desagregação do solo durante o ensaio de sedimentação.



(a) (b)

Figura 4.17. MEV do solo natural: 100 x (a); 2000 x (b).



(a) (b)

Figura 4.18. MEV da mistura solo-calcário dolomítico: 100 x (a); 2000 x (b).

A Figura 4.19 mostra que a ureia atua no solo gerando certa desagregação (a, b) e formação de novos grãos (c). Estas partículas desagregadas vão encher parte dos vazios da amostra, contribuindo para que se observe uma estrutura mais compacta como foi observado nas imagens obtidas com a lupa (Figura 4.15). A desagregação confirma os resultados apresentados por Pérez (2018) nas análises granulométricas quando esta mistura entra em contato com a água.

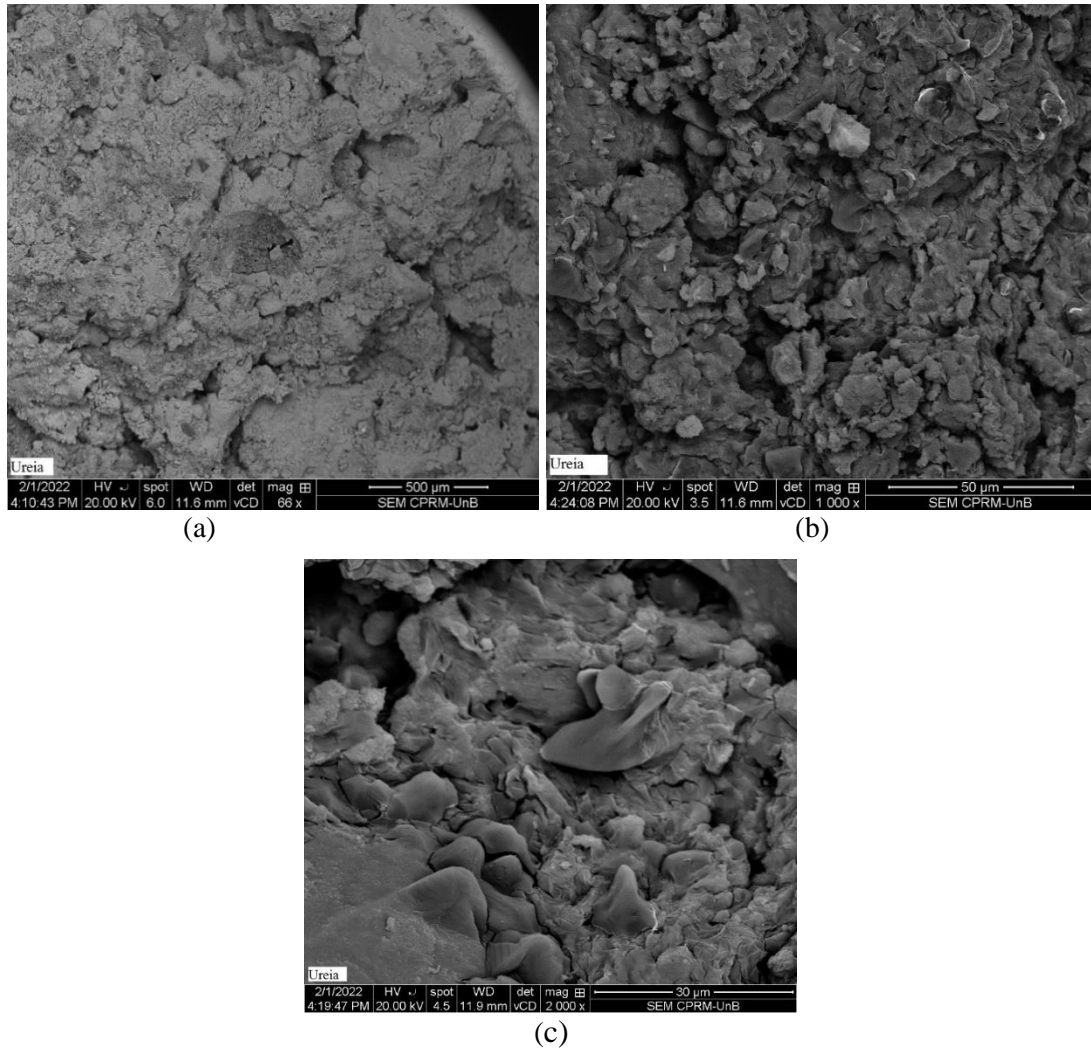
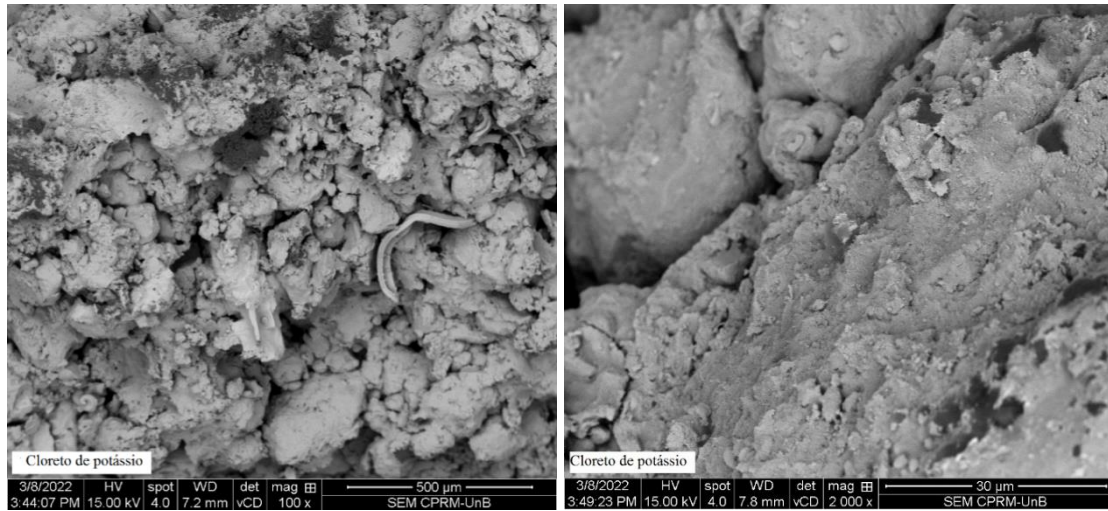


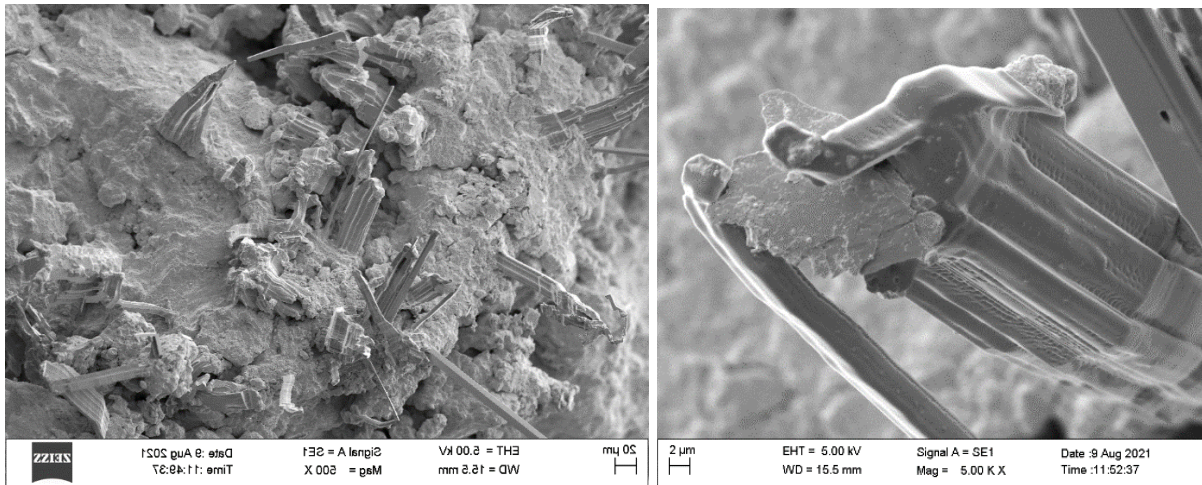
Figura 4.19. MEV da mistura solo-ureia: 66 x (a); 1000 x (b); 2000 x (c).

A Figura 4.20 apresenta as imagens obtidas para a mistura solo laterítico-cloreto de potássio. Duas particularidades são observadas nestas figuras: 1) o cloreto de potássio propicia a desagregação do solo (b, c); 2) o cloreto de potássio gera elementos alongados no solo (a, c, d). Esse potencial desagregador foi constatado por Pérez (2018) por meio de análises granulométricas.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 4.20. MEV da mistura solo-cloreto de potássio: 100 x (a); 2000 x (b); 500 x (c); 5000 x (d).

A Figura 4.21 apresenta as imagens obtidas para a mistura solo laterítico-Super simples sobresaindo desagregações na fração mais fina do solo. Tal constatação converge para os resultados obtidos por Pérez (2018) nas análises granulométricas realizadas para esse solo laterítico, uma vez que a mistura se desagrega quando entra em contato com a água.

Figura 4.22 apresenta as imagens obtidas para a mistura solo laterítico-SUC destacando uma pronunciada desagregação nas Figura 4.22 (a) e (c) e o surgimento de cristais na Figura 4.22 (b). Pérez (2018) evidenciou nas análises granulométricas realizadas a ação desagregadora desta mistura.

A similaridade do que se observa nas imagens realizadas no MEV (Figura 4.17 a Figura 4.22) com aquelas observadas na lupa para o solo laterítico (Figura 4.15), apontam para a representatividade das imagens observadas na lupa para o solo saprolítico (Figura 4.16). Cabe

ressaltar que as possíveis diferenças percebidas entre estas duas metodologias executadas, tem a ver com a variabilidade inerente aos corpos de prova utilizados em cada ensaio, mas que ao se fazer a análise global dos resultados, isto é, considerando os resultados das distribuições granulométricas, pode-se verificar a convergência do observado.

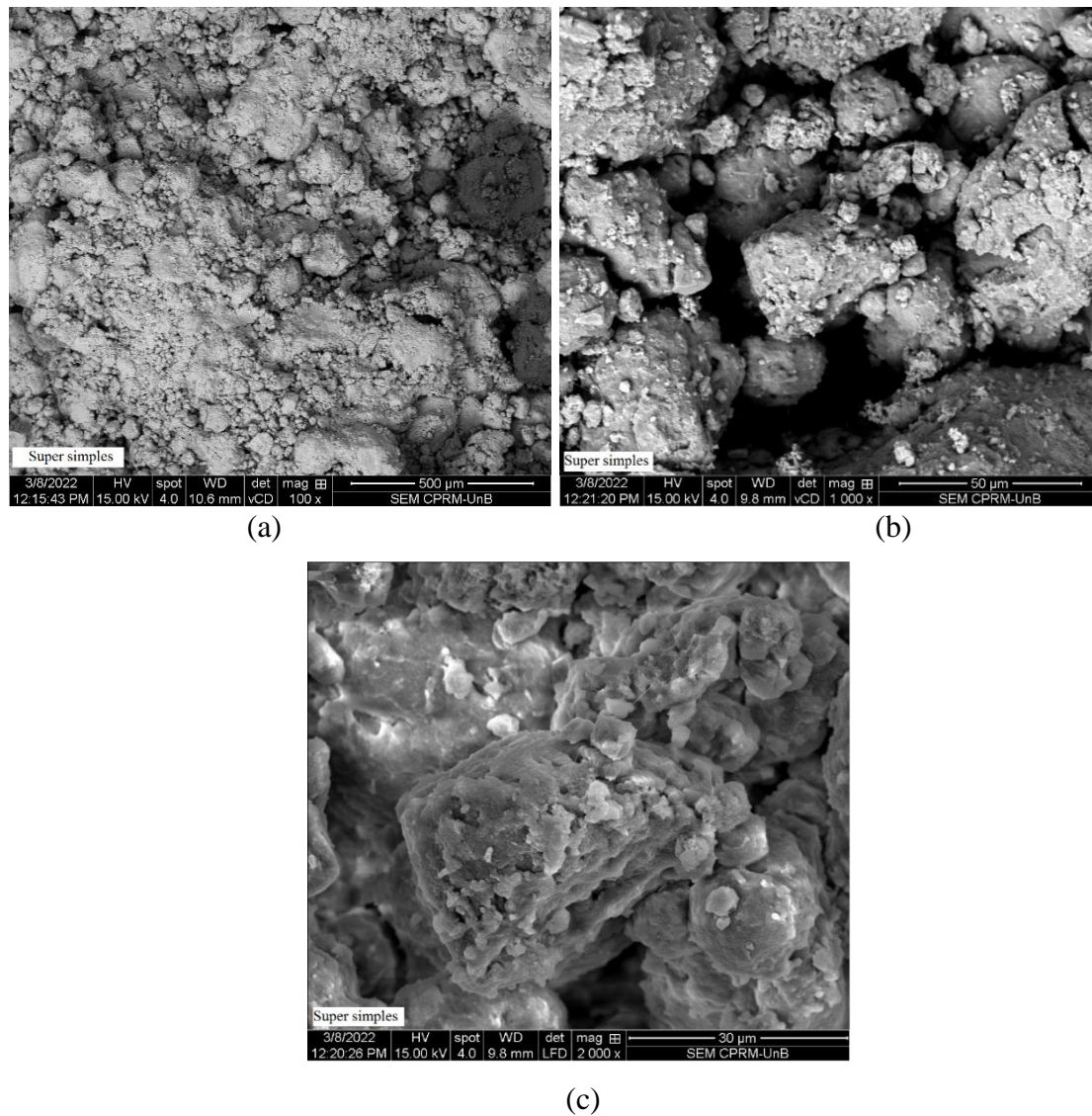


Figura 4.21. MEV da mistura solo-Super simples: 100 x (a); 1000 x (b); 2000 x (c).

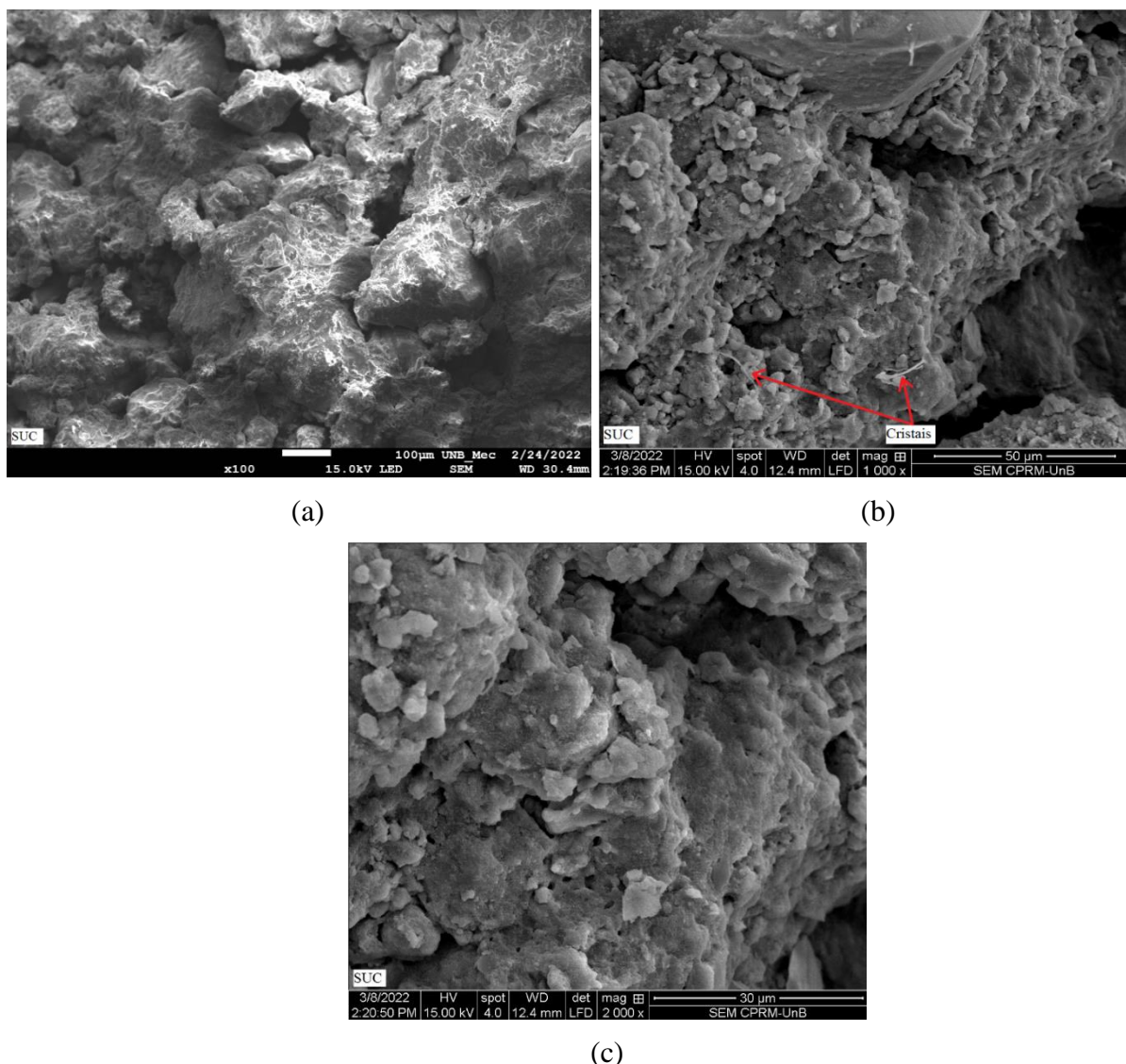


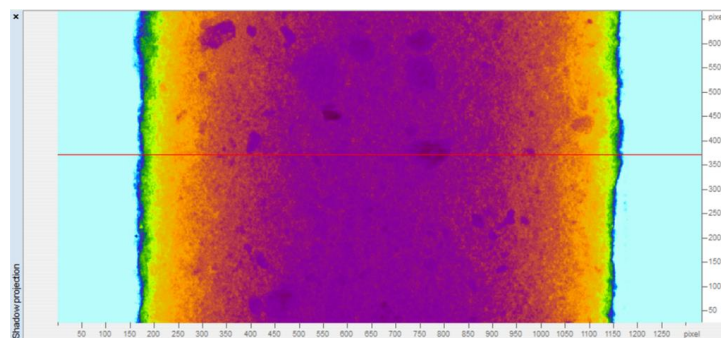
Figura 4.22. MEV da mistura solo-SUC: 100 x (a); 1000 x (b); 2000 x (c).

4.3.3. Microtomografia computadorizada (microCT)

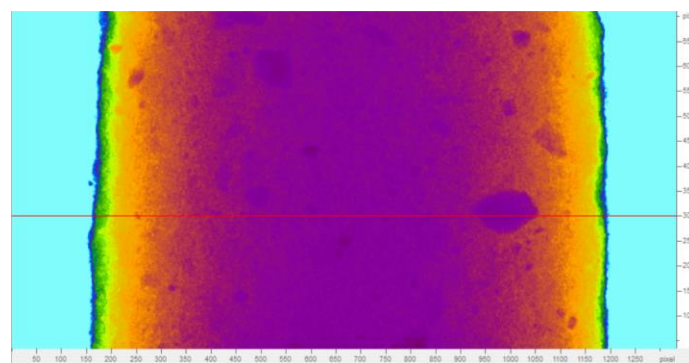
Os resultados que serão apresentados a seguir, foram feitos com o intuito de conhecer melhor a estrutura interna do solo laterítico e das misturas em que foi utilizado. Cabe destacar que diferentemente das imagens obtidas com a lupa e com o MEV, onde os corpos de prova (CP) foram compactados dinamicamente, neste experimento eles foram compactados estaticamente buscando fazer com que ficassem com a mesma massa específica aparente seca de campo. Este ensaio foi feito apenas para o solo natural e para as misturas com Super simples, ureia e cloreto de potássio.

Inicialmente na Figura 4.23, são apresentadas as imagens bidimensionais de cada uma das amostras. A importância dessa análise se volta para a visualização da densidade. No geral

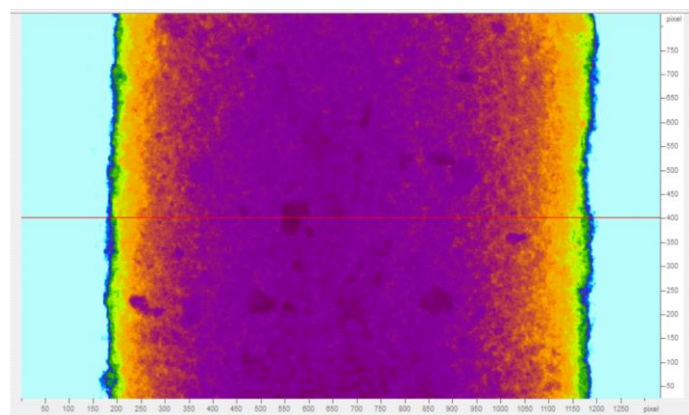
é possível observar que na região próxima às bordas o CP tem menor densidade, o que é indicado pelas cores azul, verde e amarelo, enquanto na região central a densidade é maior e indicada pela cor roxa com visualização de clastos, os quais apresentam diferentes densidades devido à variação na tonalidade da cor roxa. De forma específica é observado que a mistura com o cloreto de potássio, aparentemente, apresenta maior densidade que o solo sem tratamento (maior área de cor roxa) a qual estaria relacionada à desagregação gerada por ele (Pérez, 2018), e como se observou para o caso da amostra de cloreto de potássio compactada dinamicamente (Figura 4.11), esta pode gerar uma diminuição no índice de vazios o que contribui para este resultado.



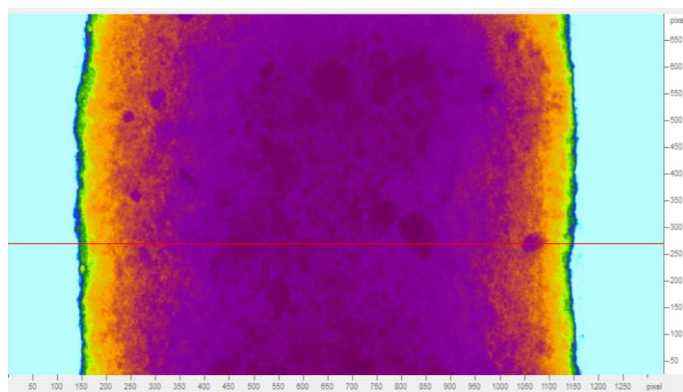
Natural



Super simples



Ureia

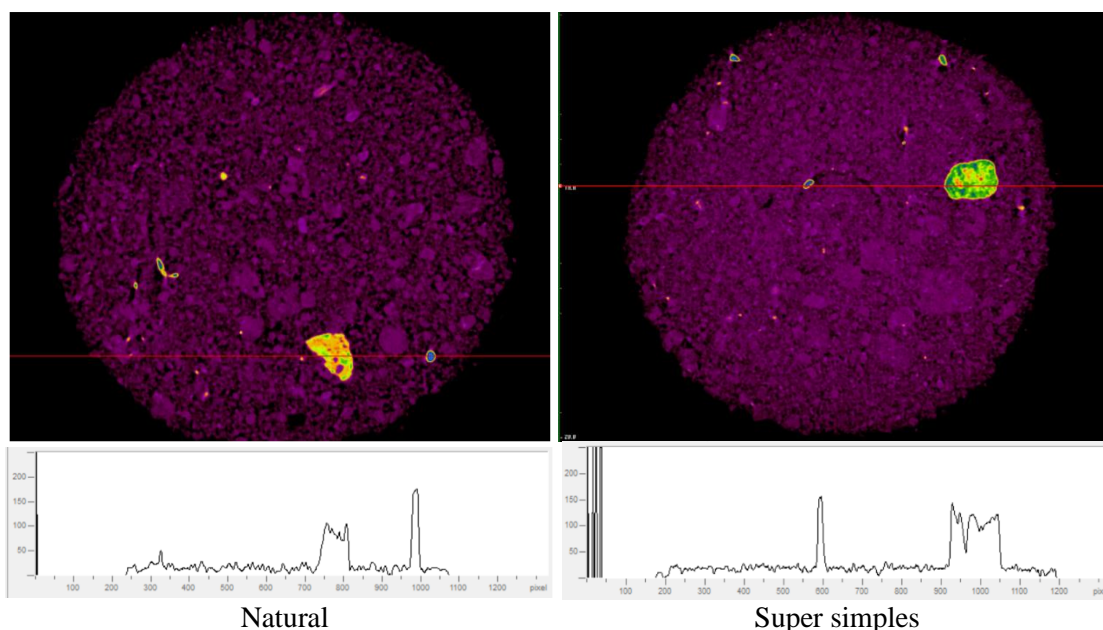


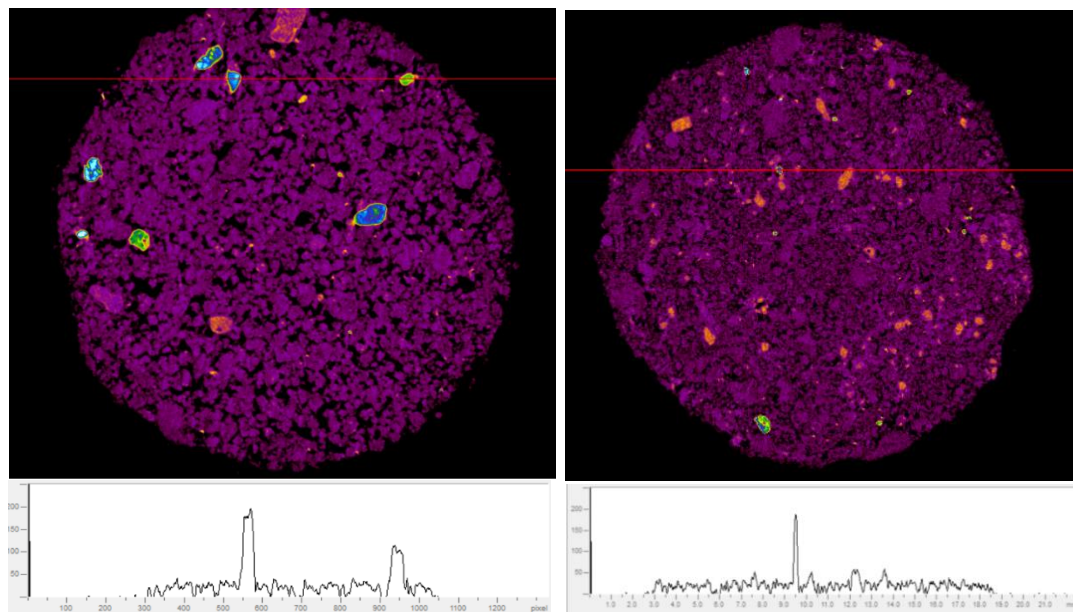
Cloreto de potássio

Figura 4.23. Capturas bidimensionais obtidas do ensaio de microCT

Também se observa uma diferença na textura da imagem, com o Super simples a textura apresentada é mais lisa em comparação com o solo natural, enquanto a ureia apresenta uma textura mais porosa. Cabe lembrar que uma vez que o solo entra em contato com a ureia, este fica mais úmido em relação às outras misturas, o que geraria em consequência da maior quantidade de água ao redor das partículas, a oclusão da fase ar, impedindo assim o seu fluxo e distribuição na estrutura do solo durante a compactação, contribuindo no final para a textura observada.

Na Figura 4.24 são mostrados os perfis de atenuação de um plano do topo para cada uma das amostras. Estas figuras mostram tanto a porosidade quanto a análise de densidade para uma zona específica (linha vermelha), sendo que o maior pico corresponde à maior densidade.





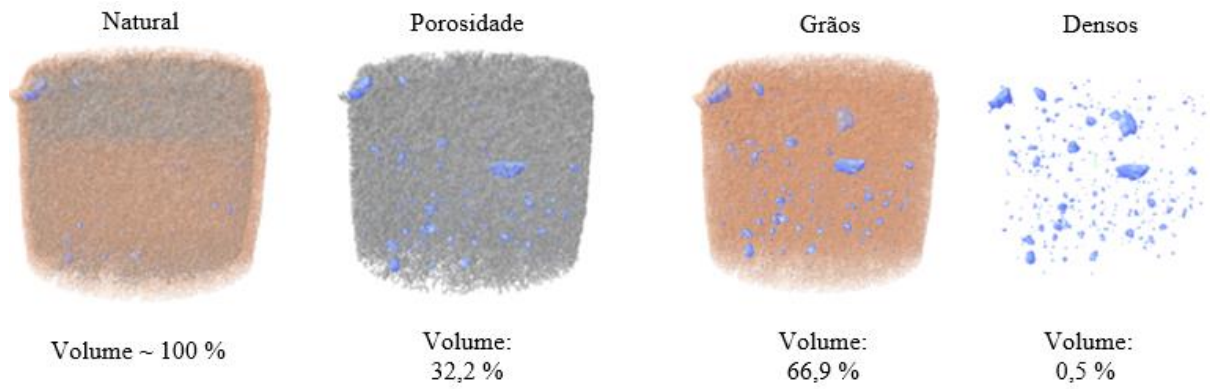
Ureia

Cloreto de potássio

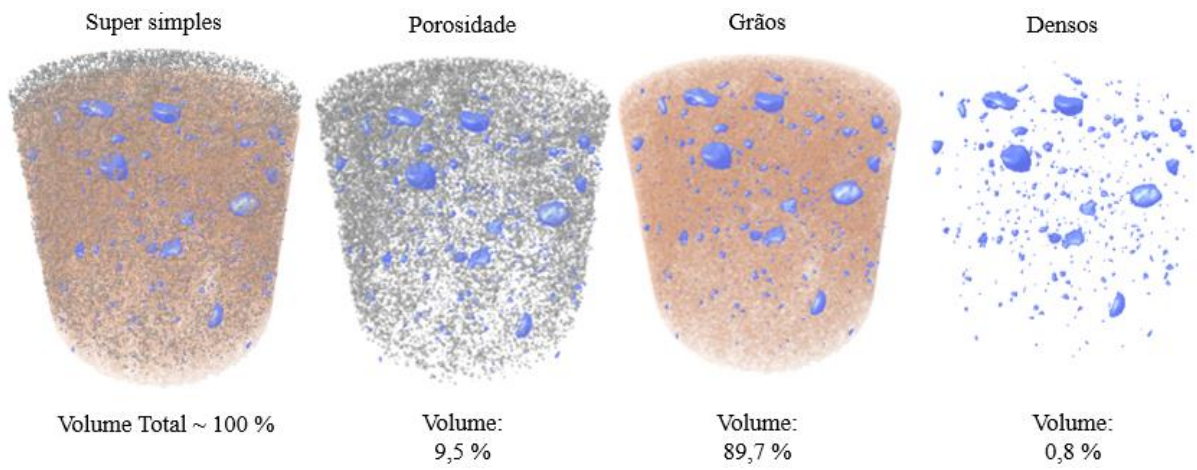
Figura 4.24. Perfis de atenuação com análise de densidade para os materiais sobre a linha vermelha

Da Figura 4.24 é clara a diferença de porosidade entre cada um dos planos avaliados para cada amostra, sendo a mistura com a ureia a mais porosa e a do Super simples a mais densa. No caso das misturas com o cloreto de potássio e a ureia, se observam partículas com densidades diferentes distribuídas na área do plano avaliado, os quais podem ser os cristais que formam estes fertilizantes a baixa umidade, partículas de minerais ou fertilizante que não foi dissolvido.

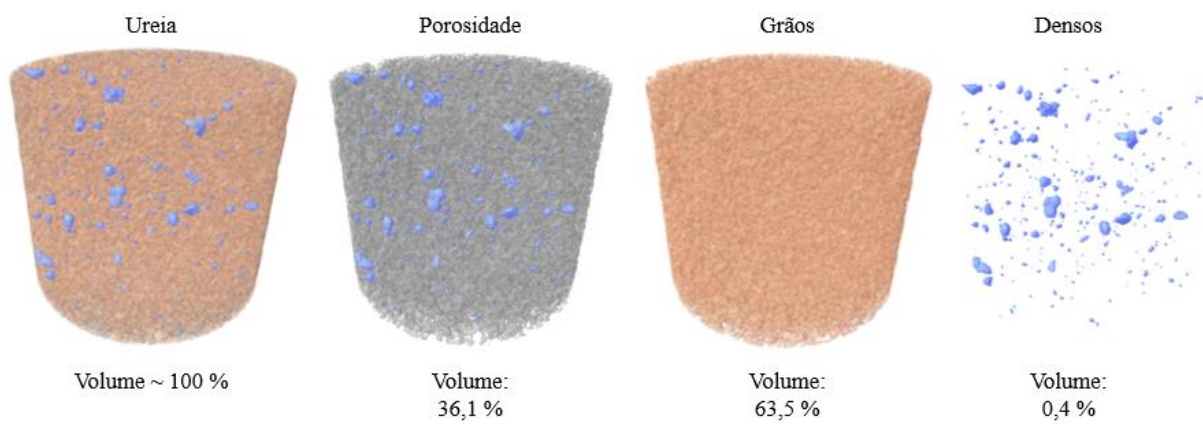
Na Figura 4.25 são apresentados os modelos de análise em 3D registrando a porosidade total e a porcentagem de grãos e materiais mais densos. Cabe destacar que Perez (2018) determinou que destas misturas avaliadas, a do cloreto de potássio foi a que menos solubilização apresentou, seguido pelo Super simples, enquanto a ureia se solubiliza na sua totalidade, desde que não exista saturação química. Considerando o exposto pode ser observado na Figura 4.25 que para a mistura com o cloreto de potássio foram registrados dos tipos de grãos, os seja, dois grupos de grãos com densidades diferentes, sendo o de maior porcentagem (grãos 1) o correspondente às partículas de solo e o de menor porcentagem (grãos 2) provavelmente corresponda a partículas desse fertilizante que não foram solubilizadas e aos cristais que se geram quando o solo está na umidade higroscópica.



Natural



Super simples



Ureia

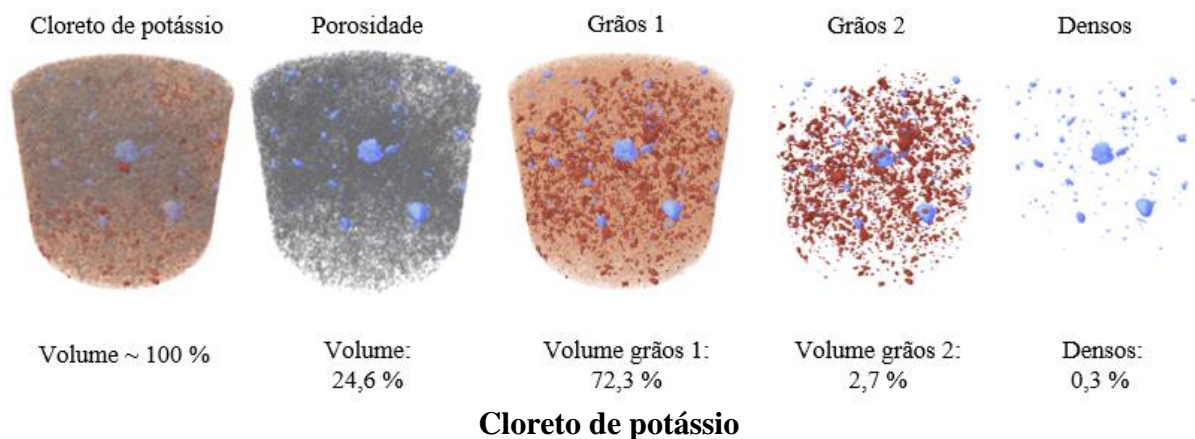
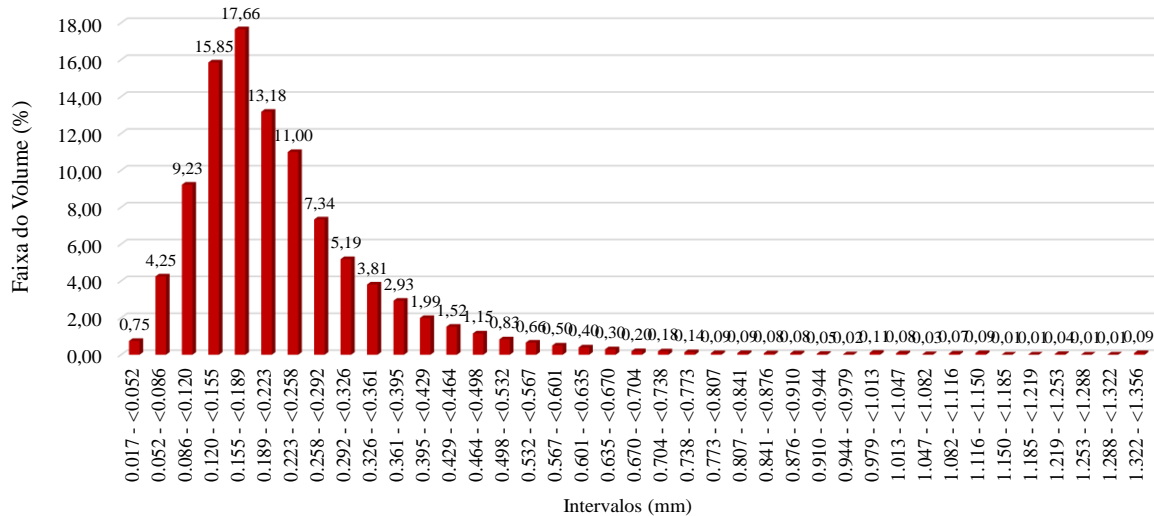


Figura 4.25. Análise 3D apresentando o volume de poros, de grãos e de partículas mais densas do solo laterítico em cada uma das misturas estudadas.

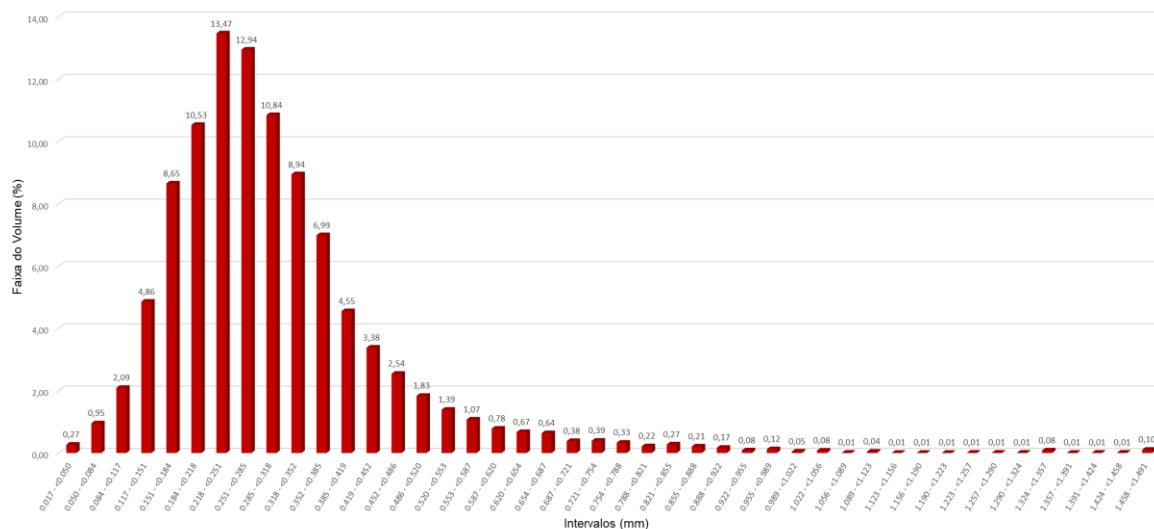
Por outro lado, é possível estimar que a maior porcentagem de grãos densos apresentada para a mistura com o Super simples, se deve a partes deste fertilizante que não se distribuíram corretamente durante a mistura com o solo e devido à menor solubilização que este insumo apresenta (Perez, 2018). Como já se tinha observado nas imagens anteriores, a mistura com a ureia é a que apresenta maior porosidade e a do Super simples é a mais densa.

Finalmente a Figura 4.26 apresenta a distribuição do volume de poros para cada mistura avaliada. Inicialmente pode se notar que a mistura com o Super simples apresenta, mesmo em baixa quantidade, os poros de maior tamanho (até 1.5 mm), seguido pelo solo natural (até 1.36 mm) e as misturas com a ureia e o cloreto de potássio (até 1 mm). Cabe lembrar que os corpos de prova (CP) utilizados nesse ensaio foram compactados estaticamente tentando representar a densidade de campo, enquanto os CPs utilizados na determinação da curva característica de retenção de água no solo, foram compactados dinamicamente para atingir uma altura determinada. Mesmo assim, foram as misturas com o Super simples e o cloreto de potássio as que apresentaram respectivamente, maiores e menores índices de vazios (Figura 4.10a), indicando uma concordância nestes resultados. O fato de ter tamanhos de poros maiores ou menores faz com que haja mais ou menos amplitudes de classe, fato pelo qual a mistura com o Super simples mostra um maior número de barras que por exemplo a mistura com a Ureia.

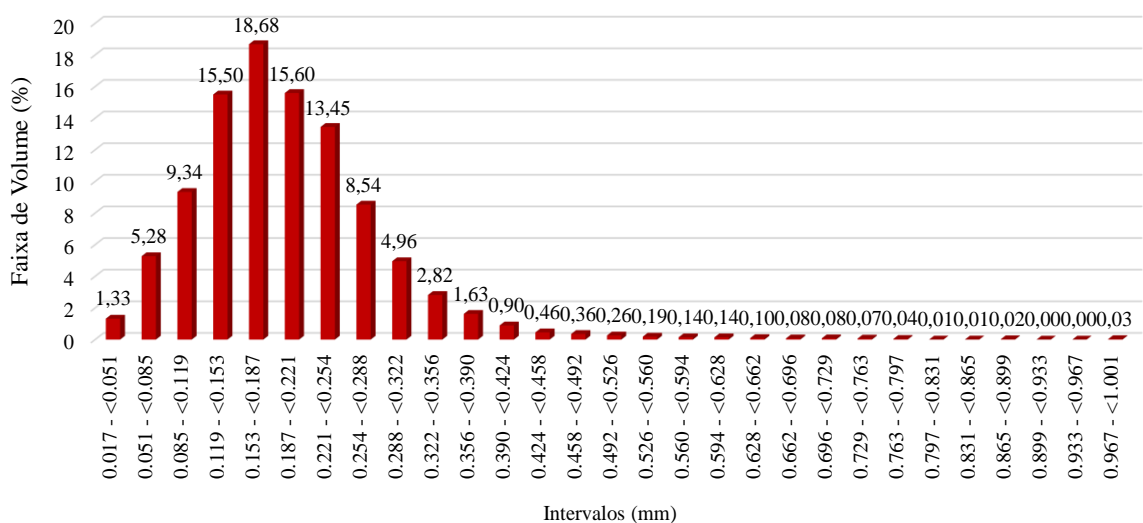
Solo Natural



A02 - Super Simples: Distribuição do Volume de Poros



Ureia



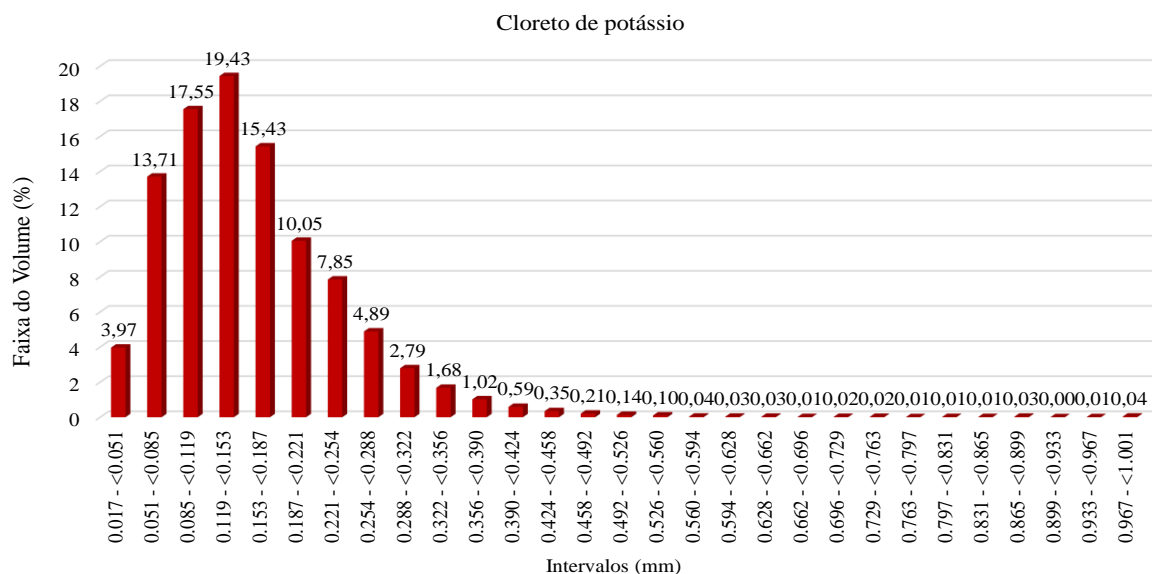


Figura 4.26. Distribuição do volume de poros para o solo natural e para cada mistura avaliada.

Na Figura 4.26 também se observa que cada mistura apresenta uma amplitude de classes que é mais representativa (maiores porcentagens), variando todas desde 0,017 mm até: <0,39 mm no caso do cloreto de potássio, <0,42 mm para a ureia, <0,5 para o solo puro e <0,59 mm para o Super simples.

4.3.4. Curvas características de retenção de água no solo

Como definido na metodologia, Capítulo 3, as curvas características solo-água foram determinadas usando-se a técnica do papel filtro e de modo a contemplar no estudo a análise de um solo profundamente intemperizado e de um solo pouco intemperizado utilizou-se respectivamente um solo laterítico contendo agregações em seu estado natural e um solo saprolítico com presença de partículas não agregadas e eventuais pacotes de argila.

Cabe lembrar que geralmente são consideradas três curvas características solo-água, a matricial, a osmótica e a total que corresponde à soma dessas duas. As três são tratadas nessa tese, a sucção matricial devido a perturbação estrutural gerada pelos insumos químicos, a osmótica devido a sua sensibilidade à alteração química do meio, que no presente caso é proporcionada pelos insumos químicos, e a total, em especial porque utilizou-se como metodologia a determinação da sucção osmótica por meio da diferença entre a sucção total e a sucção matricial.

Como já apresentado, a textura, estrutura e índice de vazios de um solo pode mudar quando os argilominerais que o compõem reagem com os elementos contidos em cada fertilizante, gerando assim variações na curva característica de retenção de água no solo.

Como foi mencionado na metodologia, o tempo adotado para que o conjunto solo – papel filtro colocado no interior das capsulas entrasse em equilíbrio, foi de 15 dias, porém, nos primeiros experimentos realizados, se observou que nesse tempo eram gerados fungos no papel filtro, como mostrado na Figura 4.27. Considerando que a presença desses organismos vivos gera uma variação no peso do papel filtro e, portanto, erros nos valores de sucção calculados, o tempo de equilíbrio foi reduzido para 10 dias, tempo que ainda é válido, já que segundo a norma ASTM D5298 (2016), o tempo mínimo deve ser de 7 dias.



Figura 4.27. Fungos no papel filtro após o período de 15 dias.

4.3.4.1. Sucção mátrica

A Figura 4.28 apresenta as curvas características de sucção mátrica do solo laterítico estudado em função da umidade (a) e do grau de saturação (b). Cabe destacar que nas curvas características de sucção em função da umidade gravimétrica, não se tem a influência diretamente considerada do índice de vazios embora indiretamente ele interfira nos resultados.

Na Figura 4.28a é observado que os valores de sucção mátrica para as misturas com Super simples e com calcário dolomítico, na região dos microporos, foram bem similares aos obtidos para o solo natural, o que poderia indicar a não influência desses produtos na microestrutura dos microporos do solo, porém, se observa uma diminuição no valor de umidade do ponto de entrada de ar nos microporos com relação ao solo natural, o que indica estar ocorrendo uma diminuição do volume de microporos, devido à desagregação pelo Super simples (Pérez, 2018) e da ampliação do pH, gerando assim a necessidade de uma menor quantidade de água para encher a zona de microporosidade

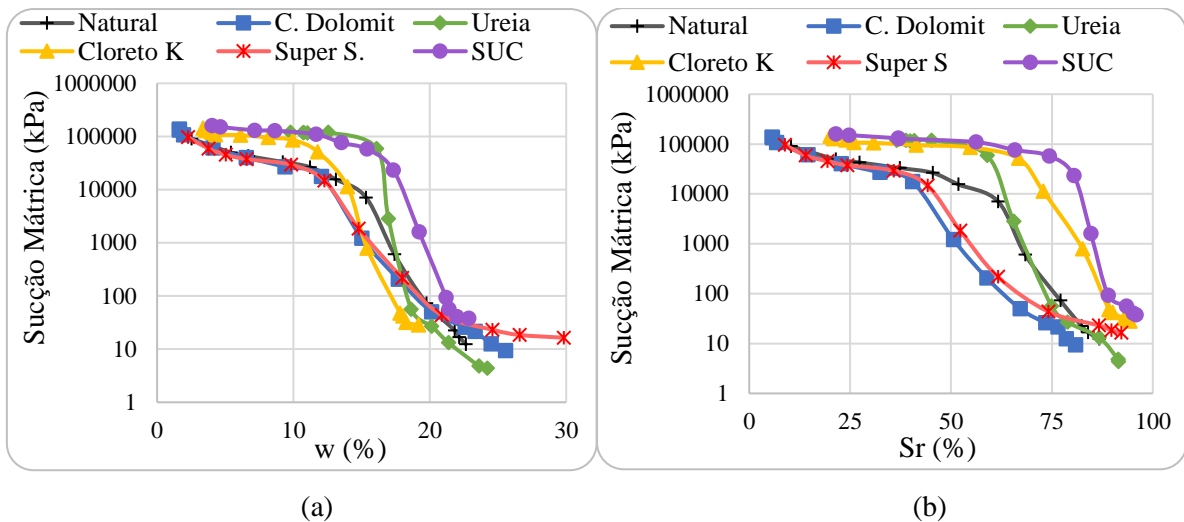


Figura 4.28. Curvas características da sucção mátrica do solo laterítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).

No caso do cloreto de potássio, além da redução do volume de microporos (Figura 4.28a), observa-se um aumento da sucção na zona dos microporos, indicando que estes estariam apresentando uma diminuição no seu tamanho, devido, provavelmente, à cristalização que experimenta este fertilizante com a perda de umidade, tal como se mostra na Figura 4.14a. Estes cristais estariam tanto fechando completamente alguns microporos como diminuindo o tamanho de outros e, portanto, a redução do volume de microporos não pode ser associada diretamente a fenômenos de desagregação como sugerido para o calcário dolomítico e o Super simples.

Observa-se ainda na mesma figura que os fertilizantes ureia e o composto SUC, também apresentaram um incremento nos valores da sucção na zona de microporosidade, que como foi exposto anteriormente para o cloreto de potássio, isto pode estar relacionado ao fenômeno de cristalização no interior dos microporos, o qual contribui para a diminuição dos seus tamanhos, lembrando que a ureia também se cristaliza com a perda de umidade (Schmid *et al.*, 2018) (ver Figura 4.13a), e que o SUC contém estes dois produtos químicos na sua composição. No caso destes dois agentes químicos, o valor de umidade do ponto de entrada de ar nos microporos, foi bem similar ao correspondente ao solo natural, indicando que estes estariam apresentando um incremento na quantidade de microporos, aumento que estaria ocorrendo pela formação de novos grumos, produto da união de partículas desatreladas na desagregação gerada por eles e de outras partículas que não compunham as agregações.

Na zona dos macroporos da Figura 4.28a, tem-se que a ureia tende a apresentar o mesmo comportamento do solo natural. Já no caso do Super simples e do calcário dolomítico, estariam se formando macroporos menores, já que os valores de sucção tenderam a ficar maiores,

indicando com isso uma diminuição no tamanho dos poros conforme indicado na introdução a esse item 4.4.

Também se mostra uma verticalização das curvas características de retenção de água registradas para ureia, cloreto de potássio e composto SUC no trecho intermediário entre os macro e microporos, em especial para a mistura contendo ureia e analisada em função do teor de umidade (Figura 4.28a), o qual sugere uma redução desses poros aqui considerados como mesoporos.

Nas curvas características apresentadas na Figura 4.28b, se observa que as curvas correspondentes às misturas com cloreto de potássio e SUC, apresentaram um deslocamento para a direita com relação às curvas apresentadas na Figura 4.28a, isto devido ao incremento nos valores de grau de saturação causado pela diminuição do índice de vazios para estes dois produtos químicos, tal como foi discutido nas análises da Figura 4.10a. Adicionalmente para o cloreto de potássio é possível observar que houve uma redução no volume de poros já que a curva tende a ficar mais do lado esquerdo da curva sem tratamento, ou seja, precisa de menor quantidade de água para se saturar, e além disso, apresentou um aumento no tamanho dos macroporos (parte final das curvas) já que registra menores valores de sucção nesta zona (Figura 4.28). Já o posicionamento das curvas da mistura com o SUC em relação ao solo puro e demais misturas, ou seja, deslocada um pouco mais para cima, indicam uma redução principalmente do tamanho dos poros da zona de mesoporos, sobressaindo também o surgimento de macroporos, porém com menores dimensões devido ao incremento da sucção com relação ao solo natural e às demais misturas.

Avaliando as misturas com Super simples e calcário dolomítico (Figura 4.28b), se observou um comportamento inverso ao apresentado pelas misturas com o SUC e o cloreto. Nesse caso o deslocamento das curvas se deu para a esquerda e devido a um pequeno aumento no índice de vazios (Figura 4.10a). No caso da mistura com a ureia, não se apresentaram mudanças significativas, isto devido a que a variação do índice de vazios não foi tão grande, ficando numa faixa relativamente próxima do solo natural.

A Figura 4.29 mostra as curvas características de sucção mátrica do solo saprolítico estudado em função da umidade (a) e do grau de saturação. Antes de adentrar nas discussões dos resultados de curvas características obtidos para a profundidade de 11 m, cabe destacar que, nos solos saprolíticos os agregados e microagregados geralmente se fazem ausentes encontrando-se as partículas livres para interagirem entre elas e com o meio circundante,

mesmo aquelas compondo eventuais pacotes de argila. Com isso, o impacto dos diferentes insumos minerais utilizados nas curvas características é realçado segundo sua capacidade de interação com os argilominerais presentes no solo. Destaca-se ainda que neste solo a microporosidade não se encontra no interior de agregados, mas sim entre partículas não agregadas.

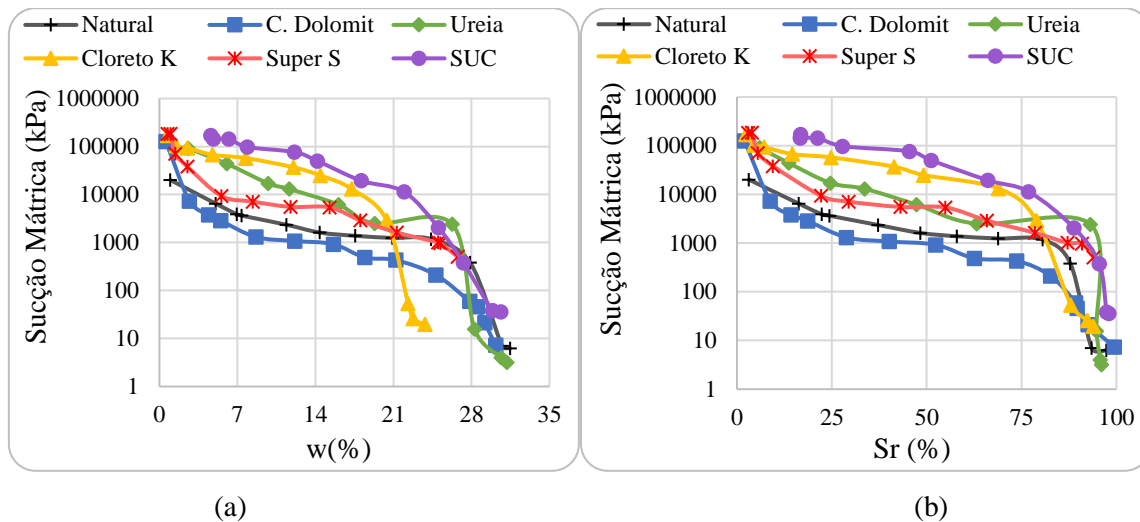


Figura 4.29. Curvas características da sucção mátrica do solo saprolítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).

Nesta profundidade, tendo observado o exposto no parágrafo anterior, percebe-se na zona de menor porosidade uma maior variação nos valores de sucção mátrica em comparação com o solo laterítico, pois ela passa a depender não mais da porosidade interna das agregações, mas sim dos poros formados entre as partículas em função dos aditivos químicos incorporados ao solo. Nesta camada, há também maior troca iônica devido, em especial, à presença da Ilita, a qual apresenta maior capacidade de troca catiônica (10 a 40 meq/100g) que a Caulinita (3 a 15 meq/100g), argilomineral com alta presença no solo laterítico segundo o apresentado por Pérez (2018).

Na Figura 4.29 se observa um certo escalonamento da influência do composto químico sobre a sucção mátrica logo após a entrada de ar no solo. Assim, por exemplo, para a umidade de 14% o escalonamento da sucção mátrica se dá na seguinte ordem crescente: calcário dolomítico (922 kPa), Solo Natural (1614 kPa), Super simples (5400 kPa), ureia (6164 kPa), cloreto de potássio (24957 kPa) e SUC (4987 kPa). Em termos de umidade se verifica nos resultados obtidos para a mistura com o cloreto de potássio, a necessidade de menor umidade para a sua saturação assim como para o início da entrada de ar nos poros menores.

O calcário dolomítico foi o único fertilizante que apresentou uma redução nos seus valores de sucção em relação ao solo natural (Figura 4.29), apontando para um aumento no tamanho dos poros. No caso do cloreto de potássio a umidade máxima registrada foi de aproximadamente 24%, enquanto que a média das outras misturas incluindo o solo de referência, foi de aproximadamente 31%, ou seja, o cloreto gera uma alteração na estrutura do solo que faz com que esta mistura precise de menor quantidade de água para se saturar, pois na Figura 4.29b todas as curvas atingem aproximadamente a mesma porcentagem máxima.

A Figura 4.30 mostra a diferença de comportamento entre a mistura com o cloreto de potássio e a mistura com o Super simples para o máximo grau de saturação gerado nos ensaios, cabendo destacar que, como foi mencionado anteriormente, a umidade da mistura no caso do cloreto de potássio é inferior a da mistura com o Super simples. A mudança na forma do corpo de prova preparado com o cloreto de potássio estaria ocorrendo pelo incremento na concentração de sais que gera este fertilizante, os quais fariam com que a espesura da dupla camada aumente, aumentando o espaço poroso e, portanto, diminuindo a força de atração entre as partículas, o que faz com que as ligações entre elas fiquem instáveis, produzindo ao final a deformação observada compreendendo uma compressão vertical e o abaulamento das bordas.



Figura 4.30. À esquerda mistura com o cloreto de potássio e à direita com o Super simples. Os dois corpos de prova apresentam aproximadamente o mesmo grau de saturação.

As curvas de sucção transformada, são apresentadas na Figura 4.31 segundo o estabelecido por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004). Dado o exposto previamente para este tipo de curvas é observado que no caso do solo laterítico (Figura 4.31a), efetivamente é apresentado uma variação na distribuição de poros e que as suas propriedades químico-mineralógicas também podem mudar, do contrário todos os pontos das diferentes misturas tenderiam a formar uma única curva, independente do índice de vazios. Novamente, as maiores alterações são apresentadas nas curvas correspondentes às misturas com ureia, cloreto de potássio e SUC. No caso do solo saprolítico (Figura 4.31b), se observa que existe menos alteração da forma das

curvas, mas mesmo assim os pontos obtidos para todas as misturas não compõem uma única curva, indicando a influência das propriedades químicas dos aditivos que afetam as forças de adsorção intervenientes na sucção mátrica.

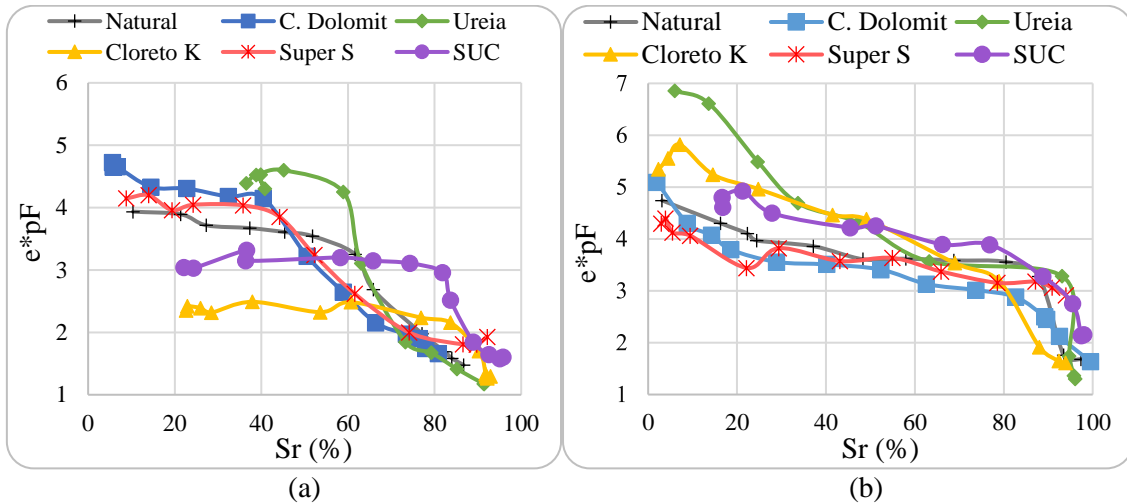


Figura 4.31. Curvas características transformadas das diferentes misturas com o solo laterítico (a) e saprolítico (b).

4.3.4.2. Sucção osmótica

A Figura 4.32 mostra o grande efeito na sucção osmótica dos dois solos avaliados decorrentes da presença dos diferentes insumos minerais utilizados. Destas figuras algumas observações de caráter geral podem ser destacadas. A primeira diz respeito ao fato de que aparentemente os fertilizantes estão a exercer pouca, ou mesmo nenhuma influência na sucção osmótica atuante nos microporos do solo laterítico (Figura 4.32a). Cabe destacar que essa tendência registrada para umidades um pouco inferiores às assumidas como correspondente à entrada de ar nos microporos, se deve provavelmente ao fato de que o equilíbrio iônico com o fluido presente no interior dos agregados e microagregados levaria um período de tempo maior que o adotado nos ensaios. Para o solo saprolítico (Figura 4.32b), tendo como referência ao solo laterítico com umidades inferiores a 10%, se observa não só sucções osmóticas distintas segundo o composto químico misturado ao solo, como também valores que superam à sucção osmótica obtida para o solo natural o que reforça o entendimento de que a química introduzida no solo ainda não está no tempo de ensaio gerando alterações nos microporos presentes no solo laterítico.

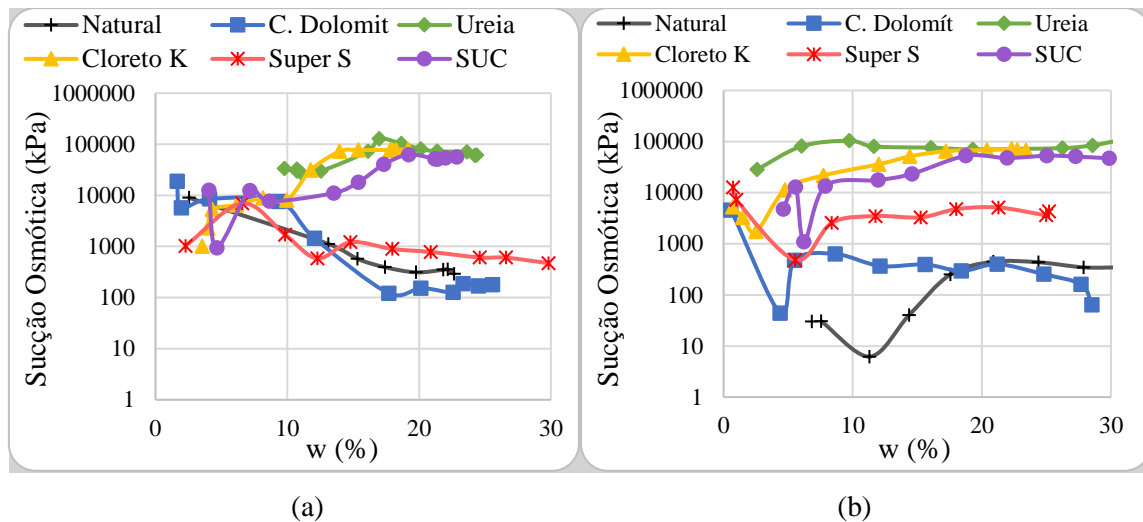


Figura 4.32. Curvas características da sucção osmótica em função da umidade para o solo laterítico (a) e saprolítico (b).

Como observações mais específicas, tem-se que no caso do solo laterítico misturado com o calcário dolomítico e o Super simples (Figura 4.32a) é apresentada a mesma tendência de comportamento que o solo natural, onde para a maior umidade há a menor sucção osmótica gerada, comportamento este semelhante ao comumente observado para a sucção mátrica. Estes fertilizantes apresentaram menores variações entre a sucção total e a sucção mátrica, indicando que o efeito da sucção osmótica não é tão relevante como nos demais casos e, portanto, os sais que fornecem, ou são poucos em comparação aos outros produtos químicos ou não reagem tão significativamente com os argilominerais presentes nesta profundidade

Para a ureia, o cloreto de potássio e o composto SUC (Figura 4.32a), o efeito sobre a sucção osmótica foi tal que não se gerou o tradicional formato de curva característica de retenção de água no solo verificado para a sucção mátrica, passando as curvas a apresentarem um comportamento inverso a este, mais especificamente com um incremento até aproximadamente o teor de umidade entre 15% e 20%, a depender do fertilizante, umidade a partir da qual a sucção osmótica apresentou tendência a manter-se constante. Considerando Fredlund (1993), estes produtos químicos estariam a gerar uma grande concentração de sais dissolvidos na água do solo, impedindo que as moléculas de água se evaporem, diminuindo a pressão de vapor e, portanto, aumentando a parcela da sucção osmótica, o que vai levar no final ao incremento nos valores de sucção total.

Cabe ressaltar que a zona dos meso e macroporos é onde mais se concentram os sais, por isso, a curva de sucção osmótica nessa região para o solo misturado com a ureia, o cloreto de Potássio e o SUC, aparecem visivelmente deslocada para cima. Já na zona dos microporos, o efeito dos fertilizantes na sucção osmótica é pequeno, principalmente para as umidades

inferiores ao ponto de entrada de ar nos microporos isso certamente devido ao fato de que ainda não ocorreu um equilíbrio químico entre as fases líquidas externa e interna aos agregados, o que é do ponto de vista das propriedades e comportamentos desses solos importante, pois com o tempo a ocorrência do equilíbrio pode levar a maior ou menor estabilidade dos agregados, conforme o caso.

Observa-se na Figura 4.32b obtida para o solo saprolítico, que para umidades superiores a 18%, os valores de sucção osmótica obtidos para a ureia, o cloreto de potássio e o SUC são próximos e superiores aos valores obtidos para o solo puro e com adição de calcário dolomítico, resultados estes, similares a partir da mesma umidade.

Os maiores valores de sucção osmótica do solo saprolítico (Figura 4.32b) quando misturado com a ureia, o cloreto de potássio, o composto SUC e em menor medida com o Super simples, indicam que os sais que fornecem estes fertilizantes reagem em maior quantidade com os argilominerais desta profundidade, fazendo com que uma maior quantidade de moléculas de água façam parte dessas reações, sendo a ureia a que gera maior aumento desta sucção que se mantém praticamente constante a partir da umidade 10%. No caso do calcário dolomítico, a sucção osmótica tende a diminuir com o aumento da umidade, indicando que quanto maior a quantidade de água livre na estrutura do solo, menor é a capacidade de retenção das moléculas de água devido à pouca disponibilidade de sais nesta mistura.

Destaca-se dessas análises que a sucção osmótica é função não apenas da composição químico-mineralógica do solo, mas também da composição química do meio e da zona de atuação nos poros. O fato de que o aumento do índice de vazios a partir de aproximadamente 17% de teor de umidade (Figura 4.10a) no caso do solo laterítico, e de 22% no caso do solo saprolítico (Figura 4.10b), conjuntamente com o aumento da umidade, não estejam levando a variações significativas na sucção osmótica, estão a indicar que em termos de película de recobrimento das partículas pelo fluido se mantém certa similaridade, tornando constante a concentração de sais.

Embora pouco considerada na avaliação do comportamento mecânico dos solos ela pode ter significativa influência tanto no solo não saturado como no solo saturado. Exemplificando, Quintero *et al.* (2017) mostra curvas de fluidez distintas obtidas em ensaios de limite de liquidez realizados sobre dois solos, um natural e o outro contaminado por churume proveniente de um aterro sanitário. A comparação torna-se interessante ao se constatar que naquela publicação os autores mostraram que para as umidades mais elevadas o número de golpes no equipamento de

Casagrande era bem maior para o solo contaminado, no entanto, ao diminuir a umidade essa diferença tornava-se menor chegando o comportamento a se inverter. Aqueles resultados, fazendo-se um paralelo com a sucção osmótica, são similares ao comportamento verificado para cloreto de potássio na Figura 4.32a.

4.3.4.3. Sucção total

A Figura 4.33 apresenta as curvas características obtidas para a sucção total em função da umidade (a) e do grau de saturação (b), para cada uma das misturas feitas com o solo laterítico. Em relação ao solo natural e como foi apresentado anteriormente, o grande efeito na sucção osmótica gerado pela ureia, o cloreto de potássio e o SUC aumentam a sucção total até o ponto de perder o tradicional formato de curva característica de retenção de água no solo (Figura 4.33a), sendo as curvas obtidas nestes casos quase uma linha horizontal devido à presença de sais, tal como foi explicado anteriormente.

No caso do Super simples e do calcário dolomítico, a curva de sucção total conservou a sua forma tradicional, ficando com valores similares na zona de microporos e menores na zona de mesoporos, sendo estes valores de sucção na zona dos macroporos maiores para o Super simples e menores para o calcário dolomítico. O exposto aponta para a influência da mineralogia na atuação da sucção osmótica para estes insumos minerais uma vez que as agregações e o tamanho das partículas muitas vezes está diretamente associado ao tipo de mineral presente no solo.

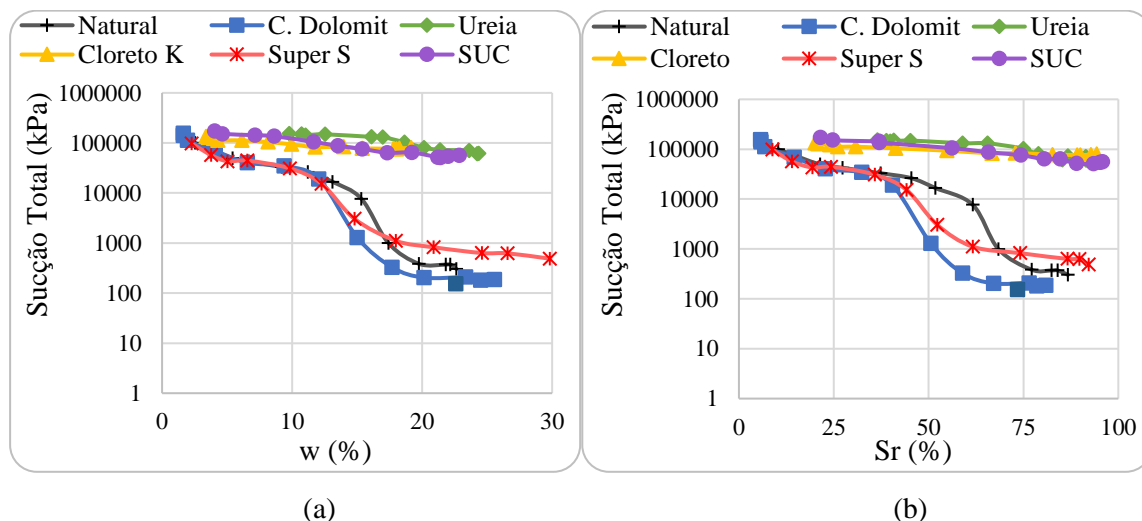


Figura 4.33. Curvas características da sucção total do solo laterítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).

A Figura 4.34 apresenta as curvas características obtidas para a sucção total em função da umidade (a) e do grau de saturação (b), para cada uma das misturas feitas com o solo saprolítico.

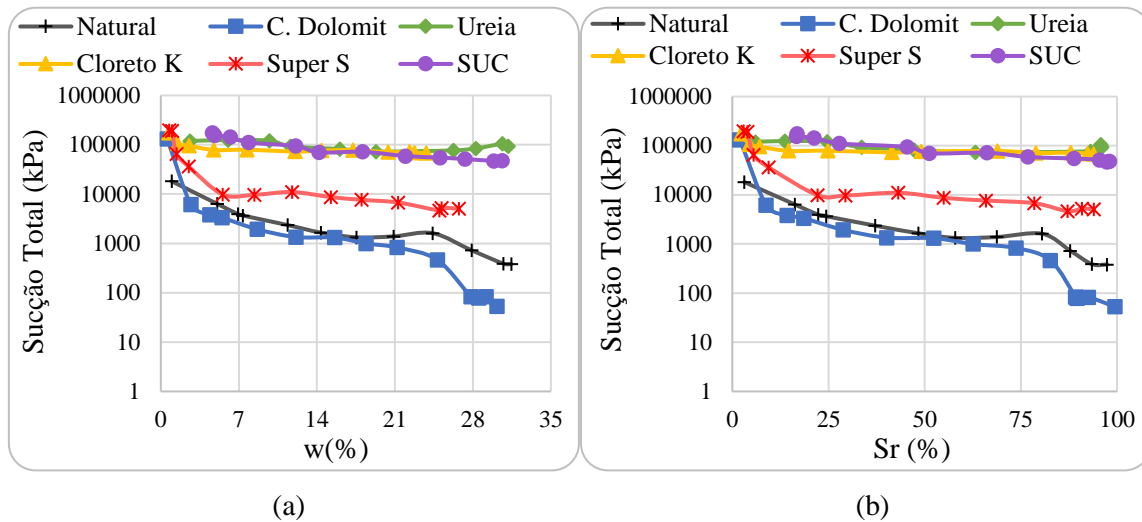


Figura 4.34. Curvas características da sucção total do solo saprolítico em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).

Na Figura 4.34a, embora ocorra o mesmo escalonamento crescente da sucção total como ocorreu nos resultados de sucção mátrica (Figura 4.29a) para o calcário dolomítico, solo natural e Super simples, as curvas para a ureia, o cloreto de potássio e o SUC ficaram muito semelhantes e horizontalizadas devido à ação dos sais. Segundo Pérez (2018), o Super simples foi um dos fertilizantes que mais gerou defloculação e/ou desagregação das partículas nos resultados de granulometria obtidos para essa profundidade sem o uso de defloculante, indicando com isso ser um dos que mais proporcionam trocas iônicas no solo, criando ligações mais fracas entre as partículas e, portanto, facilitando mudanças na estrutura. No entanto, foram novamente o SUC, o cloreto de potássio e a ureia os que mais afetaram a curva característica de retenção de água no solo em termos de sucção mátrica e em especial de sucção total.

No caso da mistura com o regulador de acidez, calcário dolomítico, a tendência foi muito similar à verificada para a curva de sucção mátrica obtida (Figura 4.29a), não fazendo sobressair uma maior relevância da sucção osmótica. Já a mistura com o Super simples apresentou um leve aumento nos valores de sucção total.

Outra observação que pode ser feita sobre estas curvas, é que em geral elas apresentam bastante horizontalidade para $S_r < 80\%$ e $w < 25\%$, apontando para uma diminuição uniforme

dos tamanhos de poros. Esses poros passam a aumentar de modo mais significativo para $S_r > 80\%$ e $w > 25\%$ como se observa na Figura 4.10b

Os resultados de sucção total analisados em função do grau de saturação nos dois tipos de solo (Figura 4.33b e Figura 4.34b), apresentaram comparativamente resultados similares aos obtidos quando da análise em função do teor de umidade das misturas.

4.4. ANÁLISES DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

O comportamento mecânico dos solos não saturados está diretamente ligado às sucções nele atuantes e estas dependem de fatores como composição químico-mineralógica do solo, química do fluido, porosidade, distribuição de poros, teor de umidade e distribuição da umidade. Na maioria dos casos prevalece como mais relevante o estudo da influência da sucção matricial no comportamento mecânico, no entanto, em situações envolvendo alterações químicas do meio e por consequência também do solo, faz-se necessário maior atenção às variações da sucção osmótica, das forças de interação entre partículas, assim como a possibilidade de solubilização de determinados compostos químicos presentes nos solos e que estão muitas vezes atuando como cimentos.

Quando do uso agrícola dos solos não raro torna-se necessário corrigir o seu pH e a ele adicionar nutrientes necessários ao cultivo das plantas, o que muitas vezes implica em mudanças significativas no seu comportamento. Embora tais ações se deem no manto mais superficial, as migrações de compostos e elementos químicos, assim como suas solubilizações e condução por meio dos fluxos para camadas mais profundas, torna relevante em muitos casos, análises mais amplas do impacto dos insumos sobre as propriedades e comportamento dos solos.

Diante do exposto serão analisados, neste item, os impactos da umidade, do índice de vazios, das sucções matricial e osmótica nos resultados dos diferentes ensaios feitos para avaliar o comportamento mecânico das misturas.

4.4.1. Resistência à tração por compressão diametral (σ_t)

Antes de avançar nas análises, dois aspectos merecem ser lembrados: o comportamento mecânico dos solos não saturados é função de outros fatores além da sucção mátrica; a resistência à tração do solo, seja ele profundamente intemperizado ou pouco intemperizado,

após aumentar com o crescimento da sucção atinge um estágio a partir do qual começa a diminuir. O comportamento correspondente ao segundo aspecto ocorre em solos agregados como os lateríticos quando a sucção se eleva passando a atuar de modo predominante nos seus microporos. Já nos solos pouco intemperizados, solos saprolíticos, valores elevados de sucção promovem o surgimento de fissuras comprometendo sua resistência à tração (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021; Valencia *et al.* 2007; Valencia *et al.* 2019). Como os insumos interferem na estabilidade dos agregados e geram alterações na sucção osmótica e nas forças interativas entre o fluido e os minerais afetando a própria sucção mátrica, cabe, no entanto, destacar que no presente estudo os insumos dão origem a comportamentos distintos em relação ao solo natural.

Na Figura 4.35 se apresentam os resultados de resistência à tração obtidos para o solo laterítico (a) e para o solo saprolítico (b) em função do teor de umidade. Observa-se nesta figura comportamentos distintos para os dois tipos de solo, além do fato das máximas resistências à tração obtidas para o solo laterítico, serem muito superiores às do solo saprolítico. As variações da resistência conforme o insumo utilizado, já demonstra por si só a necessidade de se dar maior importância às alterações químicas do meio e não apenas em consequência da adição de insumos minerais.

No caso do solo laterítico (Figura 4.35a), pode-se observar que a resistência à tração tende a diminuir com o incremento da umidade, sendo, no entanto, distintas as tendências de comportamento para as diferentes misturas. Cabe destacar o comportamento relativamente disperso e pouco sensível às variações de umidade quando essa se torna inferior à 15.3%, umidade correspondente à entrada de ar nos microporos em cada mistura (Figura 4.28a).

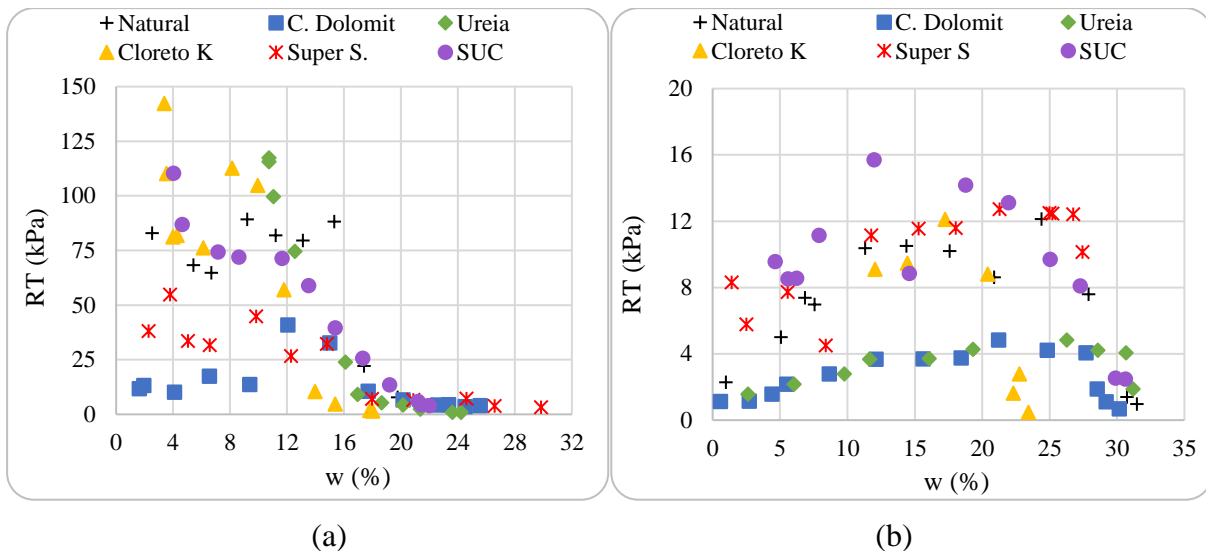


Figura 4.35. Resistência à tração (RT) em função da umidade (w): solo laterítico (a); solo saprolítico (b).

A mistura com o cloreto de potássio, a ureia e o SUC foram as que apresentaram o maior valor pico de resistência, devido a sua estrutura mais fechada (Figura 4.10) e aos maiores valores de sucção (Figura 4.33), enquanto que as misturas com o regulador de acidez e o Super simples apresentaram um comportamento contrário, sendo também coincidente com o apresentado na Figura 4.10a, já que tiveram maiores índices de vazios e menores valores de sucção.

Os resultados do solo saprolítico (Figura 4.35b) mostram que a depender do insumo mineral utilizado, a resistência e tendência de comportamento muda, indicando a importância das reações químicas na resistência do solo e não apenas do valor de sucção mátrica. As misturas com o Super simples, o SUC e o cloreto de potássio foram as que mais geraram desagregação nesse solo (Perez, 2018), fato que contribuiu para terem apresentado os menores valores de índice de vazios (Figura 4.10a) e, por consequência, a maior resistência (Figura 4.35b). Pelo contrário, a menor resistência da mistura com a ureia se deve tanto à cristalização gerada nas menores umidades, a qual contribuiu ao desenvolvimento de pequenas fissuras, quanto ao seu processo de hidrólise que faz com que apresente uma maior quantidade de água (menor sucção).

A Figura 4.36 mostra melhor o efeito do índice de vazios na resistência à tração indireta das diferentes misturas nos solos estudados. As tendências de variação da resistência à tração com o índice de vazios continuam distintas entre as misturas, no entanto, sobressai a tendência

geral esperada de diminuição da resistência à tração com o aumento do índice de vazios, sendo isto mais claro no caso do solo laterítico e as suas misturas.

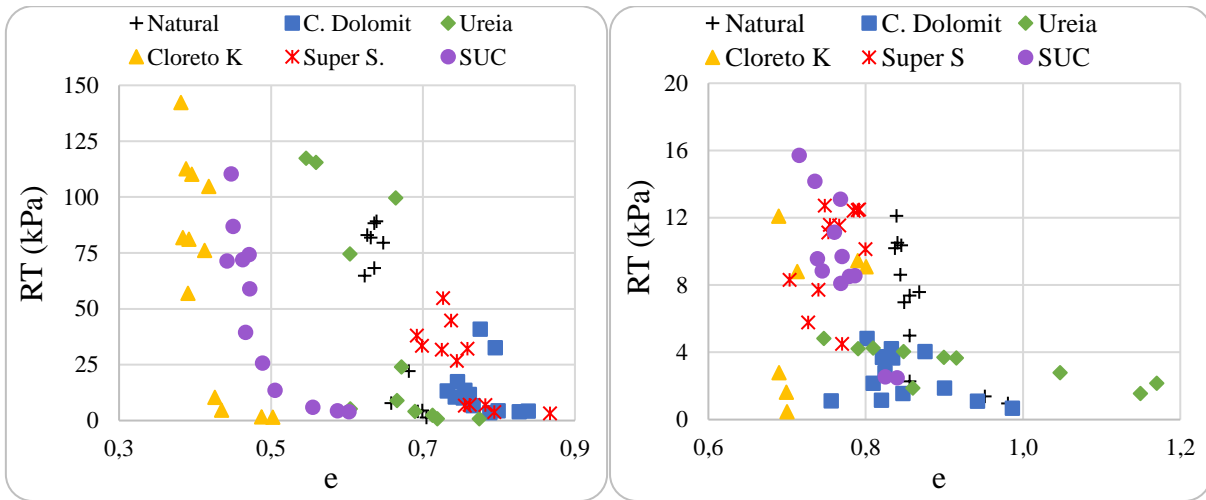


Figura 4.36. Resistência à tração (RT) em função do índice de vazios (e): solo laterítico (a); solo saprolítico (b).

Na Figura 4.37 são apresentados os resultados de tração indireta em função da sucção matricial atuante nos solos laterítico (a) e saprolítico (b). É conhecido que a água que se encontra na meso e macroporosidade é a que intervém no comportamento mecânico do solo. Quando essa camada de hidratação ao redor das partículas e dos agregados e microagregados, que é a que permite a interação mineral-mineral, agregado-mineral e/ou agregado-agregado desaparece, o solo experimenta uma diminuição da sua resistência pela perda da tensão capilar que contribuía para que tais interações fossem mais fortes.

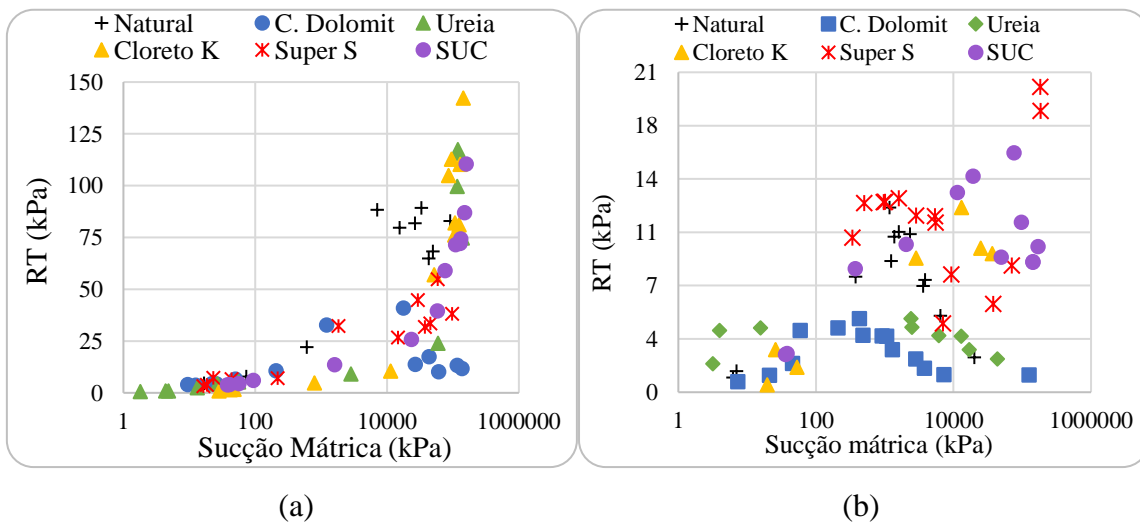


Figura 4.37. Resultados da resistência à tração (RT) em função da sucção mátrica para o solo laterítico (a); saprolítico (b).

Destaca-se que, considerando-se o conjunto de resultados obtidos, os valores de sucção matricial máxima alcançados nas duas misturas são similares, sendo de 159071 kPa no solo laterítico e de 169643 kPa no solo saprolítico, resultando, no entanto, em valores de resistência à tração nos dois solos bastante distintos. Essa constatação aponta para a necessidade de se considerar no estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados, não só a sucção matricial mas também a sucção osmótica e outros fatores como a composição químico-mineralógica do solo e do meio.

Avaliando especificamente os resultados obtidos para o solo laterítico sem tratamento e a sua mistura com o calcário dolomítico (Figura 4.37a), se observa, como foi mencionado no início deste item, que a resistência à tração vai aumentando com o acréscimo da sucção até o valor correspondente ao ponto de entrada de ar nos microporos, ou de outro modo, o ponto de término da saturação dos meso e macroporos, ponto no qual a resistência começa a diminuir e, como foi exposto no parágrafo anterior, isto se deve à perda da tensão capilar entre as partículas, partículas-agregado e/ou agregados/agregados.

Para as misturas com a ureia, o cloreto de potássio e o composto SUC (Figura 4.37a), tal comportamento esperado não foi evidenciado de modo claro, já que no começo, o incremento nos valores de resistência com a sucção foi muito baixo, porém, a partir do ponto de término da saturação dos macroporos, esses valores incrementaram muito, chegando a superar os valores do solo natural. Isto pode estar ocorrendo devido à cristalização que ocorre nestes três fertilizantes, fazendo com que os cristais formados entre as partículas, partículas-agregados e/ou agregados-agregados, uma vez evaporada toda a água da macroporosidade, contribuam para a união entre estes elementos, gerando assim esse incremento da resistência. Cabe ressaltar que os cristais se desmancham facilmente quando entram em contato com água, chegando a gerar erosão na superfície do corpo de prova, enquanto nos casos em que são feitos vários ciclos de secagem e umedecimento, o corpo de prova começa a apresentar fissuras tal como mostra as imagens da Figura 4.38 (a) e (b) respectivamente.

Na Figura 4.37b, pode ser observado que a exceção do Super simples, todas as misturas incluindo o solo sem tratamento atingem um ponto máximo de resistência, correspondente ao ponto de entrada de ar nos microporos, passando em seguida a diminuir com o incremento da sucção.

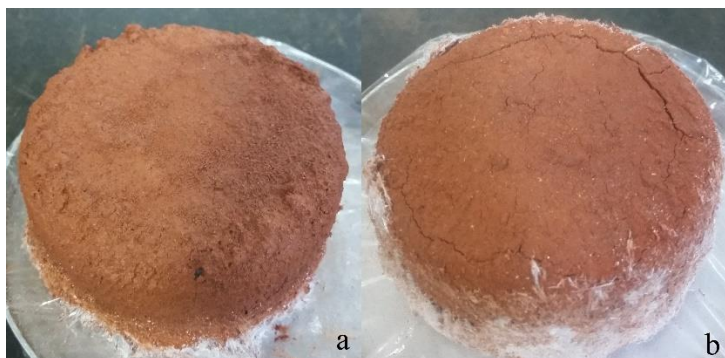


Figura 4.38. Corpos de prova compactados para o solo laterítico misturado com a ureia. a) Efeito do umedecimento dos cristais da ureia e b) efeito de ciclos de secagem e umedecimento.

No caso das misturas com a ureia e o dolomítico, em comparação com o solo sem tratamento (Figura 4.37b), se observaram valores inferiores de resistência com uma curva mais espalhada. No caso do cloreto de potássio, o ponto máximo de resistência ficou bem parecido com o solo natural e o composto SUC chegou a superar esse valor, talvez pelo efeito da cristalização previamente mencionado. Cabe ressaltar que nos resultados apresentados com o cloreto de potássio e a ureia, é menor a quantidade de pontos compondo a curva, devido a que os primeiros cinco corpos de prova correspondentes aos valores de sucção mais altos, se quebraram na sua totalidade, impedindo a execução do ensaio.

Os resultados de tração indireta em função do pF/e atuante nos solos laterítico (a) e saprolítico (b) são apresentados na Figura 4.39. Estas figuras mostram o efeito do índice de vazios (e) nos resultados, podendo se observar no caso do solo laterítico (Figura 4.39a) um deslocamento das curvas do cloreto de potássio e o SUC para a direita, isto devido a que estes fertilizantes serem os que menor índice de vazios geraram nos corpos de prova (Figura 4.10a). Por outro lado, os fertilizantes Super simples, ureia e dolomítico, tiveram um pequeno deslocamento para a esquerda devido ao aumento no índice de vazios com relação ao solo natural. Esta figura coloca em evidência a importante influência da porosidade no comportamento mecânico das misturas.

Por outro lado, na Figura 4.39b se observa que a tendência no comportamento é bastante similar ao obtido na Figura 4.37b, apenas mostrando um pequeno deslocamento para a direita relacionado com a redução do índice de vazios que experimentaram as misturas quando comparadas ao solo natural, principalmente a mistura com o Super simples, o cloreto de potássio e o SUC. É interessante observar que até o pico os resultados de resistência à tração em função da sucção tendem a serem inferiores aos obtidos para o solo sem aditivos. No entanto, após o pico, apenas a ureia e o calcário dolomítico mantêm este comportamento.

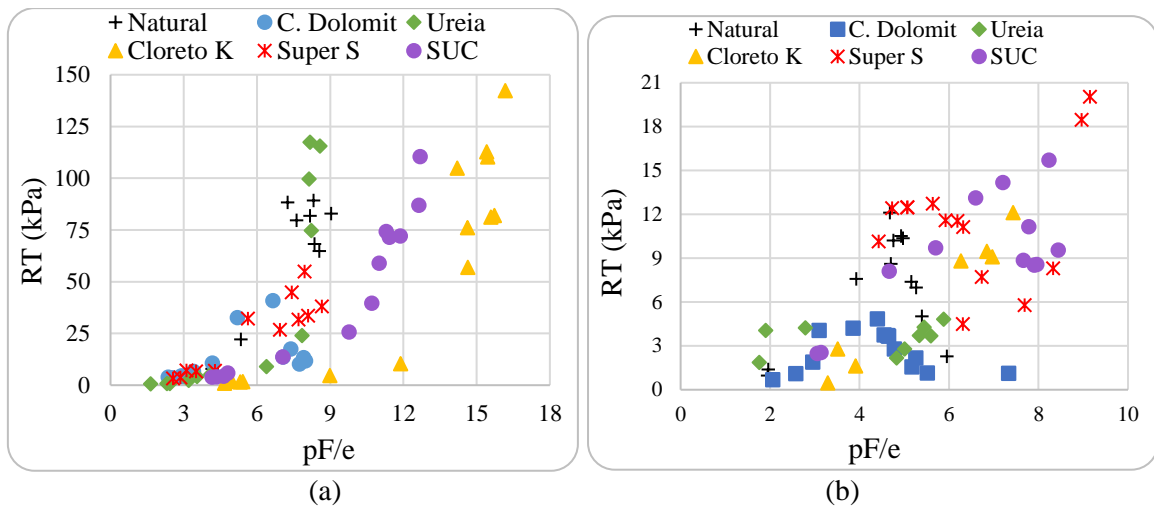


Figura 4.39. Resultados da resistência à tração (RT) em função do pF/e para o solo laterítico (a); saprolítico (b).

Na busca de melhor avaliar se a sucção osmótica estaria gerando algum efeito na resistência à tração dos solos laterítico (a) e saprolítico (b), foram gerados os gráficos apresentados na Figura 4.40.

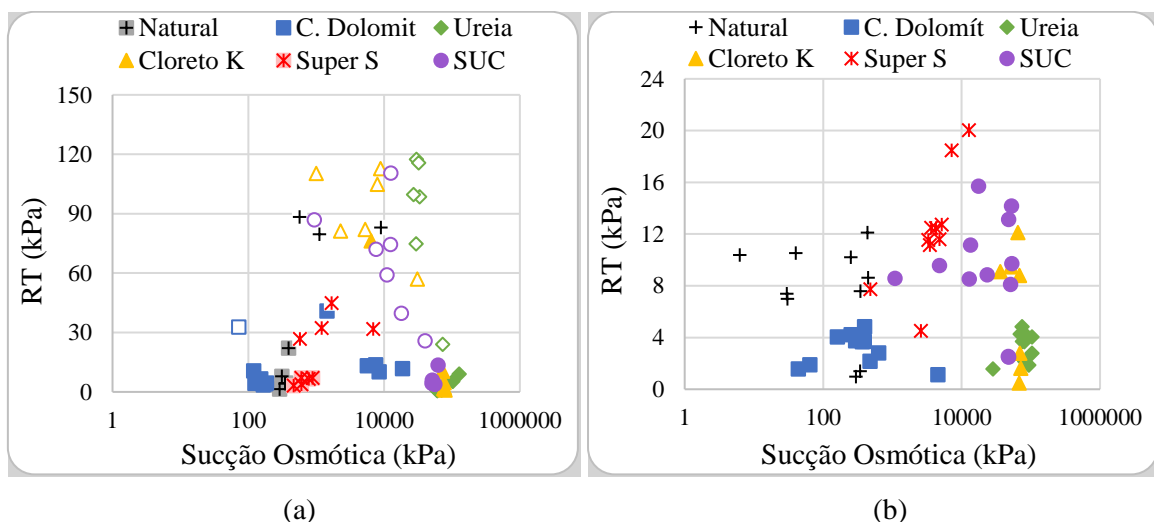


Figura 4.40. Resultados da resistência à tração por compressão diametral (RT) para o solo laterítico (a) e o solo saprolítico (b), em função da sucção osmótica.

Na Figura 4.40a se observa que as misturas com o cloreto, o SUC e a ureia, tendem a apresentar uma diminuição da resistência à tração com o aumento da sucção osmótica e, portanto, com o aumento da umidade (Figura 4.32a). No entanto, excluindo-se os pontos correspondentes à zona de microporos (pontos com legenda sem preenchimento) verifica-se que persiste a tendência esperada de aumento da resistência à tração com a ampliação da sucção osmótica para o solo natural assim como para as misturas. Portanto, a sucção osmótica mostra-se relevante para o comportamento mecânico, embora análises e estudos complementares

merecem ser feitos. Na Figura 4.40b não se detecta uma tendência de comportamento para a resistência à tração em função da sucção osmótica.

Por outro lado, considerando-se o fato de que enquanto a sucção matricial é diretamente uma função das dimensões dos poros e a sucção osmótica está mais ligada a água de hidratação do solo, optou-se por incluir a análise da influência na resistência à tração da soma da sucção matricial normalizada pelo índice de vazios com o produto da sucção osmótica transformada pela umidade, ambas as sucções em pF. Isto apenas para o solo laterítico, o qual foi o que apresentou uma clara tendência no comportamento em função da sucção osmótica. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.41, onde verifica-se uma melhoria na distribuição dos pontos com relação à Figura 4.39a.

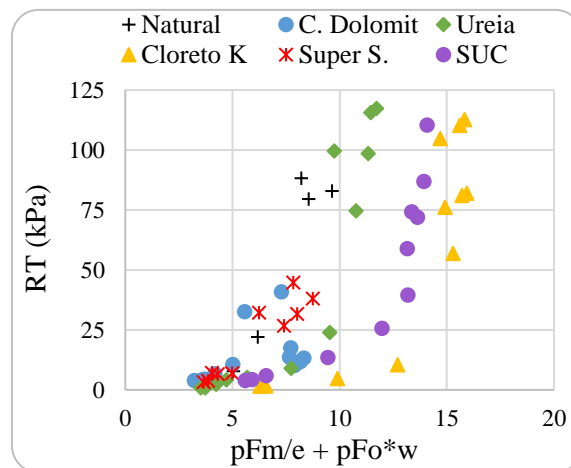


Figura 4.41. Resistência à tração (RT) do solo laterítico em função da soma da sucção mátrica normalizada pelo índice de vazios com a sucção osmótica transformada pela umidade

Na literatura são encontrados diferentes resultados sobre o efeito da sucção osmótica na resistência. Por exemplo, Mokni *et al.* (2014) encontraram que com o incremento desta sucção a resistência ao cisalhamento pode diminuir um pouco enquanto Kate & Blight (2012) encontraram que ela tende a se manter constante para solos com alta plasticidade. Portanto, para conhecer se parte dessa diminuição na resistência que está se dando nas misturas, se deve ao efeito dos sais na água e não apenas pelo incremento de umidade, devem ser feitos ensaios complementares nos quais a sucção mátrica seja baixa de modo a que ela exerça pouca influência no comportamento, e onde se varie a concentração do fertilizante. Isto certamente daria informação mais clara e precisa sobre o efeito dos sais fornecidos pelos insumos ao solo sobre a sucção osmótica

Buscando ilustrar o anterior entendimento, são apresentadas na Figura 4.42 resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez para as misturas estudadas considerando-se a

convencional relação entre o número de golpes e a umidade (a), mas também dividindo-se as umidades pela relação entre o pH e o Ponto de Carga Zero (PCZ) obtido para o solo natural (b) e pela relação entre o pH e 7 (pH neutro) (c). Os resultados apresentados para as curvas modificadas tendem a convergir para um comportamento único, principalmente a Figura 4.42b, fato o que não ocorre na ausência das modificações.

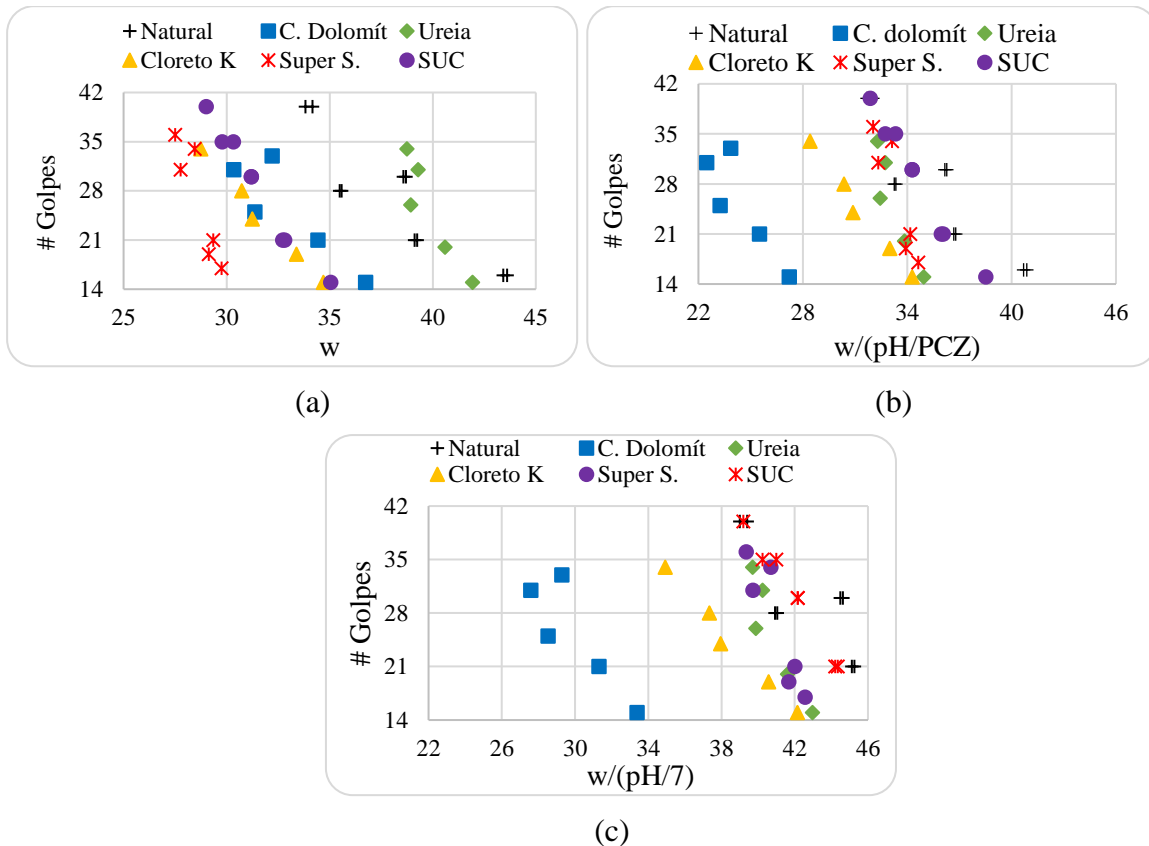


Figura 4.42. Número de golpes em função de: w (a); $w/(pH/PCZ)$ (b) e $w/(pH/7)$ (c).

A dispersão persistente, mesmo no caso das curvas modificadas, coloca em destaque que as análises não podem ser tão simples, mas ao mesmo tempo elas indicam a importância de se ampliar os estudos buscando o entendimento da influência da sucção osmótica e da própria composição química do meio no comportamento dos solos, esteja ele saturado ou não. Cabe ressaltar que o dolomítico, ao ser um regulador de acidez que aumenta o pH do solo, faz com que as relações fiquem menores e por tal motivo os resultados desta mistura se afaste da convergência.

Na procura de um melhor entendimento do impacto dos insumos minerais no comportamento dos solos estudados, buscou-se analisar a relação entre a resistência à tração e os limites de plasticidade obtidos por Perez (2018). Tais análises serão realizadas por se ter o entendimento de que o limite de plasticidade faz referência à umidade do solo correspondente

à resistência à tração na condição saturada. Nesta resistência à tração medida por meio do ensaio de limite de plasticidade, terminam intervindo as forças de adsorção e mesmo a sucção osmótica e a sucção mátrica, em princípio, correspondente a pressão de entrada de ar.

Na Figura 4.43 se apresenta em função dos limites de plasticidade obtidos para cada mistura, a sucção mátrica (a), o pF da sucção mátrica dividido pelo índice de vazios (b), a sucção total (c) e o pF da sucção total dividido pelo índice de vazios (d), sendo que em todos os casos se considerou a sucção obtida para a resistência à tração máxima e os índices de vazios a elas correspondentes.

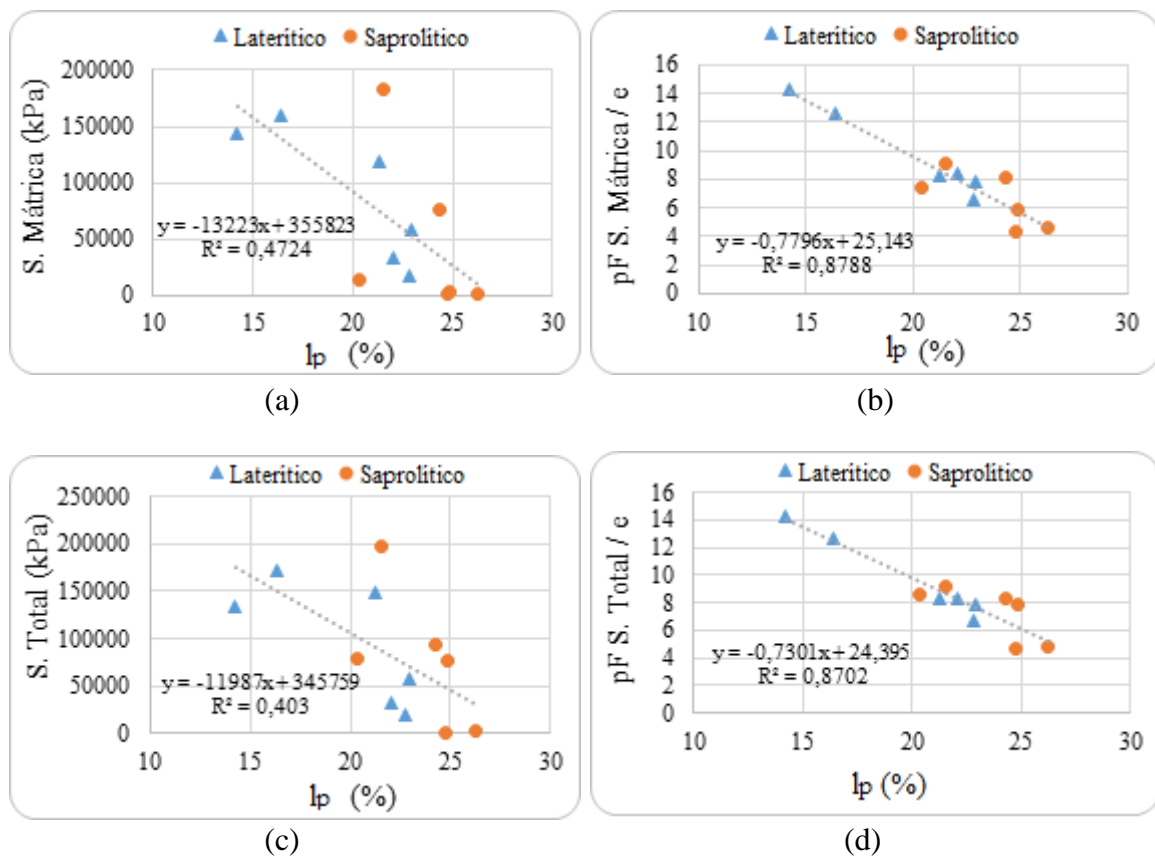


Figura 4.43. Sucção mátrica (a), pF/e da sucção mátrica (b), sucção total (c) e pF/e as sucção total em função de I_p para as duas profundidades estudadas.

Observa-se sem exceção, uma ótima correlação entre o pF da sucção total e mátrica divididas pelos respectivos índices de vazios e os limites de plasticidade obtidos. Para as relações com a sucção osmótica além da inviabilidade de se fazer o logaritmo para os valores de sucção negativos obtidos, não se verificou correlação entre ela e o limite de plasticidade. No entanto, considerando-se apenas os valores que foram possíveis serem determinados, a Figura 4.44 mostra que existe uma relação entre o pF da sucção osmótica dividido pelo índice de vazios e o limite de plasticidade.

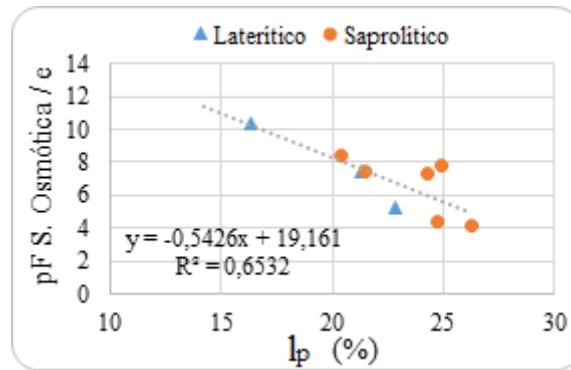


Figura 4.44. pF da sucção osmótica/e em função de I_p para as duas profundidades estudadas.

A partir das análises anteriores, decidiu-se analisar a relação tanto da resistência à tração máxima obtida para as misturas (Figura 4.45a) quanto a relação dessa resistência dividida pelo índice de vazios (Figura 4.45b) em função do limite de plasticidade obtido por Pérez (2018). Os resultados apontam para a existência de correlação entre os dois parâmetros, sendo melhor essa correlação quando se considera o índice de vazios (Figura 4.36), indicando a importância da porosidade para a resistência à tração.

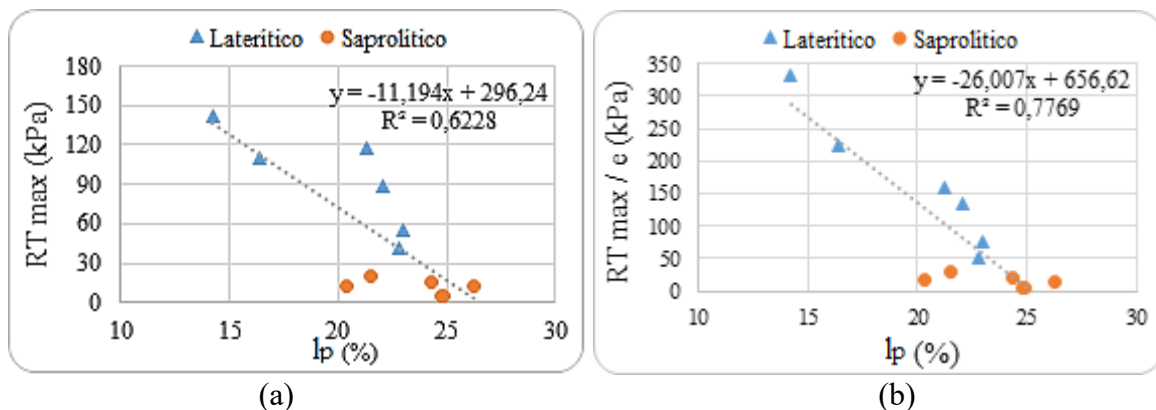


Figura 4.45. RT máxima (a) e RT máx/e (b) em função de I_p (b).

4.4.2. Resistência à compressão simples

A Tabela 4.10 apresenta as umidades que cada corpo de prova (CP) apresentava no momento da ruptura, assim como os valores de sucção correspondentes a essas umidades segundo as curvas características (CC) determinadas previamente e os valores de sucção determinados para cada corpo de prova mediante a técnica do papel filtro (PF).

Tabela 4.10. Valores de sucção mátrica para cada uma das misturas durante o ensaio de compressão simples.

Mistura	w (%)	e	Sr (%)	S. mátrica (kPa) CC	S. mátrica (kPa) PF
SUC	17,9	0,62	75,0	16692,5	986,1
Calcário dolomítico	15,7	0,78	53,5	955,4	1589,5
Super simples	16,5	0,92	48,0	950,0	2639,5
Cloreto de potássio	16,4	0,55	75,3	524,3	773,0
Solo natural	17,8	0,85	56,3	522,7	2539,4
Ureia	20,7	0,69	80,7	21,0	18,8

Na Tabela 4.10 se observam diferenças significativas entre os resultados dos parâmetros considerados (w, e, Sr, sucção mátrica) indicando o impacto dos insumos ao se considerar energias de compactação similares. A Figura 4.46 apresenta a relação entre o índice de vazios e a umidade (a) e o índice de vazios e o grau de saturação (b). Estas figuras mostram a inexistência de elo direto entre a umidade de compactação e o índice de vazios obtido (a), no entanto, alguma tendência coerente se observa entre o índice de vazios e o grau de saturação (b), embora com dispersão nos resultados apontando para outros fatores intervenientes nos resultados.

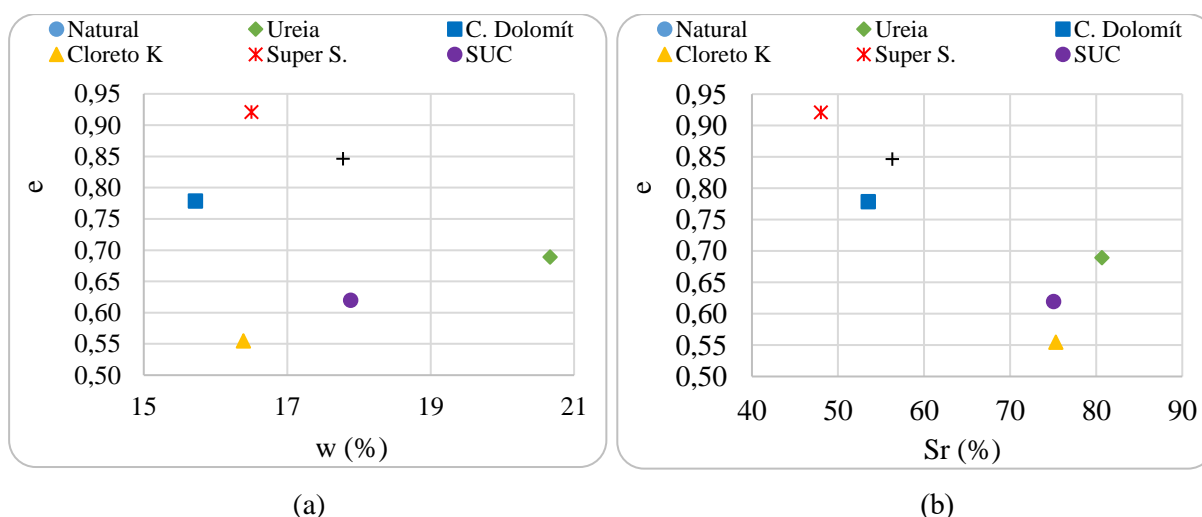


Figura 4.46. Índice de vazios em função da umidade (a) e do grau de saturação (b).

A Figura 4.47 apresenta os resultados do ensaio de compressão simples obtidos para o solo laterítico sem tratamento e para as diferentes misturas estudadas. Avaliando-se de forma

geral as resistências máximas de cada amostra, se observa que a ordem de maior a menor resistência, coincide com a ordem de maior para a menor sucção medida (última coluna da Tabela 4.10), exemplificando, as misturas com o Super simples e a ureia, apresentaram respectivamente a maior e menor resistência de pico segundo os dados de sucção medidos.

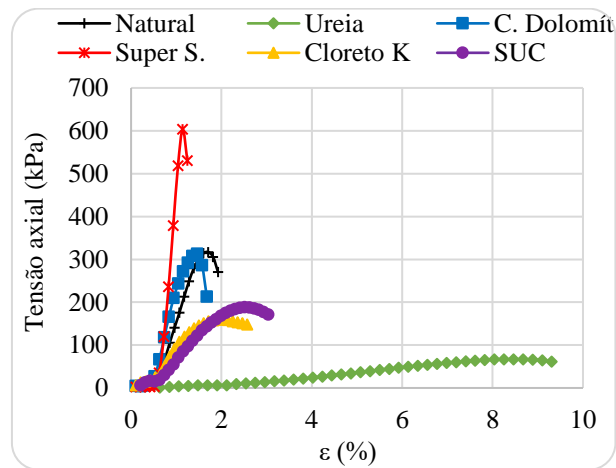


Figura 4.47. Resultados do ensaio de compressão simples.

Pode-se observar que a forma das curvas é, como esperado, similar por tratar-se de um mesmo solo, merecendo destaque, no entanto, a elevada deformabilidade da mistura com a ureia revelando um comportamento muito dúctil, o qual se deve principalmente ao aumento no teor de umidade devido ao processo de hidrólises (liberação de OH^-) e nitrificação (liberação de H^+) que experimenta este fertilizante quando entra em contato com o solo (Campillo & Sadzawka, 2006), fazendo com que a resistência diminua devido à menor sucção atuando no corpo de prova. Além da diminuição da sucção, essa maior presença de moléculas de água nesta mistura, faz com que a espessura da camada de hidratação entre as partículas seja maior, contribuindo para o deslocamento entre elas no momento da compressão e atingindo assim um maior nível de deformação.

Outra curva com destaque foi a obtida para a mistura com o Super simples, a qual apresenta a forma típica de um corpo mais rígido, atingindo a resistência de pico numa porcentagem de deformação baixa, seguida de uma perda rápida da sua resistência. Diferentemente dessa mistura, todas as outras apresentaram resistências de pico menores em relação à obtida para o solo sem tratamento apontando para interferência de ordem química. Estes resultados são mais um indicativo que os insumos exercem uma influência no comportamento mecânico do solo.

A Figura 4.48 apresenta os resultados da resistência à compressão simples em função da umidade (a), do índice de vazios (b), do grau de saturação (c) e da sucção matricial (d). Nesta figura apenas os resultados de resistência à compressão simples em função do grau de saturação e da sucção, apresentam uma tendência bem definida e compatível com o comportamento esperado. Por exemplo, o cloreto de potássio embora apresente a segunda menor umidade e o menor índice de vazios, apresentou um dos piores comportamentos em termos de resistência máxima, que mesmo sendo compatível com o grau de saturação aponta para a influência das reações químicas na instabilidade das agregações, assim como nas forças interativas entre as partículas. Já o Super simples, apesar de seu maior índice de vazios, foi a mistura que apresentou maior resistência devido provavelmente não só à interferência da química do meio como à contribuição para a coesão da fração silte desagregada preservando os demais agregados (Perez, 2018).

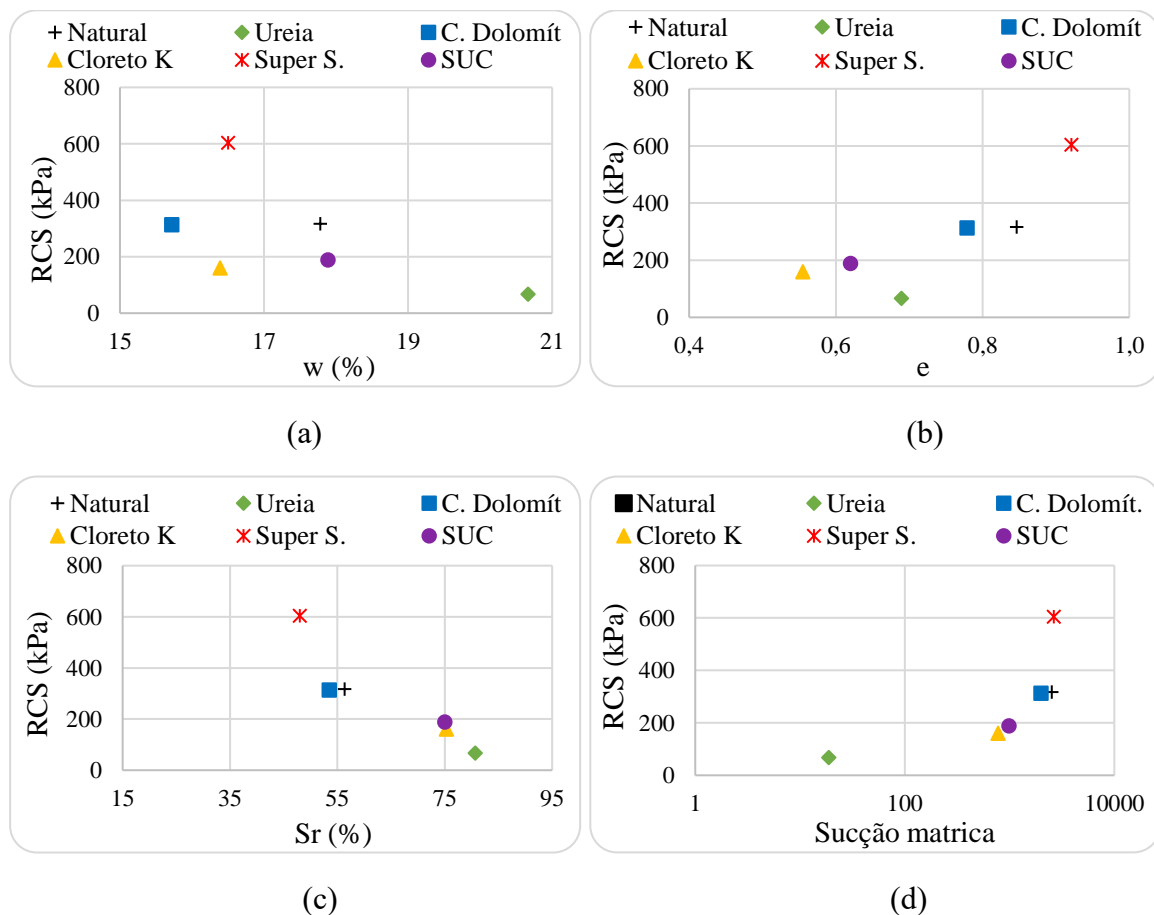


Figura 4.48. Resultados do ensaio de compressão simples em função da umidade (a), sucção mátrica (b), e (c) e Sr (d).

Optou-se também por analisar os resultados considerando-se conjuntamente a sucção e o índice de vazios. Segundo o proposto por Camapum de Carvalho *et al.* (2002) a resistência dos

solos deve em princípio aumentar com o aumento da relação pF/e , ou seja, maior a sucção e menor o índice de vazios maior a resistência. No entanto, a Figura 4.49a não apresenta tal comportamento esperado invertendo-se a tendência e ficando o resultado com a ureia totalmente distante dos demais devido ao seu maior valor de índice de vazios e menor sucção. A Figura 4.49b apesar de mostrar uma clara tendência de comportamento só corresponde às expectativas em relação a variação da resistência com a sucção mátrica, mas em relação ao índice de vazios a tendência é contrária ao esperado, apesar da boa tendência observada para a distribuição dos pontos. Essa análise é relevante, pois mostra que ao se mudar a química do meio faz-se necessário considerar o impacto da alteração da sucção osmótica e das forças interpartículas no comportamento.

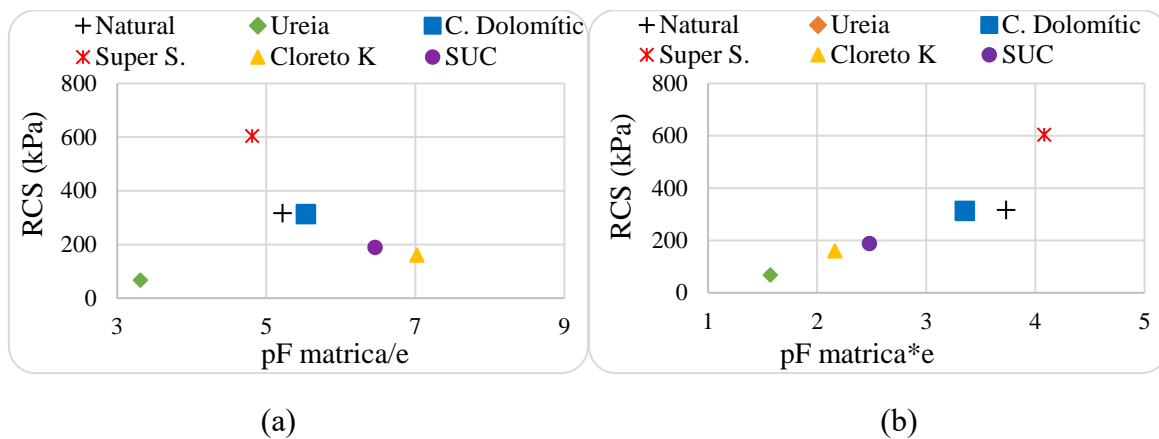


Figura 4.49. Resistência à compressão simples em função de pF/e (a); $pF \times e$ (b).

Na Figura 4.50 são apresentadas imagens de corpos de prova após ruptura por compressão simples tanto do solo natural quanto das misturas com a ureia e com o Super simples misturas cujo comportamento tensão x deformação (Figura 4.47) mas se afastaram do comportamento verificado para o solo puro, sem aditivos. Nota-se que o solo natural e a Ureia apresentam uma fissura próxima a 45° típica de um solo mais dúctil enquanto o Super simples apresenta fissuras mais verticais, sendo esse um comportamento de materiais mais rígidos.

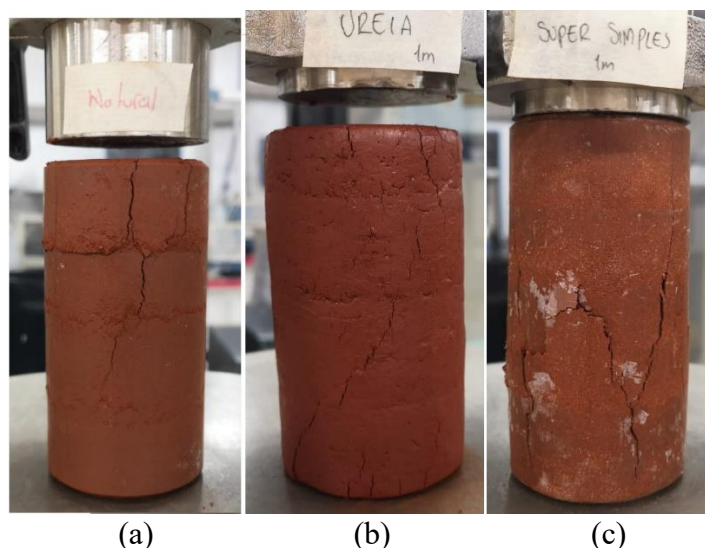


Figura 4.50. Corpos de prova após ruptura da mistura com ureia (a), solo natural (b) e mistura com o Super simples (c).

4.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico estimado (E_d)

A partir dos resultados do ensaio de compressão simples, foi determinado o Módulo de Elasticidade tangente (E) para 50% da carga máxima desprezando-se as deformações iniciais provenientes da recompressão dos extremos dos corpos de prova e ajustes às bases de apoio.

Estimou-se também o módulo E_d por meio do ensaio de ultrassom, os quais se encontram na faixa de valores esperados para um material com características similares (solo argiloso) (Traboulsi & Wardany, 2019). Estes resultados assim como os calculados a partir dos resultados dos ensaios de compressão simples são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Resultados E e E_d

Material	E (MPa)	E_d (GPa)
Super simples	1,4	2,4
C. dolomítico	0,4	2,2
Solo natural	0,3	1,5
Cloreto de potássio	0,2	1,2
SUC	0,1	0,7
Ureia	0,01	0,4

Observa-se que os valores de E_d seguem a mesma tendência que os valores de E , sendo a mistura com o Super simples a mais rígida (maior valor de E e E_d) e a mistura com a ureia a mais deformável (menor valor de E e E_d). A correlação encontrada entre estes dois módulos, pode ser observada na Figura 4.51, no qual é observada com clareza a influência dos aditivos

usados na rigidez de cada mistura colocando em evidência o impacto da química do meio no comportamento dos solos.

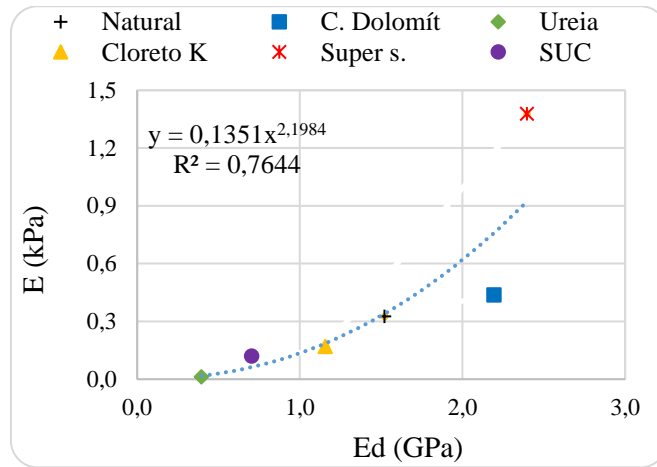


Figura 4.51. Correlação entre E e Ed

4.4.4. Resistência ao cisalhamento direto

Em busca de uma melhor visualização dos resultados, nas Figura 4.52, Figura 4.53 e Figura 4.54, são apresentados respectivamente os resultados do ensaio de cisalhamento direto para as tensões normais aplicadas 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa obtidos para o solo em condições inundada.

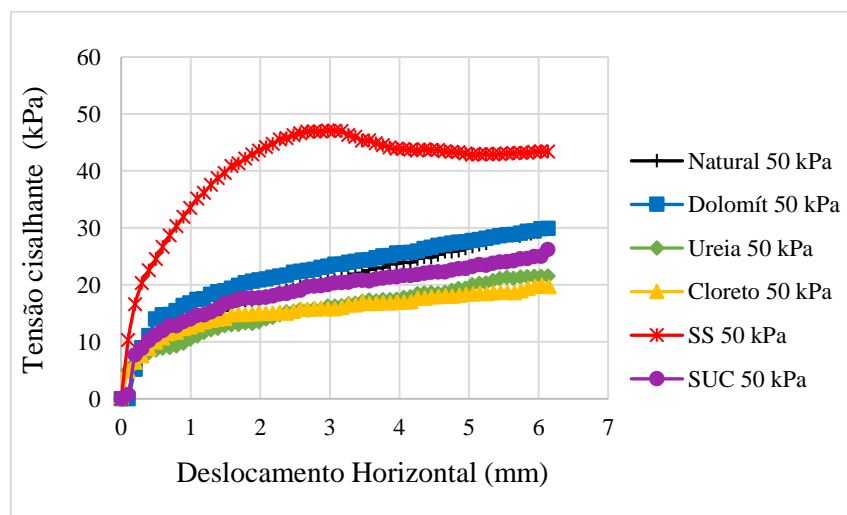


Figura 4.52. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para 50 kPa de tensão normal aplicada no solo laterítico puro e nas diferentes misturas.

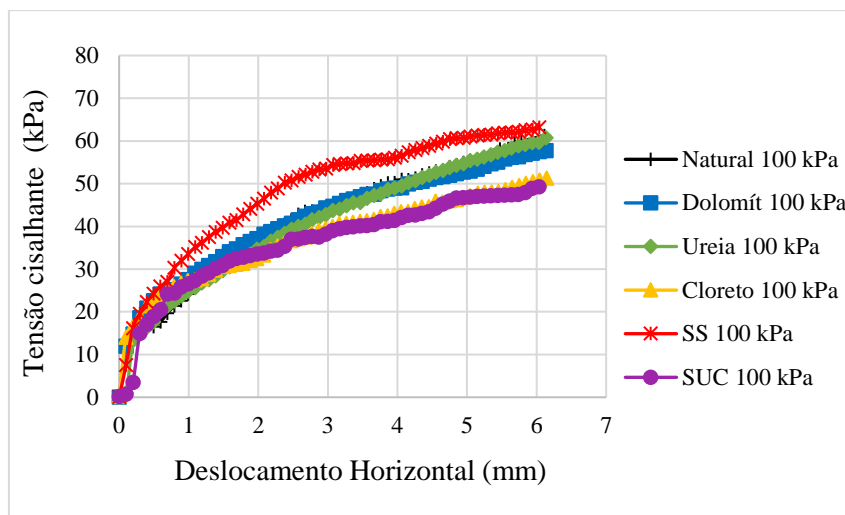


Figura 4.53. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para 100 kPa de tensão normal aplicada no solo laterítico puro e nas diferentes misturas.

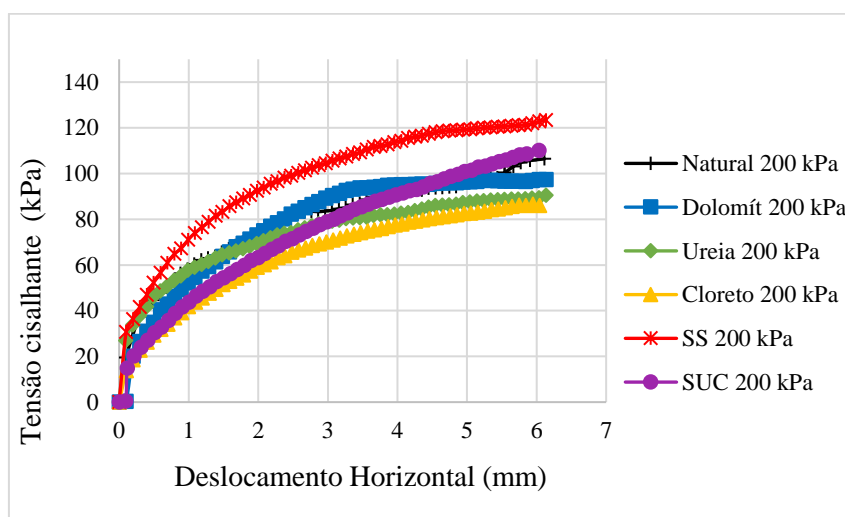


Figura 4.54. Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal para 200 kPa de tensão normal aplicada no solo laterítico puro e nas diferentes misturas.

Nos resultados apresentados nestas figuras se observa claramente uma variabilidade nas forças máximas aplicadas para conseguir fazer o cisalhamento das diferentes amostras, sendo as misturas com o Super simples e o cloreto de potássio as que requerem uma maior e menor tensão cisalhante respectivamente. A menor resistência observada para a mistura com cloreto de potássio pode estar atrelada ao efeito das reações químicas que instabilizam as agregações. Como tem sido característico da amostra com o regulador de acidez (C. dolomítico) em outros ensaios, esta mistura apresenta um comportamento bastante similar ao solo sem tratamento, mostrando que não gera modificações consideráveis na sua resistência. Cabe finalmente destacar a ocorrência de pico para no Super simples quando da aplicação da tensão normal de 50 kPa o que guarda relação com a elevada rigidez indicada no ensaio de compressão simples

e mostra que embora a sucção mátrica seja um fator importante, a influência da química do meio deve ser considerada na avaliação do comportamento mecânico dos solos.

Nas Figura 4.55 e Figura 4.56 são mostrados respectivamente os resultados das envoltórias de ruptura e os gráficos de barras que ilustram as variações dos parâmetros de resistência com os insumos minerais utilizados. Consta-se desses resultados que as misturas com o cloreto de potássio e o SUC, são umas das que mais geraram alterações na resistência do solo, já que apresentaram uma queda significativa dos valores de coesão em relação ao solo sem tratamento e ao mesmo tempo uma leve diminuição do ângulo de atrito, sendo esta pouco significativa. Cabe lembrar que estas misturas foram as que mais desagregação geraram no solo (Pérez, 2018) e as que apresentam maior CTC (Tabela 4.1) e maior efeito da sucção osmótica (Figura 4.32a), contribuindo tudo isto para a instabilidade das agregações e, portanto, para a perda de conexão entre as partículas o que leva a essa diminuição na coesão. Este comportamento não se cumpre para o caso da mistura com o Super simples já que gerou um aumento no valor de coesão, mesmo também apresentando uma das maiores CTC e tendo gerado um efeito desagregador no solo. A diferença com esta mistura reside certamente no fato de que os valores de sucção osmótica foram mais parecidos com os obtidos para o solo sem tratamento e isto junto com a interferência de outros fatores químicos, pode estar contribuindo para esse incremento na coesão. A mistura com o calcário dolomítico também gerou um pequeno incremento na coesão e foi esta mistura a que menos sucção osmótica apresentou (Figura 4.32a), reforçando com isto a ideia que a sucção osmótica possa intervir de forma significativa, atrelada a outros fatores químicos, na coesão das misturas e, portanto, na resistência dos solos.

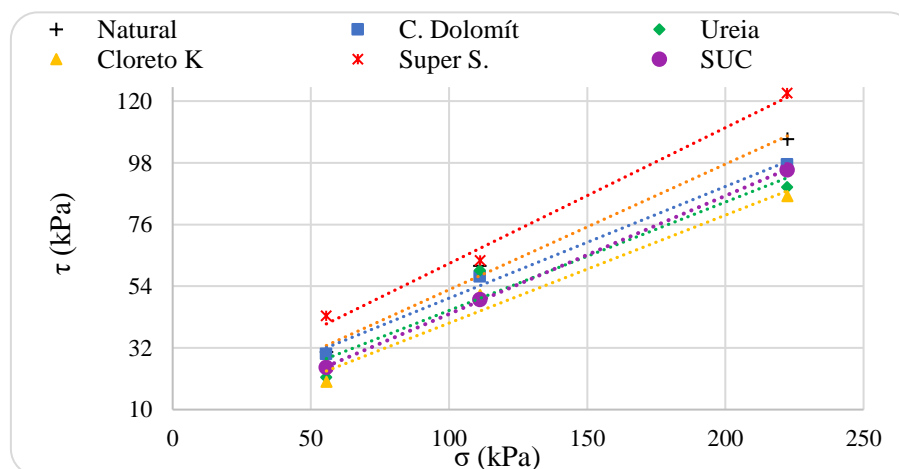


Figura 4.55. Envoltórias de ruptura para o solo laterítico puro e para as misturas solo-insumo mineral.

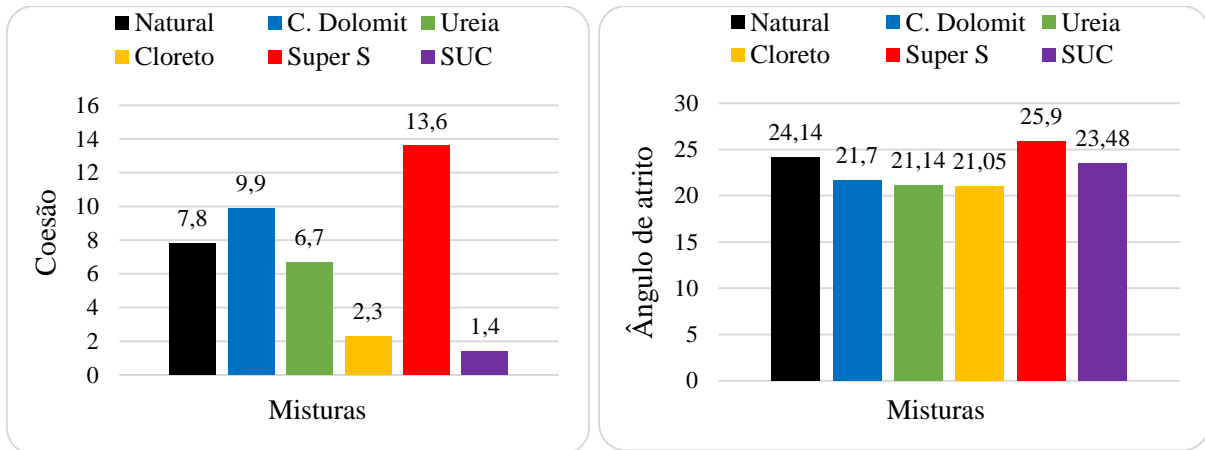


Figura 4.56. Parâmetros de resistência para o solo laterítico puro e para as misturas feitas.

Considerando-se que o limite de plasticidade está diretamente relacionado à resistência à tração do solo e, portanto, às forças interativas entre as partículas do solo em condições saturadas, analisou-se (Figura 4.57) a relação entre a resistência ao cisalhamento obtida para deslocamentos cisalhantes de 1 mm, 3 mm e 6 mm considerando-se as tensões confinantes de 50 kPa (a) e 200 kPa (b) e os limites de plasticidade apresentados por (Pérez, 2018). Como esperado constata-se a tendência de aumento da coesão com o limite de plasticidade, lembrando que o aumento de I_p significa que com uma maior umidade ele tem aquela resistência correspondente ao fissuramento do bastonete com 3 mm de diâmetro, ou seja, um mesmo solo ou uma mesma mistura em umidade menor que I_p resistiria mais e em umidade maior resistiria menos.

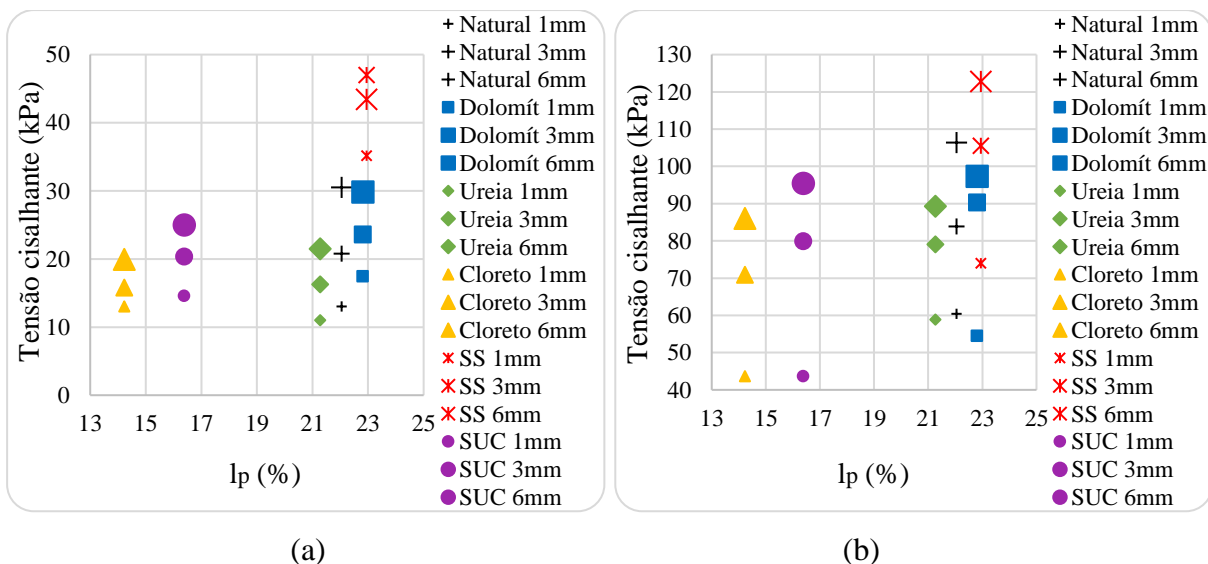


Figura 4.57. Relação entre a resistência ao cisalhamento obtida para deslocamentos cisalhantes de 1 mm, 3 mm e 6 mm e o I_p , considerando-se as tensões confinantes de 50 kPa (a) e 200 kPa (b).

A Figura 4.58 mostra que a coesão das misturas também tende a aumentar com o limite de plasticidade do solo. Confirmando assim as análises realizadas no âmbito da Figura 4.57.

Essas análises da resistência ao cisalhamento e da coesão efetiva em função do limite de plasticidade mostram dois aspectos importantes: efetivamente os insumos afetam o comportamento mecânico do solo; os limites de Atterberg são parâmetros que se bem analisados podem contribuir para o entendimento do comportamento mecânico dos solos.

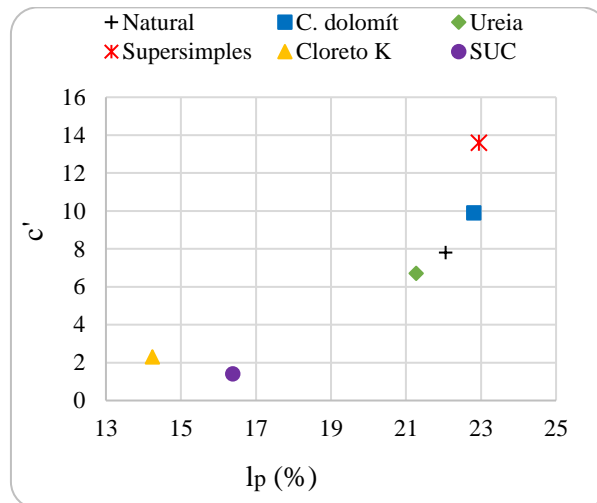


Figura 4.58. Relação entre a coesão efetiva e o limite de plasticidade (I_p).

4.4.5. Ensaio duplo edométrico

Devido às diferenças entre os índices de vazios obtidos para as misturas, optou-se por normalizar as curvas de adensamento em relação ao índice de vazios inicial de cada mistura, de modo a se visualizar o impacto dos aditivos químicos na compressibilidade. Para facilidade de visualização, os resultados foram separados em duas figuras. A Figura 4.59 contém as curvas oedométricas tanto do solo laterítico puro quanto das misturas com o Super simples, a ureia e o cloreto de potássio, enquanto que a Figura 4.60 mostra os resultados para o solo laterítico e as misturas com o regulador de acidez e o composto SUC. Em ambas as figuras, como se pretende avaliar a influência da saturação no comportamento das misturas são apresentados os resultados sem imersão e com imersão (I).

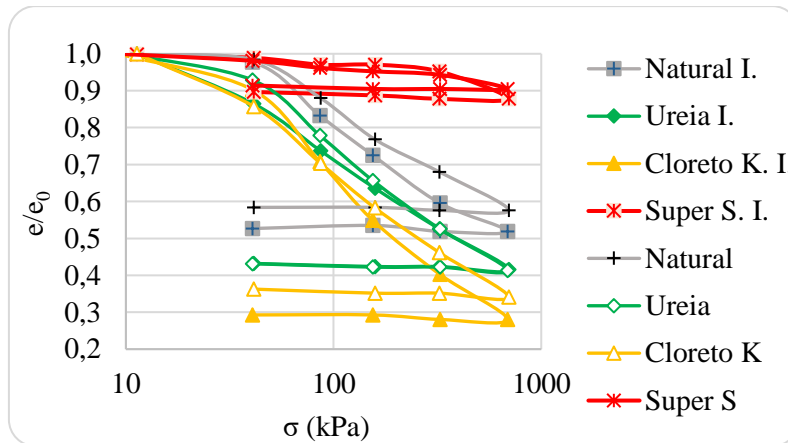


Figura 4.59. Curvas de compressão normalizadas pelo índice de vazios inicial para o solo laterítico puro e misturado com Super simples, ureia e cloreto de potássio.

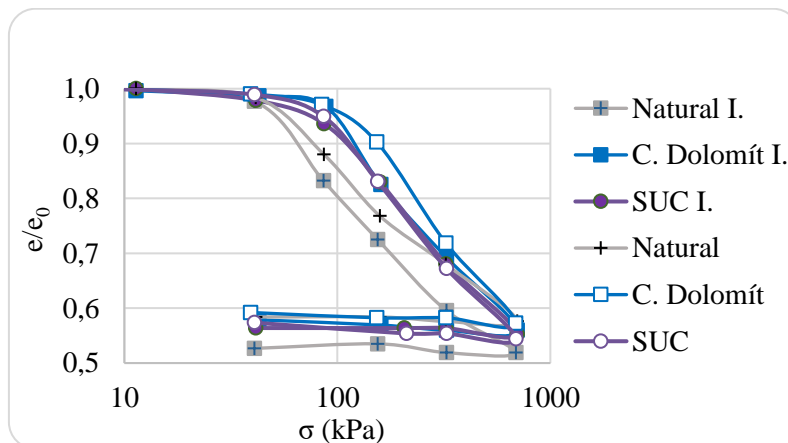


Figura 4.60. Curvas de compressão normalizadas pelo índice de vazios inicial para o solo laterítico puro e misturado com o calcário dolomítico e o composto SUC.

Nestas figuras o destaque se dá para o Super simples que confirma a sua maior rigidez em relação ao solo puro e às demais misturas como verificado nos ensaios de compressão simples. Os demais resultados apresentam um comportamento padrão variando apenas a deformabilidade e o ponto de plastificação. O solo puro e as misturas com cloreto de potássio e com a ureia, apresentaram tensão de pré-adensamento ou de pseudo pré-adensamento de 40 kPa e as misturas com calcário dolomítico e SUC de 85 kPa.

Buscou-se a partir dos resultados obtidos analisar a sensibilidade estrutural do solo puro e das misturas por meio do cálculo do coeficiente de colapso. Os coeficientes de colapso foram calculados de duas formas admitindo-se que o solo estava no estado inicial e se submeteu a um determinado acréscimo de tensão seguido de e admitindo-se que o solo já se encontrava em um determinado estado de tensão e foi submetido à inundação (Vargas 1977). A primeira situação leva evidentemente a valores de colapso mais elevados. Também se incluiu nas análises a

determinação do colapso segundo a proposta realizada por Camapum de Carvalho *et al.* (2009). Nesse caso utilizando-se os resultados obtidos para a condição inundada considera-se colapso o recalque obtido aos 15” de ensaio. Segundo essa técnica ao colapso por inundação se soma o colapso por efeito de carga.

Na Figura 4.61a estão apresentados os valores de colapso calculados segundo a proposta original (Vargas, 1977) tendo como referência a porosidade inicial, ou seja, o solo se submeteu diretamente àquela tensão. Na Figura 4.61b adotou-se como referência para o cálculo do colapso apenas as diferenças em cada estágio de carga para a condição inundada e não inundada admitindo-se então, que o solo apenas foi inundado naquela tensão em que se encontrava. É evidente que o colapso total, partindo-se da amostra com tensão aplicada nula, é bem superior ao obtido para o recalque oriundo da inundação em um determinado estado de tensão. Nestas figuras merecem destaque a maior colapsividade do cloreto e a menor do Super simples.

Na Figura 4.62 estão as curvas do índice de colapso segundo a proposta feita por Camapum de Carvalho *et al.* (2009), considerando-se o colapso acumulado (a) e colapso sob uma determinada carga aplicada (b) em similaridade com o apresentado na Figura 4.61. Segundo esta proposta o colapso corresponde ao recalque imediato medido em 15”. Observa-se que os resultados obtidos pelas duas técnicas guardam certa similaridade entre elas

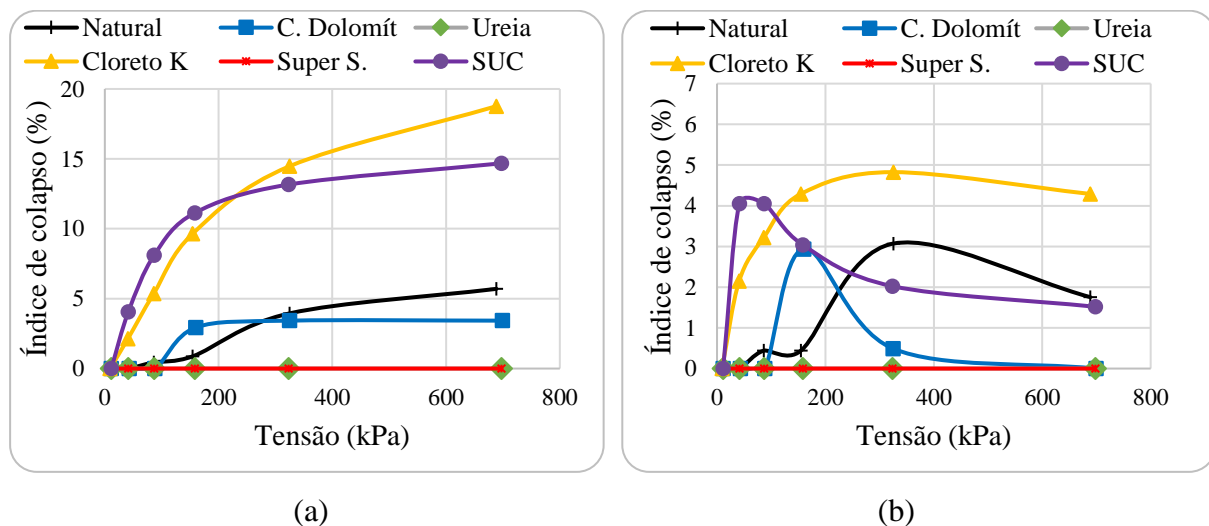


Figura 4.61. índice de colapso calculado para cada estágio de carga segundo (a) Vargas (1977) e (b) pela diferença entre a condição não inundada e inundada.

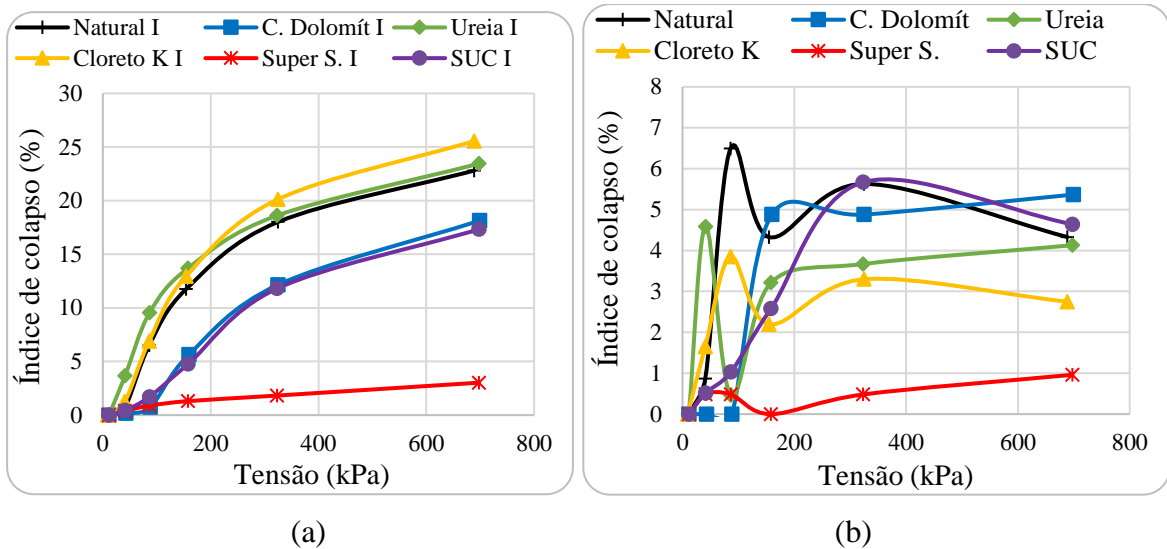


Figura 4.62. Índice de colapso segundo a proposta de Camapum de Carvalho *et al.* (2009) (a) e colapso aos 15 segundos de aplicação de cada carga (b).

Finalmente a Figura 4.63 apresenta o colapso calculado segundo a proposta de Jennings e Knight (1957) *apud* Maia (2005) considerando os colapsos ocorridos quando o solo se encontrava sob uma determinada tensão correspondendo assim à situação considerada nas Figura 4.61b e Figura 4.62b.

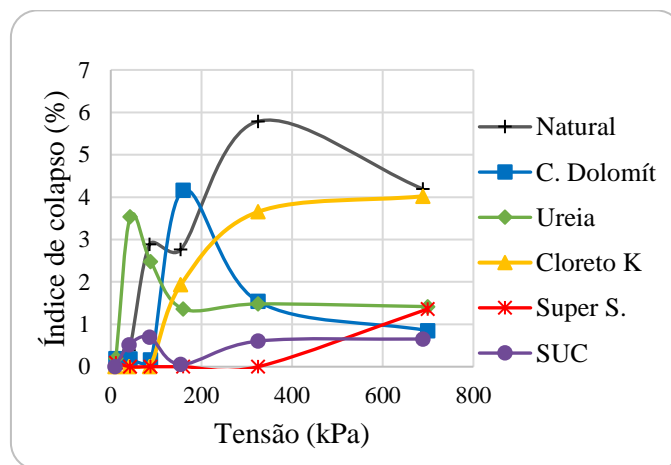


Figura 4.63. Índice de colapso segundo a proposta de Jennings e Knight (1957) *apud* Maia (2005).

Embora as Figura 4.59 e Figura 4.60 já indicassem o significativo impacto dos insumos minerais na deformabilidade das misturas, diminuindo-a no caso do Super simples e aumentando-a nos demais casos, as análises do colapso acumulado e a cada nível de tensão estão a indicar que o insumo mineral interfere diretamente na estabilidade estrutural do solo com reflexos inclusive em sua resistência.

Se sabe que para ter uma ótima germinação e crescimento das plantas os solos precisam ter propriedades físicas específicas, e que ao mudar uma delas, as outras geralmente também mudam. Portanto, considerando todos os resultados apresentados neste capítulo, é possível indicar que o uso de uma elevada concentração dos insumos minerais avaliados nesta pesquisa, podem afetar não apenas o comportamento mecânico do solo que é importante na área geotécnica, se não também o bom desenvolvimento das culturas, fato relevante para a área agrícola. O aumento do teor de argila observado dos ensaios de granulometria, influenciariam na diminuição da friabilidade do solo enquanto as mudanças na estrutura, ou seja, alterações na quantidade e tamanho dos poros, densidade, boa estabilidade dos agregados, entre outros, gerariam mudanças nas condições de permeabilidade, fluxo de ar e demais fatores que no final vão afetar o bom desenvolvimento das plantas por meio das raízes.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostraram que os diferentes insumos usados nas misturas com os solos estudados, geram mudanças na composição química, nas propriedades físicas, na estrutura, nas curvas características de retenção de água e na resistência do solo, as quais variaram segundo o tipo de fertilizante, grau de intemperização e composição químico-mineralógica do solo. O estudo mostra que os insumos alteram solos submetidos a diferentes níveis de intemperização em condições de clima tropical. Os tópicos elencados a seguir mostram de forma mais específica, algumas conclusões desta pesquisa.

Análises químicas

Dos resultados das amostras curadas em campo durante um ano e no laboratório pelo período de 3 anos, se evidenciou que a adição dos insumos minerais afeta a curto prazo a química do solo, porém, de modo relativamente rápido nos solos lateríticos, esse impacto é perdido pelo forte processo de lixiviação que ocorre em campo.

A mistura com o cloreto de potássio foi a que apresentou maior CTC e V% fato pelo qual é uma das misturas que mais alterações gera no solo. O solo de transição curado em campo apresentou a mesma tendência de comportamento exposta para o solo laterítico, sendo as misturas com o SUC e o Super simples as que registram maior CTC e V%.

Análises das propriedades físicas

A alteração nos valores das massas específicas das misturas apontou para a ocorrência de interações, transformações e formação de novos compostos impactando nos resultados e análises contidas nesta pesquisa.

Dos resultados de sedimentação obtidos para as misturas feitas com o solo de transição e o solo laterítico e que ficaram pelo período de um ano no campo experimental, se evidenciou que no geral o efeito desagregador antes obtido (Pérez, 2018) não estava mais acontecendo, pelo contrário todas as misturas tenderam a apresentar agregação das suas partículas, sendo maior este efeito no solo de transição devido as suas características químicas (> CTC). Apenas o Super simples gerou desagregação da fração mais fina (<0,03 mm) do solo laterítico mas para o resto de partículas foi o fertilizante que mais agregação gerou. O efeito agregador também obtido nos resultados com defloculante, onde o Super simples foi o que mais agregação gerou

nos dois tipos de solos estudados, está reforçado pela presença da sericita principalmente no solo de transição, pois em estudos anteriores se verificou que a presença de ilita, mineral da mesma família, gera a agregação do solo quando do uso de defloculante.

As variações apresentadas nos índices de vazios com a umidade durante o período de cura, reforçam a ideia que os insumos estudados podem gerar mudanças na estrutura do solo e portanto nos valores da sucção total, tal como foi observado.

No caso do solo laterítico, foi a mistura com o cloreto e o SUC os que apresentaram menor índice de vazios, o qual coincide com o seu maior efeito desagregador, enquanto as misturas com o Super simples e o calcário dolomítico apresentaram os maiores valores. Por outro lado, dos resultados do solo saprolítico se observou no geral que todas as misturas apresentaram uma diminuição no índice de vazios, porém, as misturas com a ureia e o cloreto de potássio, apresentaram um incremento significativo nos seus valores para as menores umidades devido ao processo de cristalização que estes fertilizantes experimentam quando em contato com o solo úmido.

Análises da estrutura

De todas as imagens obtidas com lupa, MEV e microCT, mesmo que as amostras fossem compactadas com métodos diferentes, se observaram variações nas suas estruturas.

Nas imagens obtidas com a lupa e o MEV para o solo laterítico se identificou que a mistura com o Super simples e o calcário dolomítico, apresentaram uma certa formação de grumos, dando lugar a uma estrutura com macroporos maiores. Ao contrário, as outras três misturas apresentaram uma estrutura mais compacta, com menor quantidade de macroporos. No solo saprolítico misturado com o cloreto de potássio, se observou pequenas fissuras provavelmente oriundas das cristalizações que este fertilizante gera no solo a baixa umidade.

Nas imagens obtidas com microCT para as amostras de solo laterítico com densidade aproximada à de campo, se observou uma maior porosidade para a mistura com a ureia, seguida pelo cloreto de potássio, e uma estrutura mais densa para a mistura com o Super simples. Estas diferenças são oriundas da desagregação gerada e das reações químicas. Mesmo com uma estrutura global mais densa, foi a mistura com o Super simples a que apresentou os poros de maior tamanho (até 1.5 mm), seguido pelo solo natural (até 1.36 mm) e as misturas com a ureia e o cloreto de potássio (até 1 mm). Estes resultados foram concordantes com os resultados obtidos para o índice de vazios das amostras compactadas dinamicamente.

Dos resultados das curvas características, se observou que os diferentes fertilizantes podem afetar a micro, meso e macroporosidade devido às variações no tamanho, volume e quantidade dos poros que compõem estas zonas, sendo estas variações mais significativas nos gráficos elaborados em função da saturação, onde se leva em conta o efeito do índice de vazios.

Especificamente no solo laterítico, o composto SUC gerou as maiores alterações nos valores de sucção mátrica ao longo da curva característica de retenção de água no solo, sendo a curva da mistura com o calcário dolomítico a mais parecida com a do solo sem tratamento. No caso do solo saprolítico as variações nos valores de sucção mátrica foram maiores em comparação com o solo laterítico. Neste solo, o calcário dolomítico foi o único fertilizante que apresentou uma redução nos seus valores de sucção em relação ao solo natural.

Das análises das curvas características transformadas em relação ao índice de vazios se concluiu que efetivamente os insumos minerais incorporados ao solo alteram a distribuição de poros e afetam as propriedades químico-mineralógicas fazendo com que os pontos que caracterizam as curvas características deixem de integrar uma tendência única, como geralmente ocorre.

Nos dois solos usados no estudo das curvas características, um laterítico e um saprolítico, as alterações na concentração de sais produto das reações do solo com alguns dos aditivos químicos estudados, também fizeram com que se gerasse mudanças significativas nos valores e na forma da curva característica de retenção de água no solo em termos de sucção osmótica e, portanto, de sucção total. Nas misturas com a Ureia, o SUC e o Cloreto de Potássio, se obteve um deslocamento das curvas para cima por meio da ampliação da sucção atuante na zona dos meso e macroporos, mudando a forma da curva, indicando que estes materiais geram uma grande concentração de sais dissolvidas na água presente nos interstícios do solo, que levam ao incremento nos valores de sucção osmótica, e por consequência, da sucção total. No caso da mistura com o Super simples e o calcário dolomítico, o efeito na sucção osmótica não foi tão significativo e as variações apresentadas na meso e macroporosidade apontam para a influência da mineralogia.

Foi notado que a sucção osmótica é função não apenas da composição químico-mineralógica do solo, mas também da composição química do meio e da zona de atuação nos poros, devido a que na zona de microporos o efeito dos fertilizantes na sucção osmótica registrado foi, nos intervalos de tempo e condições de cura considerados, pequeno.

O impacto gerado pela ureia, o cloreto de potássio e o SUC nas sucções osmótica e total dos dois tipos de solos estudados, foi significativo, fazendo com que as curvas se horizontalizassem perdendo o tradicional formato de curva característica de retenção de água no solo. As misturas com o Super simples e o calcário dolomítico não mudaram suas formas significativamente com relação às curvas obtidas para a sucção mátrica.

Comportamento mecânico

Tendo em vista que dadas as condições de ensaio terminou-se por trabalhar com misturas apresentando diferentes umidades, porosidades e sucções, embora se tenha analisado detalhadamente cada situação no corpo da tese, cabe aqui enfatizar que as análises do comportamento mecânico realizadas por meio do ensaio de resistência à tração em função da sucção matricial em pF normalizada pelo índice de vazios e da sucção osmótica transformada pela umidade permitem concluir que os insumos minerais atuam reduzindo a resistência do solo.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto obtidos para o solo em condições inundada mostram, que exceto o super simples, os demais aditivos minerais usados, levaram o solo a um pior comportamento mecânico. No caso do super simples seriam as interações químicas as que estariam contribuindo para essa melhora no comportamento.

A análise conjunta da resistência a compressão simples obtida para os diferentes insumos usados mostrando tendências contrárias às esperadas em relação à sucção e ao índice de vazios apontam para necessidade de se analisar a influência da sucção osmótica no comportamento mecânico dos solos sob influência de aditivos químicos.

Finalmente, do ensaio duplo edométrico se obteve que a mistura feita com o cloreto de potássio apresenta maior deformabilidade e índice de colapso, fato relacionado à desagregação gerada por estes insumos minerais. No caso da mistura com o Super simples o CP praticamente não se deformou indicando com isto uma estrutura mais rígida e resistente o que coincide com os comportamentos obtidos nos ensaios de compressão simples e cisalhamento direto.

As análises efetuadas sobre o impacto dos insumos minerais no limite de plasticidade fazendo a associação com o comportamento mecânico e com a sucção atuante no solo mostram que este índice pode ser considerado relevante na avaliação em caráter indicativo da sensibilidade dos solos aos compostos químicos que se fazem presentes, como é o caso dos insumos minerais.

Síntese

As análises apresentadas nesta pesquisa mostram a relevância de se considerar a ocupação, o uso e o modo como se usa o solo, pois, além dos impactos sobre o microclima, as alterações químicas do meio, sistema solo-fluido, podem ocorrer a curto, médio e longo prazo e são susceptíveis a gerarem desde simples alterações texturais até mudanças significativas nas propriedades, na sucção matricial e osmótica e no comportamento mecânico dos solos. No caso específico dos insumos minerais, suas solubilizações e lixiviações com migrações para camadas mais profundas do perfil podem gerar a médio e longo prazo problemas como subsidências e rupturas de encostas, a depender de fatores como composição químico-mineralógica do solo, insumos utilizados, condições de drenagem e clima. Deve-se ainda quando da utilização de solos submetidos à prática agrícola em obras de engenharia avaliar se a sua atual composição química não seria susceptível de comprometer o desempenho da obra a curto, médio e longo prazo.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Apresenta-se a seguir as sugestões para pesquisas futuras:

- Fazer um estudo a médio e longo prazo considerando-se o solo na condição inicial (natural) e após de vários anos de ficar exposto a diferentes insumos minerais.
- Avaliar as mudanças no comportamento mecânico do solo ao ser misturado com teores menores de insumos minerais, situados entre 0,1% e 1 %, que são os teores tipicamente utilizados nas atividades agrícolas sem que se considere o efeito acumulativo ao longo do tempo.
- Avaliar o comportamento mecânico em solos com outros níveis de intemperização e composição mineralógica.
- Estudar o comportamento hidráulico das diferentes misturas mediante ensaios de permeabilidade.
- Fazer ensaios de sorção, para saber quanto do aditivo químico fica retido no solo uma vez que a mistura solo-insumo se submete ao fluxo de água ao longo do tempo.
- Aprofundar os estudos sobre o impacto da sucção osmótica no comportamento hidromecânico dos solos submetidos a alterações químicas do meio.

- Determinar o efeito da biota nas reações dos fertilizantes com o solo, devido a que a reação destes pode se intensificar a depender da quantidade e tipo de bactérias presentes no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, L.A. (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.
- ALCARDE, J. C., MALAVOLTA, E., BORGES, A. L., MUNIZ, A. S., VELOSO, C. A., FABRÍCIO, A. C. & VIEGAS, I. DE J. M. (1992). Avaliação da higroscopicidade de fertilizantes e corretivos. *Scientia Agricola*, Piracicaba-SP. v 49. p 137-144.
- ASTM D3080 (2004). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, 7 p.
- ASTM D5298 (2016). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM International, West Conshohocken. 6 p.
- AZEVEDO, A.C. de & BONUMÁ, A.S. (2004). Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. *Ciência Rural*, 34(2): 609–617 p.
- BESOAIN, E., BORIE, F., CARRASCO, A., ESCUDEY, M. & GALINDO, G. (1985). Suelos volcánicos de Chile. Tosso, J. (Org.), Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Santiago de Chile, pp. 327–330 p.
- 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. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRAMSEG. Gramado, RS
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA Jr. (2021). Unsaturated Soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks* 44(3): 21 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., LEROUEIL, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. *Solos e Rochas*. São Paulo, v. 27, n. 3, p 231-242.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GUIMARÃES R.C. & Pereira, J.H.F. (2002). Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, v I, pp 289-294.

- CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA JR, G.F.N. & LEÃO CARVALHO, E.T. (2012). Tópicos Sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA, G. DE F.N., MACHADO, S.L., MASCARENHA, M.M. dos A. & CHAGAS, F. da S. (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico, ABMS 805 p.
- CAMPILLO, R. & SADZAWKA, A. (2006). Acidificación de los suelos y los procesos involucrados. programa de recuperación de suelos degradados. Biblioteca digital INIA. Fonte: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/32537>
- CARNEIRO, F.L.L.B. & BARCELLOS, A. (1953). Résistance à la traction des bétons. Bulletin Rilem, 13, 97-108 p. (in french).
- CELIK, I., GUNAL, H., BUDAK, M. & AKPINAR, C. (2010). Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid mediterranean soil conditions. Geoderma, 160(2): 236–243 p.
- CHAHAL, N., RAJOR, A. & SIDDIQUE, R. (2011). Calcium carbonate precipitation by different bacterial strains. African J. Biotechnol., 10(42): 8359–8372.
- CRUZ-MACÍAS, W.O., LARRAMENDI, L.A.R., MARINA, M.A.S., GARCÍA, V.H., SALDAÑA, R.A.C., HERNÁNDEZ, M.H.C. & CURIEL, A.G. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. Terra Latinoamericana, 38(3): 475-480 p. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- DE CAMPOS, T. M. P., DELGADO, C. C., TIBANA, S., SAENZ AGUILAR, S.A. e FONSECA, E. C. (1992). Determinação da curva característica de sucção em laboratório. 1a. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (1a. COBRAE), Rio de Janeiro, Brasil. 835-851 p.
- DELGADO, A.K.C. (2002). Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília DF. 211 p.
- ESPINOZA, L., SLATON, N. & MOZAFFARI, M. (2000). Como interpretar los resultados de los análisis de suelos. Div. Agric. Res. Ext., : 2.
- EZEOKONKWO, J.C. (2011). Engineering properties of npk fertilizer modified soil. J. Emerg. Trends Eng. Appl. Sci., 2(6): 962–966 p.

- FERNÁNDEZ-D'ARLAS, B. (2016). Series liotrópicas en la química macromolecular. *An. la Química*, 112(2): 79–94 p.
- FERTIYESO (2017). Edafología: Problemas de suelo limitantes para el adecuado desarrollo de las plantas. Fonte: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/09/27/edafologia-problemas-de-suelo-que-son-limitantes-para-el-adecuado-desarrollo-de-las-plantas/>
- FONTES, M.P., CAMARGO, O.A., SPOSITO, G. & ET, A. (2001). Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados : 20 p.
- FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Jhon Wiley & Sons Inc. New York. p 82-85.
- GARRIDO VALERO, M.S. (1993). Interpretación de análisis de suelo. *Hojas Divulg. Minist. Agric. Pesca y Aliment.*, 5: 1–40 p.
- GOH, T.B., DUDAS, M.J., PAWLUK, S. & HARAPIAK, J.T. (1987). Physical, chemical and micromorphological effects of nitrogen fertilizers on chernozemic soils 40: 177–192 p.
- GRIM, R. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. McGRAW-HILL Book Company, Inc, Illinois.
- 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-090a/02, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, df, 180p : 60–61 p.
- HANNAH, S., MURRAY, M. & ELLEN, H. (2009). Sources and impacts of contaminants in soils. Cornell Waste Management Institute. Department of Crop & Soil Sciences. 6 p.
- HOUSTON, S.L., HOUSTON, W.N. & WAGNER, A.N. (1994). Laboratory Filter Paper Suction Measurements. *Geotechnical Testing Journal*. v. 17, n. 2, p. 185-194.
- IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION (2020). Fonte URL: <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>. Consultado o 16 de março de 2020.
- IMHOFF, S.D.C. (2002). Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. Tese Doutorado, Piracicaba: ESALQ/USP. 94 p.

- IPNI - International Plant Nutrition Institute. (2017). Fertilizantes. URL <http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132#aparente>
- JARAMILLO, D. (2000). Introducción a la ciencia del suelo. *Soil Science*, 321–328 p.
- JIANG-TAO, L.I. & BIN, Z. (2007). Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical china 17(40371059): 568–579.
- KATTE, V. & BLIGHT, G. (2012). The roles of solute suction and surface tension in the strength of unsaturated soil. *Unsaturated soils: Research and Applications*. 431-437.
- KIST STEFFEN, G.P., STEFFEN, R.B. & ANTONIOLLI, Z.I. (2011). Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos. *TECNO-LÓGICA*, : 15–21 p.
- LEE, H.C. & WRAY, W.K. (1995). Techniques to evaluate soil suction - A vital unsaturated soil water variable. *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, v. 2. Paris, France. Balkema. p. 615-622
- LEONG, E.C., HE, L. & RAHARDJO, H. (2002). Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*. v 25. n 3. P. 321–332
- LUCENA. (2012). Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos. Tese de doutorado, UFPE, Recife, PE, 263 p.
- LLANQUE, R.J.A. (2020) Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola. Tese de Doutorado, Publicação G.DT 159/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300 p.
- MAIA, N.H. (2005). Influência de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 325 p.
- MARCHI, G.; GUILHERME, L.R.G.; CHANG, A.C.; CURI, N. & GUERREIRO, M.C. (2006). Changes in isoelectric point as affected by anion adsorption on two brazilian oxisols. *Communications in soils science and plant analysis*, 37: 1357-1366. Doi: 10.1080/00103620600626833.
- MARINO, D.M. (2022). Estudos de dois perfis de solo tropical com adição de cal. Dissertação de mestrado, departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

- MARINHO, F. A. M. (1997). Medição de sucção em solos. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados (Ñ Sat'97), v. 2, Rio de Janeiro. Freitas Bastos. p 373-397.
- MARINHO, F. A. M. (2005). Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados. Concurso de livre docência na especialidade "Geomecânica" do Departamento de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 201 p.
- MELLO, F. DE A.; BRASIL SOBRINHO, M. DE O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETO, A.; KIEHL, J. de C. (1983). Fertilidade do solo. São Paulo: Nobel. 400 p.
- MOKNI, N., ROMERO, E. & OLIVELLA, S. (2014). Chemo-hydro-mechanical behaviour of compacted Boom Clay: joint effects of osmotic and matric suctions. *Géotechnique*. 681-693. <https://doi.org/10.1680/geot.13.P.130>
- MOMOLI, R.S., CAMAPUM DE CARVALHO, J., COOPER, M. (2017). Erosão hídrica em solos cultivados. In Erosão em Borda de Reservatório. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, pp. 369-397. <https://gecon.eec.ufg.br/p/18785-publicacoes>
- MURPHY, B.W. (2014). Soil organic matter and soil function – review of the literature and underlying data (May): 155 p.
- NBR 7181 (ABNT, 2016). Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.
- NBR 12770 (ABNT, 1992). Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 5 p.
- NBR 16853 (ABNT, 2020). Ensaio de adensamento unidimensional. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 22 p.
- NBR MB-2887 (ABNT, 1988). Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, 4 p.
- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E. (2001) Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. *Scientia Agrícola*, p 807-812.

- PERES, F., COSTA MOREIRA, J., ALVES SILVA, A., MANNA BELLASALMA, A.C., HATAGIMA, A., MEYER, A., NÓBREGA, A.W. & ROZEMBERG, B. (2003). *É Veneno Ou É Remédio?* Rio de Janeiro.
- PEREZ AMADO, I. (2017). *Avaliação do Potencial de Encapsulamento de um Solo Contaminado com Cloreto de Zinco através da Adição de Cal e Cimento*. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 118 p.
- PÉREZ, A.C. (2018). *Influência de insumos minerais em propriedades físicas de solos tropicais*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103 p.
- PÉREZ GARCÍA, L., SAM PALANCO, C., RODRÍGUEZ FERRER, A. & GARCELL PUYÁNS, L. (2007). Adsorción de iones en suspensiones acuosas de laterita. *Tecnol. Química*, XXVII: 30–38 p.
- PNF (2021). *Plan Nacional de Fertilizantes 2050*. 195p. Fonte: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf>
- PRAKASH, S. & ARUMAIRAJ, P.D. (2013). Effects of acid and base contamination on geotechnical Properties of clay. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. v 4. p 1440-1444.
- QUEIROZ, J.F. & BOEIRA, R.C. (2006). Calagem e controle da acidez dos viveiros de aquicultura. *Circular Técnica* . EMBRAPA, 14: p 1–8.
- QUINTERO, A.R.; GONZÁLEZ, Y.V. VALENCIA, L.A.L. (2017). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos em um suelo tropical. *DYNA*, vol 84, n. 203, pp 283-290.
- REATTO, A.; BRUAND, A.; SILVA, E.M.; GUÉGAN, R.; COUSIN, I. & MARTINS, E.S. (2009). Shrinkage of microaggregates in Brazilian Latosols during drying: significance of the clay content, mineralogy and hydric stress history. *European Journal of Soil Science*, 60, 1106-1116. Doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01189.x
- RODRIGUES, S.M. (2017) *Caracterização mineralógica e microestrutural de um perfil intemperizado de Brasília*. Anápolis: UEG, Monografia de conclusão do Curso de Engenharia Civil. 133 p.

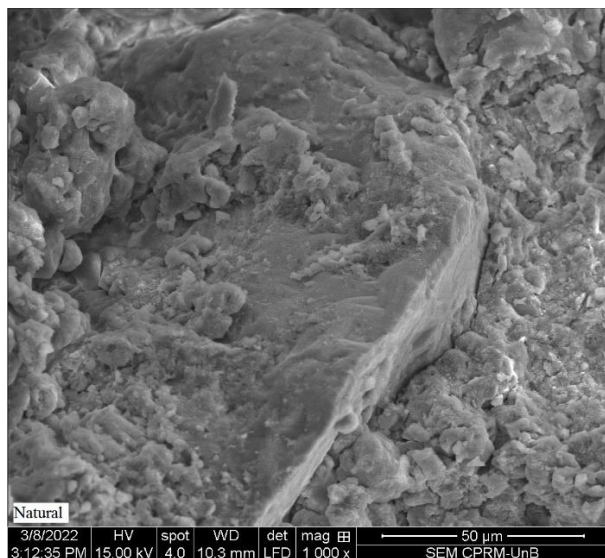
- RONQUIM, C.C. (2010). Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais. Bol. Pesqui. e Desenvolvimento. EMBRAPA., 8: 27 p.
- RUDIO, F.V. (1990). Introdução ao projeto de pesquisa científica. 25. ed. Petrópolis: Vozes.
- SANTOS, G.G., MARCHÃO, R.L., SILVA, E.M., SILVEIRA, P.M. & BECQUER, T. (2011). Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.46, p.1339-1348.
- SENAHA, S.C.F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. Dissertação de Mestrado em Geotecnia - Universidade de Brasília, Brasília DF. 159 p.
- SCHMID, J., ZARIKOS, I., TERZIS, A., ROTH, N. & WEIGAND, B. (2018). Crystallization of urea from an evaporative aqueous solution sessile droplet at sub-boiling temperatures and surfaces with different wettability. *International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*. 91, 80-88.
- SILVA, M.T.A., ROCHA, J.H.A., MONTEIRO, E.C.B., PÓVOAS, Y. V. & KOHLMAN E. R., (2019). Evaluación del ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en concreto. *ALCONPAT*, 9 (1), 79 – 92, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>
- SINGER, M. & EWING, S. (2000). Soil quality. In: Sumner, M. E. (ed.). Handbook of soil science. Boca Raton, p. 271-298.
- SIVAPULLAIAH, P.V. (2009). Effects of soil pollution on geotechnical behaviour of soils. Indian Geotechnical Society. Guntur. 8 p.
- SODRÉ, F.F.; LENZI, E.; COSTA, A.C. (2001). Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos. Química Nova, São Paulo, v.24, n. 3, p 324-330.
- STEFANOSKI, D.C., SANTOS, G.G., MARCHÃO, R.L., PETTER, F.A. & PACHECO, L.P. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.12, p.1301–1309.
- TRABOULSI, M. & WARDANY R. A., (2019). Correlations between dynamic and static mechanical properties of clayey soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10 (1), 2602-2612.
- VARGAS, M. (1977). Introdução à mecânica dos solos. MCgraw-Hill do Brasil, 510 p.

- VALENCIA, Y.G.; SANTOS, M.A.A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FARIAS, M.M. & GITIRANA JÚNIOR, G.F.N. (2007). Una metodología simple para determinar la envolvente de resistencia al corte de suelos no saturados: resultados experimentales y validación. Proc. *XIII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. Isla de Margarita. SVDG e ISSMGE, pp. 710-715
- VALENCIA, Y.G. (2009). Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Tese de doutorado em Geotecnia - Universidade de Brasília, Brasília DF. 183 p.
- VALENCIA, Y.G.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA, G. (2019). Metodologias simples para determinar em solos parcialmente saturados a envoltória de resistência ao cisalhamento. *Revista EIA*. v. 16 (32), pp. 43-53. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1218>
- VALENCIA, Y.G.; QUINTERO, A.R. & LARA, L.A.V. (2022). A laboratory methodology for predicting variations in the geotechnical parameters of soil exposed to solid waste leachates in the field. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100398>

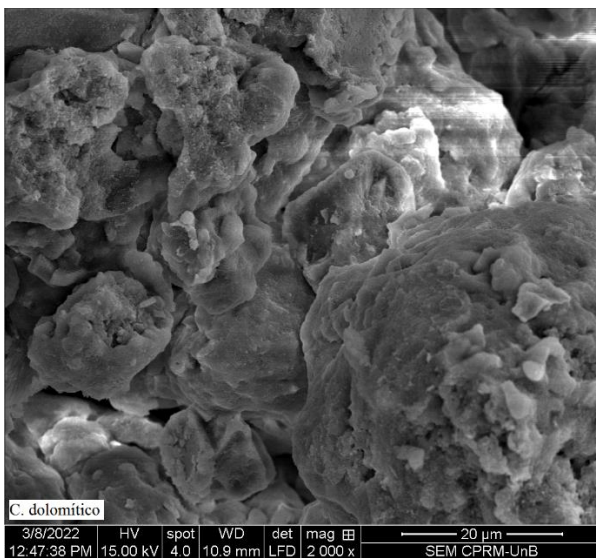
APÊNDICE_A: FIGURAS COMPARATIVAS DAS IMAGENS OBTIDAS COM O MEV

Aumento 1000 vezes:

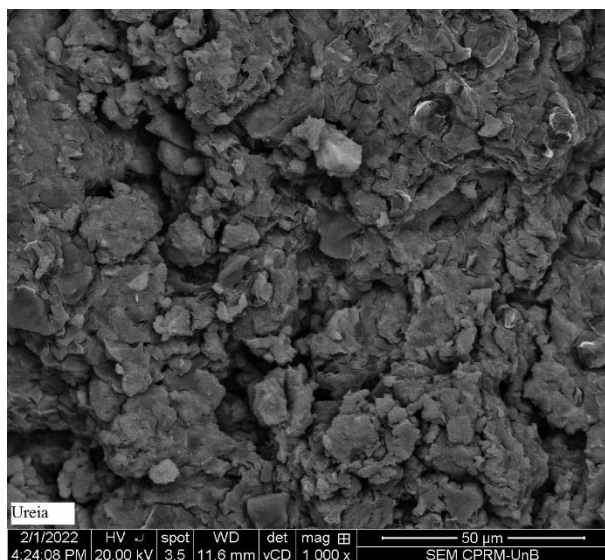
- Solo natural



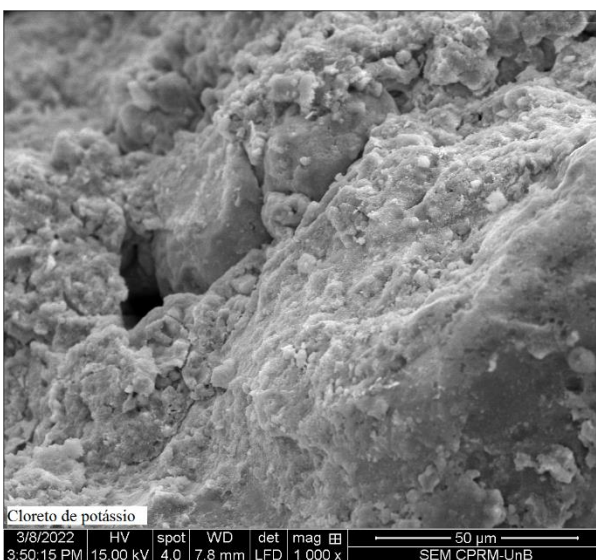
- Calcário dolomítico



- Ureia

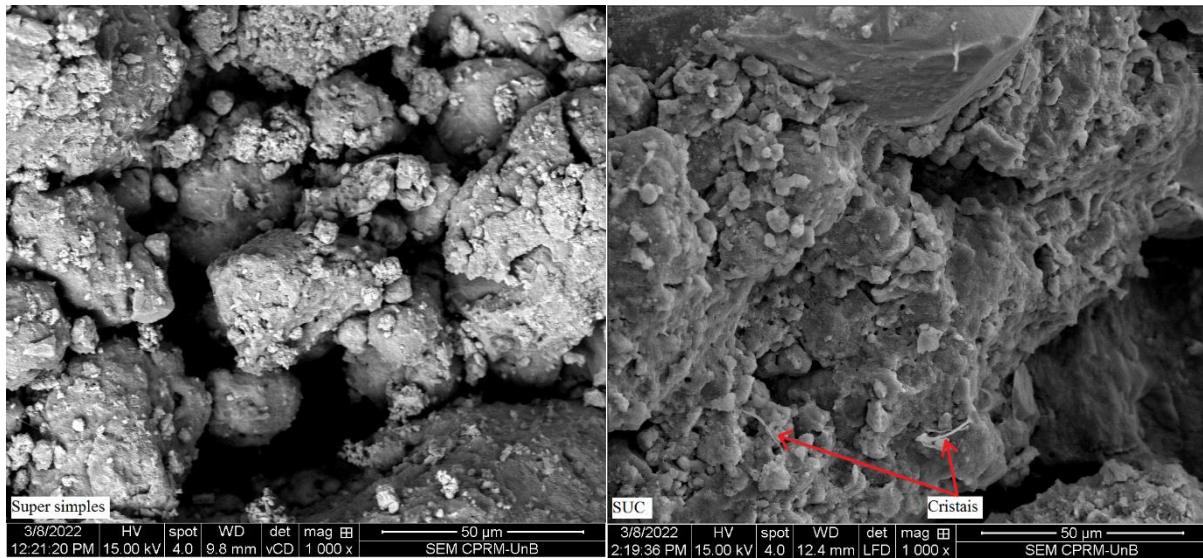


- Cloreto de potássio



- Super simples

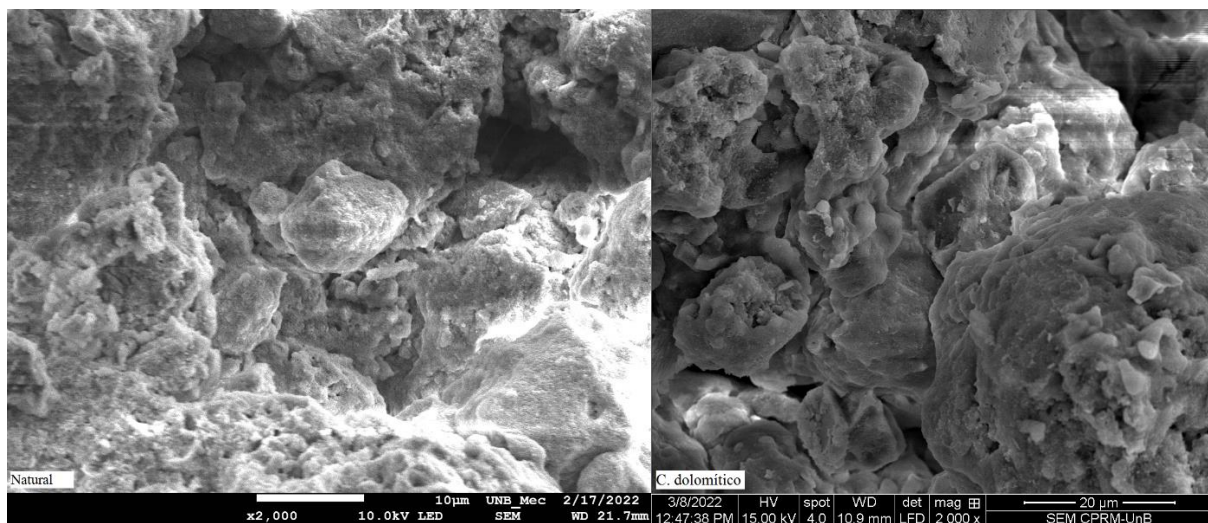
- SUC



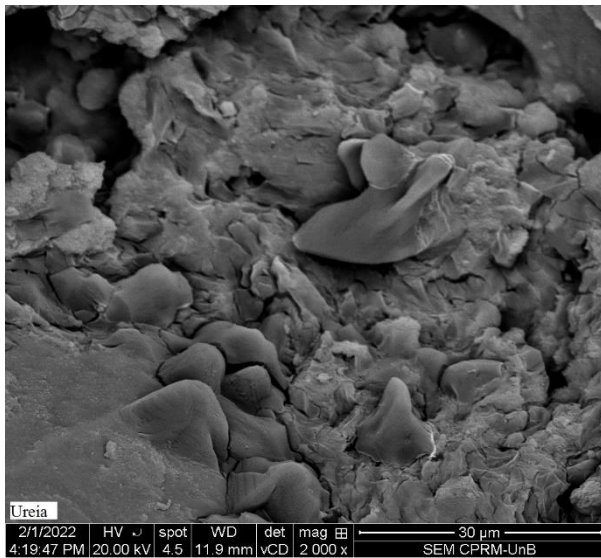
Aumento 2000 vezes:

- Solo natural

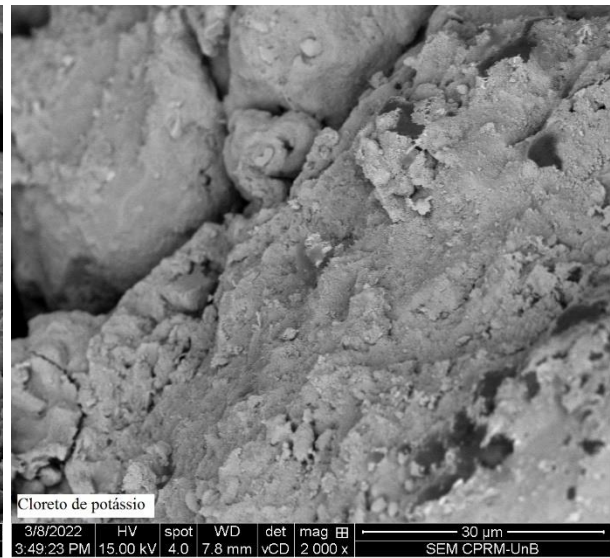
- Calcário dolomítico



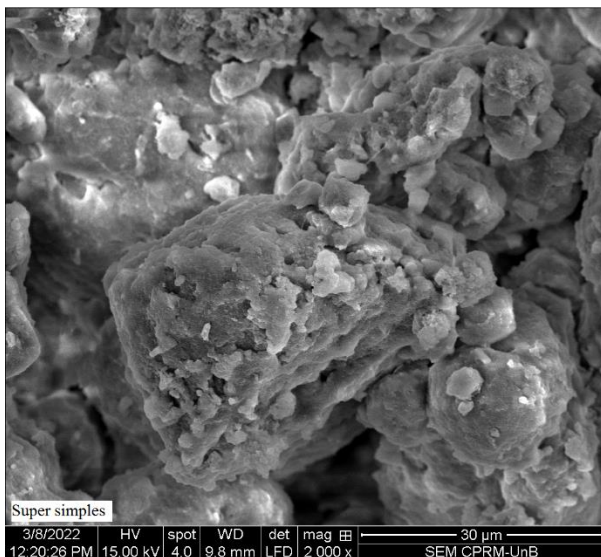
- Ureia



- Cloreto de potássio



- Super simples



- SUC

