

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

**ESTUDO DA MIGRAÇÃO QUÍMICA EM SOLO LATERÍTICO
MELHORADO COM CAL**

PAULO COSTA FERNANDES

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

Coorientador: **RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 370/22

BRASÍLIA – DF, JUNHO DE 2022.

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

**ESTUDO DA MIGRAÇÃO DA QUÍMICA EM SOLO LATERÍTICO
MELHORADO COM CAL**

PAULO COSTA FERNANDES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

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

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc. (UnB)
(COORIENTADOR)**

**GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, D.Sc. (DNIT)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE JUNHO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDES, PAULO COSTA;

Estudo da migração química em solo laterítico melhorado com cal. [Distrito Federal] 2022.

xiv – 105 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Pavimentação

2. pH

3. Granulometria

4. Cal

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDES, P. C. (2022). **Estudo da migração química em solo laterítico melhorado com cal.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 370/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: PAULO COSTA FERNANDES

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Estudo da migração química em solo laterítico melhorado com cal.** GRAU / ANO: Mestre / 2022.

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

Paulo Costa Fernandes

SMBS Chácara 12 – Casa 02

71.080-080 – Brasília/DF – Brasil

*"Sobre ele pousa o Espírito do Senhor,
Espírito de sabedoria e de inteligência,
Espírito de conselho e fortaleza,
Espírito de ciência e de piedade
Espírito do temor do Senhor."*

(Is 11,1-2, musicado por Kiko Argüello)

DEDICATÓRIA

À Deus por guiar a minha vida em Seus passos, a minha família pelo apoio nesta caminhada e ao Sebastião Dutra Filho (in memoriam) que muito me ensinou sobre o comportamento dos pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Começo os meus agradecimentos à minha família. Primeiramente a minha amada esposa, Diana pelo apoio nos momentos difíceis, amparo nos períodos de angústia e sofrimento, compreensão nos momentos de ausência, força nos momentos de dificuldades e fé nos momentos de iluminação. Aos meus filhos Isabela, Ana Clara, Davi e Maria Luísa pela minha necessidade de ausência em diversos momentos a noite e nos finais de semana para estudar e elaborar esta dissertação. Amo muito vocês.

Agradeço ao Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal – DER/DF, representado pelo Sr. Diretor Geral Fauzi em dar todo o suporte para que eu conseguisse adquirir conhecimentos que serão disseminados ao corpo técnico do DER/DF. Também agradeço aos meus colegas de trabalho, em especial o Plínio, Roberto, Gisandra, Willkerson, Dan, Íris, Stênio, Sérgio Eugênio, Bruno, Jarbas, José Tolentino, James, Fernando, Ronaldo, Wilson, Fernando, Sinval, Luís, Aneomar, Nilson, Rafael, Diego, Romário, Bartonildo, Daniel e demais colegas que diretamente ou indiretamente me ajudaram na coleta e preparação das amostras, assim como suporte na elaboração dos ensaios e auxílio na interpretação dos resultados. Continuaremos juntos por bastante tempo, se assim Deus permitir.

Agradeço aos meus irmãos de comunidade que me fortaleceram na fé, e com as suas orações me ajudaram a ter perseverança nos momentos mais difíceis.

Por fim agradeço a todos os membros docente e discente do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, em especial aos professores Camapum, Rafael, Gregório, Michéle, Luiz Guilherme, Ennio, Luciano, Márcio, Manoel, Juan, Luís Fernando, André e Renato por me auxiliarem na minha formação acadêmica como pesquisador e colegas aos de estudo, no qual cito nominalmente Weber, Vinícius Domingues, Darym, Vinícius Levy, Fabiani, Stéphanie, Joaquim, Fernando, Danieli, Daniel, Thiago Brienne, Rodrigo, Isabelle, Mike, Juan, Rocio, Nathalia, Pedro, Alexia, Gabriel, Dhara, Gabriella, Nelson, Karla, Julianny e demais membros que fazem o programa de Geotecnia uma pós-graduação de excelência.

RESUMO

A estabilização química de solos lateríticos com cal é comumente adotada como solução técnica em pavimentos no Brasil, devido à escassez de jazidas apresentando solos com a qualidade adequada e/ou devido ao elevado custo de materiais alternativos como a brita. Esta solução técnica comprova, em ensaios laboratoriais e de campo de curto prazo, melhoras significativas das propriedades do material causadas pela aglutinação das partículas do solo e cimentações geradas. Contudo, análise após médio e longo período decorrido da execução da obra não são comumente realizadas e pesquisas recentes indicam que pode haver desagregação do solo já após um ano de sua disposição em campo. Desconhece-se também os efeitos das migrações químicas para os solos circunvizinhos. A presente pesquisa analisou uma ciclovia construída sobre subleito compactado e sem influência de tráfego pesado de veículos, cuja camada de base foi executada em 2018 com a aplicação, conforme projeto, de 3% de cal e sobre ela implantado um revestimento em CAUQ. Decidiu-se, 2 anos após a execução, dar início ao estudo para verificar migrações químicas que pudessem ter ocorrido. Procedeu-se então a coletas de amostras em 2020 e 2021 para a realização das análises. Constatou-se nas amostras coletadas na base valores de pH em H₂O menores que os especificados e nas camadas inferiores os valores superaram aos esperados. Foi identificado em laboratório que o solo melhorado quimicamente mantido sem contato com o ambiente externo e preservando a umidade, reduz o seu valor de pH ao longo do tempo e que a secagem do material em estufa também causa este efeito redutor do pH, porém, não nos níveis registrados em campo. Após ensaios de pH, granulometria por sedimentação com e sem defloculante e análise química em três pontos da ciclovia e em 4 camadas com profundidades distintas identificou-se que componentes do agente químico presente na camada de base foram identificados até a profundidade máxima coletada, que foi de 70 cm, além da mudança da granulometria do solo em que a fração argila nos ensaios de sedimentação sem o uso do defloculante não foram mais identificadas em 2021, bem como que a fração areia do material aumentou a sua presença no solo não aditivado quimicamente sinalizando para agregações formadas. Ensaios químicos laboratoriais indicaram aumento dos íons de cálcio e magnésio, capacidade de troca catiônica e porcentagem de saturação de bases em todas as amostras analisadas subjacentes a camada melhorada quimicamente, apontando uma relação direta destes valores com o pH. Por fim, além das discussões dos resultados obtido propõem-se nesta dissertação uma metodologia para controle dos teores de cal em campo por meio da curva de “*teor de cal x pH*” e das determinações de pH *in situ*.

ABSTRACT

Chemical stabilization of lateritic soils with lime is a technical solution that is commonly adopted to pavements in Brazil, due to the scarcity of deposits that present soils with an adequate quality level and/or due to the excessive cost of alternative materials such as crushed stone. This technical solution proves, in short-term laboratory and field tests, significant improvements in material properties caused by the agglutination of soil particles and generated cements. However, analysis after a medium and extended period as of the work's completion is not commonly performed and recent research indicates that there may be soil disaggregation as early as a year after its disposal in the field. The effects of chemical migrations to the surrounding soils are also unknown. The present research analyzed a bicycle lane built on compacted subgrade and without the influence of heavy vehicle traffic, whose base layer was executed in 2018 with the application, according to the project, of 3% of lime and a coating in CAUQ was implanted over it. It was decided, 2 years after the work's completion, to commence the study of verifying chemical migrations that might have occurred. Samples were then collected in 2020 and 2021 to conduct the analyses. In the samples collected on the basis, pH values in H₂O were lower than those specified, and in the lower layers the values exceeded those expected. It was identified in the laboratory that chemically improved soil was maintained without contact to the external environment, preserving moisture reduces its pH value over time and that drying the material in an oven also causes this pH reducing effect, however, it does not field recorded levels. After pH tests, sedimentation granulometry with and without deflocculant and chemical analysis at three points of the cycle path and in 4 layers with different depths, it was identified that components of the chemical agent present in the base layer were identified up to the maximum depth collected, which was of 70cm, in addition to the change in soil granulometry in which the clay fraction in the sedimentation tests without the use of the deflocculant were no longer identified in 2021, as well as the sand fraction of the material increasing its presence in the not chemically additive soil, signaling for aggregations formed. Laboratory chemical tests indicated an increase in calcium and magnesium ions, cation exchange capacity and percentage of base saturation in all analyzed samples underlying the chemically improved layer, indicating a direct relationship between these values and pH. Finally, in addition to the discussion of the results obtained, this dissertation proposes a methodology for controlling lime contents in the constructions through the “lime content x pH” curve and pH determinations in the field.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 <i>MOTIVAÇÃO DA PESQUISA</i> | 1 |
| 1.2 <i>HIPÓTESE FORMULADA</i> | 3 |
| 1.3 <i>OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO</i> | 3 |
| 1.3.1 Objetivo geral..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.4 <i>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</i> | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 <i>ESTRUTURAS DE PAVIMENTO</i> | 6 |
| 2.1.1 Solo melhorado/estabilizado com cimento..... | 7 |
| 2.1.2 Solo melhorado/estabilizado com cal..... | 8 |
| 2.2 <i>SOLOS TROPICAIS</i> | 9 |
| 2.2.1 Composição mineralógica..... | 9 |
| 2.2.2 Solos do Distrito Federal..... | 10 |
| 2.2.3 Classificação MCT e MCT-M..... | 11 |
| 2.2.4 Comportamento dos solos profundamente intemperizados..... | 16 |
| 2.2.5 Efeito da cimentação natural dos solos tropicais..... | 17 |
| 2.3 <i>SOLOS TROPICAIS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE COM CAL</i> | 18 |
| 2.3.1 Efeito da alteração do pH nos solos tropicais..... | 18 |
| 2.3.2 Teor mínimo de cal em estabilizações químicas de solos em pavimentos..... | 19 |
| 2.3.3 Lixiviação, migração química e condutividade hidráulica..... | 20 |
| 2.3.4 Variação do pH com o tempo..... | 21 |
| 2.3.5 Capacidade de troca de cátions - CTC..... | 21 |
| 3. MATERIAIS E METODOLOGIAS DE CAMPO E LABORATÓRIO | 23 |
| 3.1 <i>MATERIAIS E METODOLOGIA DE CAMPO</i> | 23 |
| 3.1.1 Local do estudo..... | 23 |
| 3.1.2 Pontos de coleta na ciclovia da DF-003..... | 25 |
| 3.1.3 Caixa de empréstimo do subleito..... | 25 |
| 3.1.4 Planejamento de campo..... | 26 |
| 3.1.5 Terminologia..... | 30 |
| 3.2 <i>METODOLOGIA DE LABORATÓRIO</i> | 31 |
| 3.2.1 Acomodação e preparo das amostras..... | 31 |
| 3.2.2 Determinação do teor de umidade das amostras..... | 31 |
| 3.2.3 Classificação MCT..... | 31 |
| 3.2.4 Caracterização mineralógica..... | 32 |
| 3.2.5 Correção da leitura do densímetro em função do líquido e da temperatura..... | 33 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2.6 | Densidade real dos grãos..... | 34 |
| 3.2.7 | Curva granulométrica por sedimentação..... | 34 |
| 3.2.8 | Variação do pH em H ₂ O, em KCl com o tempo | 35 |
| 3.2.9 | pH em H ₂ O, em KCl e curva do teor de cal | 35 |
| 3.2.10 | Caracterização química em laboratório..... | 36 |
| 4. | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 38 |
| 4.1 | <i>CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA DO TRECHO ESTUDADO</i> | 38 |
| 4.2 | <i>PARÂMETROS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO</i> | 40 |
| 4.3 | <i>TEORES DE UMIDADE DAS AMOSTRAS</i> | 42 |
| 4.4 | <i>CLASSIFICAÇÃO MCT E MCT-M</i> | 43 |
| 4.5 | <i>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA</i> | 44 |
| 4.6 | <i>CORREÇÃO DA LEITURA DO DENSÍMETRO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....</i> | 45 |
| 4.7 | <i>DENSIDADE REAL DOS GRÃOS</i> | 45 |
| 4.8 | <i>VARIAÇÃO DO PH EM H₂O E EM KCL COM O TEMPO.....</i> | 46 |
| 4.9 | <i>CURVA DO TEOR DE ÓTIMO DE CAL</i> | 48 |
| 4.10 | <i>VARIAÇÃO DO PH COM A UMIDADE DO SOLO</i> | 50 |
| 4.11 | <i>VALORES DE REFERÊNCIA PH E NA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</i> | 51 |
| 4.12 | <i>MIGRAÇÃO QUÍMICA</i> | 54 |
| 4.12.1 | Estudo temporal (2020 x 2021)..... | 54 |
| 4.12.2 | Estudo de seção transversal..... | 70 |
| 4.12.3 | Caracterização química em laboratório..... | 86 |
| 4.13 | <i>SUGESTÃO DE VERIFICAÇÃO DO TEOR DE CAL EM CAMPO POR MEIO DO pH ...</i> | 89 |
| 5. | CONCLUSÃO | 92 |
| 5.1 | <i>ESTUDOS DE CAMPO</i> | 92 |
| 5.2 | <i>ESTUDOS LABORATORIAIS PRELIMINARES</i> | 92 |
| 5.3 | <i>MIGRAÇÃO QUÍMICA</i> | 93 |
| 5.4 | <i>SUGESTÃO DE VERIFICAÇÃO DO TEOR DE CAL EM CAMPO POR MEIO DO pH ...</i> | 95 |
| 5.5 | <i>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</i> | 95 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 96 |
| | APÊNDICE A - DRX DAS AMOSTRAS | 100 |
| | APÊNDICE B - CORREÇÃO DA LEITURA DO DENSÍMETRO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA | 105 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas (Modificado DNIT, 2006)..... | 7 |
| Figura 2.2 – Exemplo de minerais predominantes em solos tropicais: (a) Caulinita; (b) Goethita; (c) Gibbsite (Yokozawa <i>et al.</i> , 2017) | 10 |
| Figura 2.3 – Mapa de solos do Distrito Federal (Modificado Embrapa, 2004)..... | 11 |
| Figura 2.4 – Curva de Deformabilidade (Villibor e Alves, 2019) | 13 |
| Figura 2.5 – Gráfico da classificação MCT (Nogami e Villibor, 1980, atualizado em 1995). | 14 |
| Figura 2.6 – Propriedades do solo a serem inseridas no MeDiNa (DNIT, 2021b). | 15 |
| Figura 2.7 – Proposta da nova classificação MCT, MCT-M (Vertamatti, 1988)..... | 15 |
| Figura 2.8 – Parâmetros de uma curva de retenção (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> , 2015). | 16 |
| Figura 2.9 – Formatos típicos de curvas de retenção (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> , 2015)..... | 17 |
| Figura 2.10 – Curva granulométrica de solo laterítico e saprolítico (Wanderley Neto, 2020)..... | 17 |
| Figura 2.11 – Exemplo da curva do teor de cal (DNIT, 2019). | 19 |
| Figura 2.12 – Condutividade hidráulica com várias dosagens e tempo de cura de 28 dias (Modificado Amadi e Okeiyi, 2017)..... | 21 |
| Figura 3.1 – Localização geográfica da ciclovia (DER/DF, 2020)..... | 24 |
| Figura 3.2 – Seção tipo da ciclovia (Modificado DER/DF, 2022)..... | 24 |
| Figura 3.3 – Disposição dos pontos de coleta (Google, 2021)..... | 25 |
| Figura 3.4 – Caixa de empréstimo no Parque Rodoviário do DER/DF, em 2014 (Geoportal, 2020). | 26 |
| Figura 3.5 – Localização por ponto dos furos..... | 27 |
| Figura 3.6 – Disposição dos furos: (a) Ponto 01; (b) Ponto 02; (c) Ponto 03 | 29 |
| Figura 3.7 – Perfil das camadas coletadas. | 30 |
| Figura 3.8 – Amostras para o ensaio MCT com diferentes teores de umidade. Da esquerda para a direita: solo menos úmido para mais úmido..... | 32 |
| Figura 3.9 – Correção da leitura do densímetro em função do líquido e da temperatura..... | 34 |
| Figura 3.10 – Amostras para obtenção da curva teor de cal x pH..... | 36 |
| Figura 4.1 – Pedologia do solo esperado na área de estudo (Modificado DER/DF, 2020)..... | 39 |
| Figura 4.2 – Prospecção do solo silto-argiloso do local de estudo | 39 |
| Figura 4.3 – Prospecção na lateral da ciclovia – corpo de aterro..... | 40 |
| Figura 4.4 – (a) Massa específica aparente seca (ρ_d) de campo em função do teor de umidade (w_0); (b) grau de saturação (S_r) em função do teor de umidade (w_0)..... | 41 |
| Figura 4.5 – Classificação MCT do solo natural. | 43 |
| Figura 4.6 – Classificação MCT-M do solo natural..... | 44 |
| Figura 4.7 – Variação do pH com o tempo. | 46 |
| Figura 4.8 – Variação do pH com o tempo do experimento de Imbrosi <i>et al.</i> (2019)..... | 48 |
| Figura 4.9 – Curvas do teor de cal. | 49 |
| Figura 4.10 – variação das leituras de pH com a variação da umidade do solo. | 51 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.11 – Curvas granulométricas do solo natural e do solo melhorado quimicamente..... | 52 |
| Figura 4.12 – 2020x2021 – Variação do pH em H ₂ O: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c)..... | 58 |
| Figura 4.13 – 2020x2021 – Variação do pH em H ₂ O: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c)..... | 59 |
| Figura 4.14 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 01 sem o uso do defloculante: a) todos os resultados; b) natural e mistura com 3% de cal; c) subleito profundo. | 62 |
| Figura 4.15 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 02 sem o uso do defloculante..... | 64 |
| Figura 4.16 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 03 sem o uso do defloculante..... | 65 |
| Figura 4.17 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 01 com o uso do defloculante. | 66 |
| Figura 4.18 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 02 com o uso do defloculante. | 68 |
| Figura 4.19 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 03 com o uso do defloculante. | 69 |
| Figura 4.20 – Distribuição pH em H ₂ O: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c). | 73 |
| Figura 4.21 – Distribuição pH em KCl: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c)..... | 75 |
| Figura 4.22 – Curvas granulométricas do Ponto 01 sem o uso do defloculante. | 76 |
| Figura 4.23 – Curvas granulométricas do Ponto 02 sem o uso do defloculante | 78 |
| Figura 4.24 – Curvas granulométricas do Ponto 03 sem o uso do defloculante | 80 |
| Figura 4.25 – Curvas granulométricas do Ponto 01 com o uso do defloculante | 81 |
| Figura 4.26 – Curvas granulométricas do Ponto 02 com o uso do defloculante | 83 |
| Figura 4.27 – Curvas granulométricas do Ponto 03 com o uso do defloculante | 84 |
| Figura 4.28 – Medidor de pH portátil | 90 |
| Figura 4.29 – Curva do teor de cal do pH em H ₂ O na umidade ótima e higroscópica..... | 91 |
| Figura A.1 – DRX do Ponto 01: (a) Base; (b) Migração; (c) Subleito..... | 101 |
| Figura A.2 – DRX do Ponto 02: (a) Base; (b) Migração; (c) Subleito..... | 102 |
| Figura A.3 – DRX do Ponto 03: (a) Base; (b) Migração; (c) Subleito..... | 104 |
| Figura B.1 – Curvas de correção das leituras dos densímetros | 105 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Tipos de cales (Silva, 2016)..... | 8 |
| Tabela 2.2 – Exigências químicas e físicas (DNIT, 2019)..... | 8 |
| Tabela 4.1 – Parâmetros do solo obtidos em campo e em laboratório (DER/DF, 2018) | 41 |
| Tabela 4.2 – Teor de umidade das amostras | 42 |
| Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos ensaio MCT. | 43 |
| Tabela 4.4 – Classificação MCT-M..... | 44 |
| Tabela 4.5 – Densidade real dos grãos das amostras | 45 |
| Tabela 4.6 – Extrapolação da variação do pH com o tempo..... | 48 |
| Tabela 4.7 – Classificação granulométrica por sedimentação do solo natural com e sem o uso de defloculante..... | 53 |
| Tabela 4.8 – Classificação granulométrica por sedimentação da base melhorada com 3% de cal com e sem defloculante | 53 |
| Tabela 4.9 – 2020x2021 – pH em H ₂ O, KCl e PCZ | 55 |
| Tabela 4.10 – 2020x2021 – Variação granulométrica sem o uso do defloculante – Ponto 01..... | 63 |
| Tabela 4.11 – 2020x2021 – Variação granulométrica sem o uso do defloculante – Ponto 02..... | 64 |
| Tabela 4.12 – 2020x2021 – Variação granulométrica sem o uso do defloculante – Ponto 03..... | 66 |
| Tabela 4.13 – 2020x2021 – Variação granulométrica com o uso do defloculante – Ponto 01 | 67 |
| Tabela 4.14 – 2020x2021 – Variação granulométrica com o uso do defloculante – Ponto 02 | 68 |
| Tabela 4.15 – 2020x2021 – Variação granulométrica com o uso do defloculante – Ponto 03 | 69 |
| Tabela 4.16 – pH em H ₂ O – Furos Lateral, Central e Afastado..... | 72 |
| Tabela 4.17 – pH em KCl – Furos Lateral, Central e Afastado | 74 |
| Tabela 4.18 – PCZ calculados – Furos Lateral, Central e Afastado | 75 |
| Tabela 4.19 – Variação granulométrica transversal sem o uso do defloculante – Ponto 01 | 77 |
| Tabela 4.20 – Variação granulométrica transversal sem o uso do defloculante – Ponto 02 | 79 |
| Tabela 4.21 – Variação granulométrica transversal sem o uso do defloculante – Ponto 03 | 80 |
| Tabela 4.22 – Variação granulométrica transversal com o uso do defloculante – Ponto 01 | 82 |
| Tabela 4.23 – Variação granulométrica transversal com o uso do defloculante – Ponto 02..... | 83 |
| Tabela 4.24 – Variação granulométrica transversal com o uso do defloculante – Ponto 03..... | 85 |
| Tabela 4.25 – Íons de Cálcio, Magnésio, Potássio, Sódio e Alumínio (mE/100mL) – Ponto 01, em 2020 e 2021..... | 87 |
| Tabela 4.26 – CTC (cmol _d /dm ³) e Saturação por bases (%) – Ponto 01- Laboratório, em 2020 e 2021 . | 87 |
| Tabela 4.27 – Furos central, lateral e afastado – Íons de Cálcio, Magnésio, Potássio e Sódio– Ponto 01- Laboratório..... | 88 |
| Tabela 4.28 – Furos central, lateral e afastado – CTC e Saturação por bases – Ponto 01- Laboratório.. | 89 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

| | |
|--|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AF | Areia Fina |
| AG | Areia Grossa |
| AM | Areia Média |
| Al | Alumínio |
| Al(OH)₃ | Hidróxido de Alumínio – Gibbsita |
| Ar | Argila |
| Ba | Camada de Base |
| c' | Coeficiente de argilosidade |
| CAH | Aluminato de Cálcio Hidratado |
| Ca | Cálcio |
| Ca₂Al₂SiO₇ | Gelenita |
| Ca(OH)₂ | Hidróxido de Cálcio |
| CaO | Óxido de Cálcio - Cal |
| CAUQ | Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| CH-III | Cal hidratada tipo III |
| CNT | Confederação Nacional do Transporte |
| CTA | Capacidade de Troca de Ânions |
| CTC | Capacidade de Troca de Cátions |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| CSH | Silicatos de Cálcio Hidratado |
| CTA | Capacidade de Troca Aniônica |
| CTC | Capacidade de Troca Catiônica |
| DER/DF | Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal |
| DF-003 | Estrada Parque Indústria e Abastecimento |
| DF | Distrito Federal |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| DRX | Difração de Raios X |
| e' | Índice de Laterização |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| Fe₂O₃ | Óxido de Ferro III |
| FeO(OH) | Oxihidróxido de ferro (III) – Goethita |
| FRX | Fluorescência de Raios X |
| Gs | Densidade Real dos Grãos |
| H | Hidrogênio |
| H₂O | Água |
| IBRAM | Instituto Brasília Ambiental |
| ISC | Índice de Suporte Califórnia |
| ICM | Índice da Condição de Manutenção |
| IG | Instituto de Geociência da Universidade de Brasília |
| K | Potássio |
| KCl | Cloreto de Potássio |
| MEAS | Massa Específica Aparente Seca |
| MCT | Metodologia Compactado Tropical |
| MCT-M | Metodologia Compactado Tropical Modificado |
| MeDiNa | Método de Dimensionamento Nacional |
| Mi | Camada de Migração |

| | |
|--|--|
| Mg | Magnésio |
| MgO | Óxido de Magnésio |
| N/A | Não Aplicável |
| Na | Sódio |
| NBR | Norma Brasileira |
| PCZ | Ponto de Carga Zero |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| pH_{H2O} | pH em Água Destilada |
| pH_{KCl} | pH em KCl |
| Pi | Parâmetro de Perda de Imersão |
| PPGG | Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (UnB) |
| SiO₂ | Dióxido de Enxofre |
| Si₂O₅Al₂(OH)₄ | Caulinita |
| Sl | Camada de Subleito |
| SO₃ | Trióxido de Enxofre |
| Sp | Camada de Subleito Profundo |
| SRDF | Sistema Rodoviário do Distrito Federal |
| St | Silte |
| UnB | Universidade de Brasília |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |
| W_{ot} | Teor de Umidade Ótima |

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

É de conhecimento geral que o principal modal de transporte de cargas do Brasil é o rodoviário. No ano de 2020, comparado com o ano de 2019, houve um aumento de 17,38%, no número de veículos destinados exclusivamente ao transporte de carga, passando de 1.934.478 (CNT, 2019) para 2.270.861 veículos (CNT, 2020). No entanto, mesmo com uma malha em torno de 1.720.700 km de extensão, 78,5 % das vias ainda carecem ser pavimentadas (CNT, 2020).

Em relação à malha rodoviária do Distrito Federal – DF, esta realidade é um pouco melhor, pois dos 1.919,70 km de extensão de vias existentes, 1.033,00 km são pavimentadas, representando 54% das rodovias distritais existentes dentro do Sistema Rodoviário do Distrito Federal – SRDF (DER/DF, 2020).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT desenvolveu uma metodologia de avaliação da qualidade das vias pavimentadas no Brasil, por meio do Índice da Condição da Superfície - ICS, o qual aponta que em 2018 50% das rodovias obtiveram o índice *Bom*, 26% o índice *Regular* e 24% o índice *Ruim* (DNIT, 2018).

A busca por melhorias na pavimentação brasileira vem sendo objeto de várias pesquisas em universidades e no meio técnico rodoviário, objetivando, entre suas diversas necessidades, oferecer uma estrutura de pavimento com maior valor agregado do comportamento dos materiais que compõem suas camadas frente às ações de tráfego, clima e disponibilidade ambiental.

Na composição da estrutura do pavimento, as camadas de base e/ou sub-base são geralmente granulares ou melhoradas ou estabilizadas quimicamente (DNIT, 2006). Nas rodovias distritais, o emprego do cascalho laterítico foi amplamente adotado nas obras de pavimentação do DER/DF até 2007. Contudo, tal alternativa técnica caiu em desuso, pela dificuldade de obtenção deste material, principalmente próximo a áreas urbanas, devido a fatores demográficos, de uso e ocupação do solo e ambientais. Em 2019, 2020 e 2021, no Distrito Federal, havia somente uma jazida de cascalho com licença de operação ativa (IBRAM, 2019 atualizado em 2021).

Outro fator importante a ser considerado para o avanço da pavimentação brasileira, é a necessidade de melhorar a classificação indicativa do provável comportamento dos solos nacionais, comumente chamados de solos tropicais, bem como sua ampla utilização nos

projetos de pavimentação. São pioneiros nesse seguimento no Brasil os estudos desenvolvidos por Nogami e Villibor (1980). No entanto, mais esforços devem ser empregados para melhorar o entendimento das propriedades e comportamento hidromecânico desses solos.

Uma solução técnica que vem sendo constantemente adotada nos projetos e construções de estruturas de pavimentos não só do DF, mas do Brasil, em particular em regiões com escassez de materiais pétreos, é o melhoramento ou estabilização química com cal e/ou cimento do solo local, geralmente solos lateríticos finos. Nos anos de 2018 a 2021, 83% das obras de pavimentação licitadas pelo DER/DF apresentaram como solução técnica a melhoria ou estabilização química da base e/ou sub-base (DER/DF, 2022).

Segundo Herrin e Mitchell (1961), os solos estabilizados com cal têm sua plasticidade reduzida, aumentam a resistência à compressão não confinada e majoram o Índice de Suporte Califórnia – ISC. No entanto, tais mudanças de comportamento dependem da mineralogia do solo, como apontam os resultados apresentados por Grim (1962).

Quando o solo estabilizado com cimento é compactado, ligações químicas cimentícias são desenvolvidas, destruindo a plasticidade, aumentando a resistência ao cisalhamento e reduzindo a capacidade de retenção de água de solos argilosos (Limprasert, 1995).

Existem vários estudos, principalmente em laboratório, em que é verificada a melhora das propriedades mecânicas e químicas do solo laterítico quando estabilizados quimicamente (Ayala *et al.*, 2018; Joaquim, 2017). Porém, os períodos de observação não ultrapassaram os 28 dias e as condições de cura ficaram distantes daqueles presentes no campo. Rezende (2003) observou em um trecho experimental com a utilização de um solo profundamente intemperizado a desagregação da estrutura de solo no processo de estabilização com a cal.

Ayala (2020) identificou em amostras de solos lateríticos estabilizados quimicamente e acondicionados dentro de espaços criados no solo natural em campo e extraídos após um ano de cura, que a estabilidade textural e o comportamento mecânico foram comprometidos face às reações químicas da cal com o solo natural. A autora verificou ainda a ocorrência de migração química a partir dos solos estabilizados com cal. Do mesmo modo, no mesmo local, o Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Wanderley Neto (2020), verificou a migração para o solo circunvizinho de compostos químicos oriundos do concreto usado na concretagem de micro estaca *in situ*. Tais constatações mostram a importância de se ampliar os estudos de campo voltados para as bases e sub-bases de estruturas de pavimento estabilizadas quimicamente.

Assim, o presente estudo objetiva a identificação de potenciais mudanças ao longo tempo das características do material constituinte da camada de base melhorada com cal e das camadas suporte (subleito) compactadas, que não foram aditivadas quimicamente. A avaliação foi realizada por meio de ensaios realizados nos materiais compondo uma estrutura de pavimento flexível coletados após o segundo ano de uso da via, formada por revestimento asfáltico e base de solo laterítico melhorado quimicamente com cal.

1.2 HIPÓTESE FORMULADA

Os solos tropicais em condições de clima tropical quando melhorados quimicamente com cal podem ter suas propriedades e comportamento afetados com o tempo devido a ação e migração dos compostos químicos a eles incorporados podendo inclusive afetar as propriedades e comportamento de solos circunvizinhos.

1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a ocorrência de migração química a partir de uma camada de base em solo laterítico melhorada com cal compondo uma estrutura de pavimento revestido em CAUQ. Objetiva-se realizar os estudos considerando-se os aspectos espacial e temporal.

1.3.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral da pesquisa, os seguintes objetivos específicos foram elencados:

- Estudar e definir a localização dos pontos de coleta de amostras que apresentem representatividade e homogeneidade para atender ao objetivo geral proposto;
- Verificar, em laboratório, se é possível identificar em um ambiente controlado, a variação do pH do solo aditivado quimicamente ao longo do tempo de modo a estimar o seu impacto nas leituras com 2 anos de diferença entre as amostras coletadas em relação à execução da obra;
- Verificar se as curvas de *teor de cal x potencial hidrogeniônico* em água (H₂O) e em cloreto de potássio (KCl) divergem significativamente para solos

- ensaiados na umidade ótima e na umidade higroscópica;
- Verificar se o teor de umidade em que se encontra o solo influencia na leitura do pH de modo a potencializar o uso deste parâmetro no controle de qualidade de obras fazendo uso de solos melhorados ou estabilizados quimicamente com cal;
 - Avaliar a ocorrência espacial e temporal de migrações químicas por meio da realização de pH em água H₂O e em KCl das amostras localizadas em diversas profundidades e locais;
 - Verificar, considerando os aspectos espacial e temporal, o impacto das migrações químicas na granulometria dos solos compondo as camadas analisadas ou situados próximos a estrutura de pavimento;
 - Verificar se há uma relação direta do pH do solo com a presença de íons básicos, capacidade de troca de cátions e saturação por bases na migração química do solo;
 - Verificar se é possível correlacionar os valores de pH encontrados em campo com o teor de cal aplicado na melhoria química.
 - Concluir com base nas análises realizadas se houve ou não migração química *in situ* e se ela poderá vir a ser prejudicial ao desempenho da via conforme projetado.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos conforme descrito a seguir.

- Introdução: Apresenta os fatos que motivaram a dissertação. Também constam da introdução os objetivos gerais, específicos e a estrutura da dissertação;
- Revisão Bibliográfica: Neste capítulo são apresentados os estudos científicos que embasam o tema da dissertação dividido em estruturas do pavimento, solos tropicais e solos tropicais estabilizados quimicamente com cal;
- Materiais e Metodologias de campo e laboratório. A dissertação detalha neste capítulo os processos e procedimentos que foram adotados para estudar as amostras de solo. O capítulo é dividido em dois tópicos principais, materiais e metodologia de campo e materiais e metodologia de laboratório;
- Apresentação e Análise dos Resultados. São expostos e analisados neste capítulo

os dados obtidos nos ensaios laboratoriais objetivando entender as transformações composicionais que poderiam estar ocorrendo em campo e que poderiam impactar nas propriedades e comportamento dos solos;

- Conclusão: Neste capítulo são expostas as principais conclusões obtidas dos estudos elaborados e a proposição de novas pesquisas a serem realizadas futuramente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica que balizou esta pesquisa. O capítulo é dividido em três tópicos principais.

O primeiro tópico, estruturas do pavimento é subdividido em duas partes: solos melhorados/estabilizados com cimento; e solos melhorados/estabilizados com cal, que é o foco da pesquisa.

Já o segundo tópico aborda os solos tropicais e está dividido em cinco subtópicos: Composição mineralógica; solos tropicais do Distrito Federal; classificação MCT e MCT-M; comportamento dos solos profundamente intemperizados; e o efeito da cimentação natural dos solos tropicais.

Por fim, o último tópico abrange em cinco partes os solos tropicais aditivados quimicamente com cal, no qual aborda em subtópicos o efeito da alteração do pH nos solos tropicais; o teor mínimo de cal em estabilizações químicas de solos em pavimento; lixiviação, migração química e condutividade hidráulica; variação do pH com o tempo; e capacidade de troca de cátions – CTC.

2.1 ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Os pavimentos asfálticos são geralmente constituídos por revestimento em Concreto Asfáltico Usinado (CAUQ, entre outros), camadas de base, sub-base e, em certos casos, reforço do subleito, as quais geralmente são constituídas por materiais granulares ou solos estabilizados física ou quimicamente. Os revestimentos asfálticos geralmente são submetidos a esforços de compressão e de tração à flexão e as demais camadas submetidas à compressão (Bernucci *et al.*, 2006).

Em relação às camadas estabilizadas quimicamente destacam-se os solos estabilizados com cal e/ou com cimento (DNIT, 2006). A Figura 2.1 representa melhor a classificação das estruturas usuais que compõem o pavimento asfáltico.

Os princípios que motivam a utilização de estabilização química podem ser resumidos praticamente em quatro mecanismos: substituição das moléculas de água e cátions, melhoria das ligações entre os agregados das partículas argilosas, floculação ou dispersão (Lima, 1981).

Dentre os aditivos químicos que se espera a melhoria das propriedades do solo destacam-se a cal e o cimento.

Por muito tempo a definição da quantidade de estabilizante químico a ser utilizado em

projeto/obra foi obtida por critérios empíricos. Com o advento da Norma de ensaio n.º 419 (2019b) o DNIT passou a adotar, para solo-cal, a porcentagem mínima de cal para estabilização química do solo com fundamento no critério do pH. De acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2016) o teor usualmente adotado em solo-cal é 5% ou 6%.

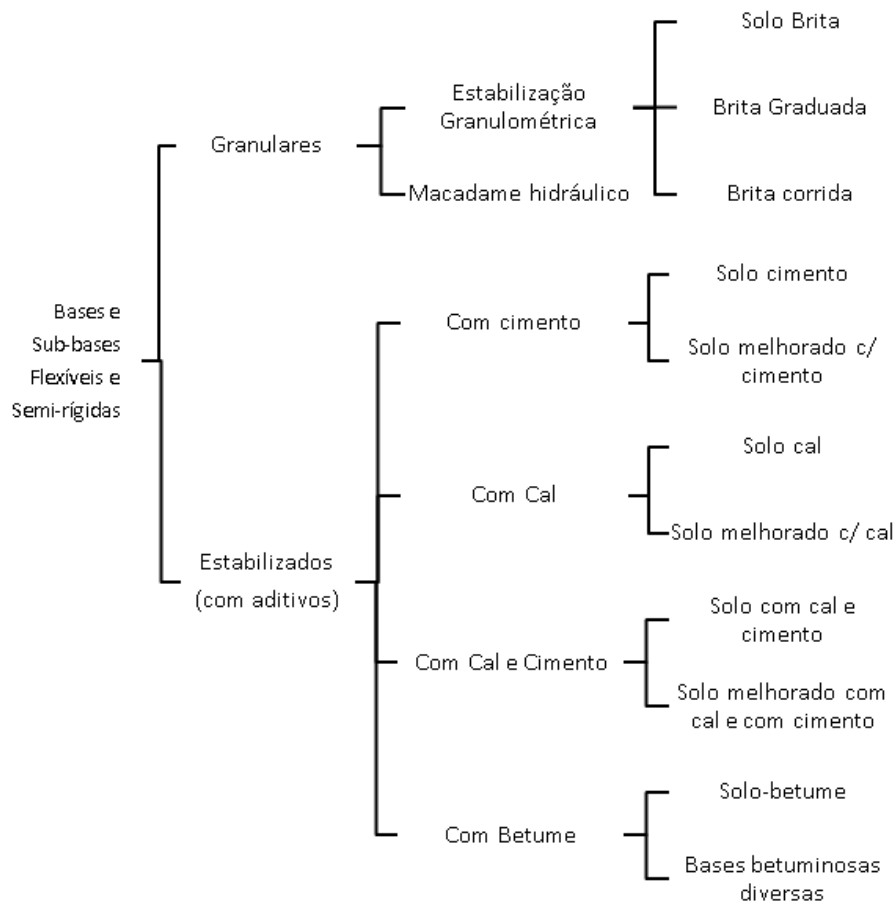


Figura 2.1 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas (Modificado DNIT, 2006)

2.1.1 Solo melhorado/estabilizado com cimento

O cimento *Portland* é um material finamente moído que ao ser misturado com água sofre uma reação química exotérmica e, após endurecimento, mantém resistência até debaixo de água (Vieira, 2010).

Em casos gerais, é esperada, com o uso do cimento do solo, a redução da plasticidade, pois os íons de cálcio liberados durante a reação inicial de hidratação do cimento são usados para a redução da plasticidade do solo (Grim, 1962). Contudo este mesmo autor demonstrou que, nos solos caoliníticos, o aumento dos íons de cálcio acarreta o acréscimo de sua

plasticidade.

2.1.2 Solo melhorado/estabilizado com cal

A cal é comercializada virgem – CaO ou hidratada – Ca(OH)₂ (Silva, 2016). No processo de hidratação da cal, ocorre a liberação de calor (Herrin e Mitchell, 1961). O óxido de cálcio é produto das rochas carbonatadas. Silva (2016) apresenta, na Tabela 2.1, os tipos de cales obtidas no mercado nacional.

Tabela 2.1 – Tipos de cales (Silva, 2016)

| Composição química | Nomenclatura |
|--|-------------------------------|
| CaO | Cal calcária virgem |
| CaO.MgO | Cal dolomítica virgem |
| Ca(OH)₂ | Cal calcária hidratada |
| Ca(OH)₂.MgO | Cal dolomítica mono hidratada |
| Ca(OH)₂.Mg(OH)₂ | Cal dolomítica bi hidratada |

Tabela 2.2 – Exigências químicas e físicas (DNIT, 2019).

| Parâmetros Físico-químicos | Unid. | Cal Virgem | Cal Hidratada |
|---|--------------|---------------------|----------------------|
| Química | | | |
| Óxido total (CaO + MgO)t Base não volátil | % | ≥ 90,0 | ≥ 90,0 |
| Óxido de Cálcio disponível (CaO disp.) | % | ≥ 80,0 | ≥ 65,0 |
| Hidróxido de Cálcio Ca(OH) ₂ | % | - | ≥ 85,0 |
| Óxido de Magnésio (MgO) | % | ≤ 5,0 | ≤ 5,0 |
| CO ₂ | % | ≤ 4,0 | ≤ 4,0 |
| SO ₃ | % | ≤ 2,0 | ≤ 2,0 |
| Umidade | % | - | ≤ 2,0 |
| Reatividade com elevação da temperatura | minuto | ΔT 30° ≤ 10 minutos | - |
| Física (Granulometria) | | | |
| Material passante em peneira 9,6 mm | % | 100 | - |
| Material passante em peneira 4,8 mm | % | 100 | - |
| Material passante em peneira 2,0 mm | % | ≥ 95,0 | - |
| Material passante em peneira 0,21 mm | % | ≥ 70,0 | ≥ 98,0 |
| Material passante em peneira 0,075 mm | % | ≥ 50,0 | ≥ 93,0 |

Comercialmente, as cales hidratadas são classificadas de acordo com o grau de pureza e foram normatizadas, primeiramente, pela NBR 7175 (ABNT, 2003) e, posteriormente, pela

normativa DNIT 418-EM (2019a). Na Tabela 2.2 são apresentadas as exigências mínimas químicas e físicas em obras rodoviárias.

2.2 SOLOS TROPICAIS

2.2.1 Composição mineralógica

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), os solos podem ser divididos mineralogicamente em minerais primários e secundários, argilominerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Em solos profundamente intemperizados, a fração de óxido e hidróxido de ferro e alumínio se torna importante e estes influenciam na estrutura e no comportamento hidromecânico dos solos tropicais e são solos geralmente ricos no argilomineral caulinita (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Nos minerais primários, o quartzo (SiO_2) apresenta grande resistência a ações de intemperismo, estando presente em solos poucos e muito intemperizados (Yokozawa *et al.*, 2017). Senaha (2019) verificou que o quartzo possa surgir do processo de intemperização do solo.

Do intemperismo dos minerais primários, são formados os argilominerais nos quais se destacam os grupos da caulinita, mica, esmectita, clorita, vermiculita, paligorskita e da sepiolita, além dos interstratificados. Cabe salientar que a mica pode ser também de origem primária. Dos argilominerais citados, cabe maior atenção a caulinita, que é bastante presente nos solos do Distrito Federal (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015, Yokozawa *et al.*, 2017).

Também, nos solos tropicais, há uma grande presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A hematita é o óxido de ferro mais comum encontrado no solo e que dá a coloração vermelha e sua fórmula química é o Fe_2O_3 e o hidróxido de ferro bastante presente em solos intemperizados é a goethita, que gera a coloração geralmente mais amarelada no solo e tem a formulação química $\text{FeO}(\text{OH})$. Em duas amostras analisadas por Yokozawa *et al.* (2017), foram observadas a presença de ambos.

Em relação aos compostos que contém alumínio em sua estrutura, pode ser destacada a gibbsita – $\text{Al}(\text{OH})_3$, presente em solos que sofreram intemperismo por intensa lixiviação em climas quentes e úmidos (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

A Figura 2.2 apresenta imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) de minerais predominantes em solos tropicais contendo alguns minerais (Yokozawa *et al.*,

2017).

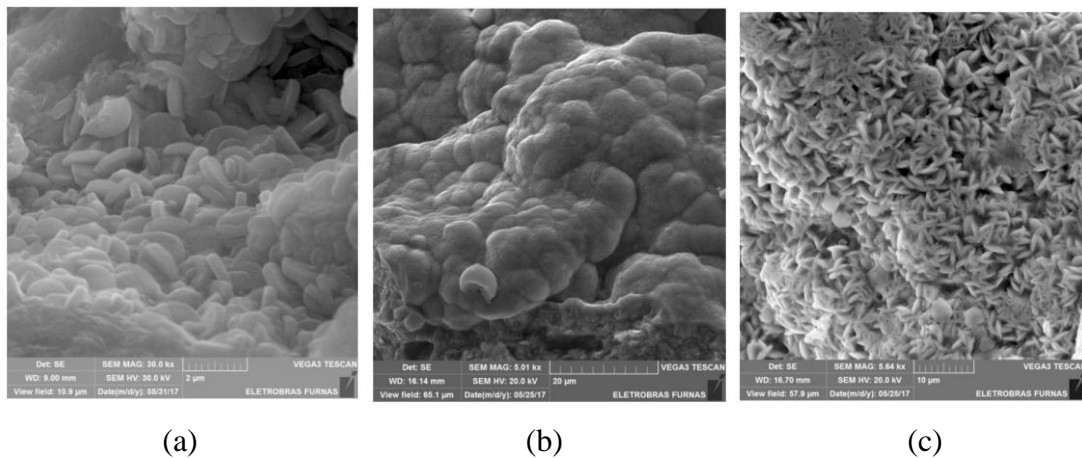
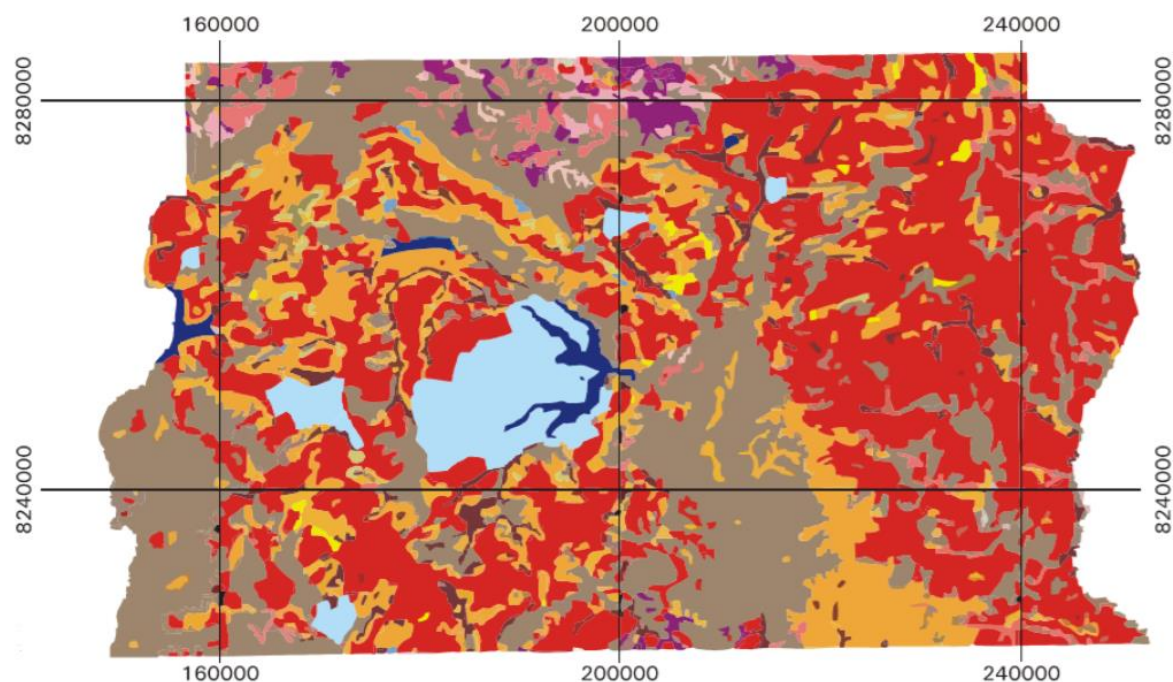


Figura 2.2 – Exemplo de minerais predominantes em solos tropicais: (a) Caulinita; (b) Goethita; (c) Gibbsita (Yokozawa *et al.*, 2017)

2.2.2 Solos do Distrito Federal

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2004), os latossolos estão presentes em 54,50 % de toda a área do Distrito Federal, sendo 38,92% de latossolos vermelhos e 15,58% latossolos vermelho-amarelos, conforme a Figura 2.3. Os latossolos apresentam-se, geralmente, na forma agregada, possuindo elevada porosidade, o que faz com que geralmente apresentem elevado potencial colapsível (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Correspondendo a 30,98% da área do Distrito Federal (Embrapa, 2004) os cambissolos são solos em formação ou transformação que apresentam permeabilidade lenta ou muito lenta (Embrapa, 2018).



| classificação | Área (ha) | Área (%) |
|--|-----------|----------|
| Áreas urbanas | 25888,86 | 4,47 |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 4614,65 | 0,80 |
| Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico | 12100,16 | 2,09 |
| Cambissolo | 179493,57 | 30,98 |
| Chernossolo | 467,51 | 0,08 |
| Espodossolo + Plintossolo | 701,39 | 0,12 |
| Lago, lagoa, represa | 6135,36 | 1,06 |
| Latossolo Vermelho | 225544,02 | 38,92 |
| Latossolo Vermelho-Amarelo | 90297,77 | 15,58 |
| Neossolo Flúvico | 1041,50 | 0,18 |
| Neossolo Quartzânico | 2931,82 | 0,51 |
| Nitossolo | 2309,13 | 1,36 |
| Plintossolo Distrófico + Solos Hidromórficos Indiscriminados | 7862,37 | 0,40 |
| Solos Hidrodômórficos | 20047,31 | 3,46 |

Figura 2.3 – Mapa de solos do Distrito Federal (Modificado Embrapa, 2004).

2.2.3 Classificação MCT e MCT-M

A metodologia MCT desenvolvida por Nogami e Villibor, em 1980, a partir dos experimentos originais de Parsons que aperfeiçoou os estudos de Iowa Lafleur *et al.* apresenta os seguintes ensaios: compactação, capacidade de suporte, infiltrabilidade, permeabilidade, perda de massa por imersão em água, penetração da imprimadura e controle de compactação, além de subsidiar outros ensaios de resistividade mecânica dos solos (Nogami e Villibor, 1995).

A partir dos ensaios de compactação e da perda de massa por imersão em água, é possível obter a classificação MCT do solo com base no seu comportamento, em laterítico ou

não laterítico, e em subgrupos de areia, arenoso, argiloso ou siltoso.

Para a classificação MCT, é necessário variar a umidade do solo em porcentagens conhecidas com base na estimativa da umidade ótima e obter os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de argilosidade, c' : na curva de deformabilidade, o coeficiente c' é a inclinação da reta obtida pela variação do afundamento do corpo de prova e o número de golpes correspondente ao Mini-MCV 10, conforme Equação 2.1, e mais bem elucidado na Figura 2.4.

$$c' = \frac{\Delta(\Delta a_n)}{\Delta' Mini - MCV'} \quad (2.1)$$

Onde: $\Delta(\Delta a_n)$ = variação do afundamento do corpo de prova;
 $\Delta Mini-MCV$ = variação do Mini-MCV no mesmo intervalo considerado para $\Delta(\Delta a_n)$.

- Coeficiente d' : é a relação da variação da massa específica aparente seca – MAES (kg/m³) com a variação do teor de umidade (%) na curva de compactação de 10 golpes do ensaio.

$$d' = \frac{\Delta MEAS}{\Delta hc} \quad (2.2)$$

Onde: $\Delta MEAS$ = variação da massa específica aparente seca;
 Δhc = variação da umidade de compactação.

- Parâmetro Pi : obtido no ensaio de perda de massa por imersão em água. A perda de massa por imersão é a relação entre a massa desprendida após 24hs de imersão do corpo de prova em água pela massa extrudada do corpo de prova após a compactação, corrigida por um fator de correção e é expressa em porcentagem.

$$Pi (\%) = 100 \times \frac{Md}{Me} \times F_c \quad (2.3)$$

Onde: Md = massa desprendida (g);
 Me = massa extrudada (g).
 F_c = Fator de correção: 1,0 se o desprendimento for normal e 0,5 se o desprendimento for em bloco.

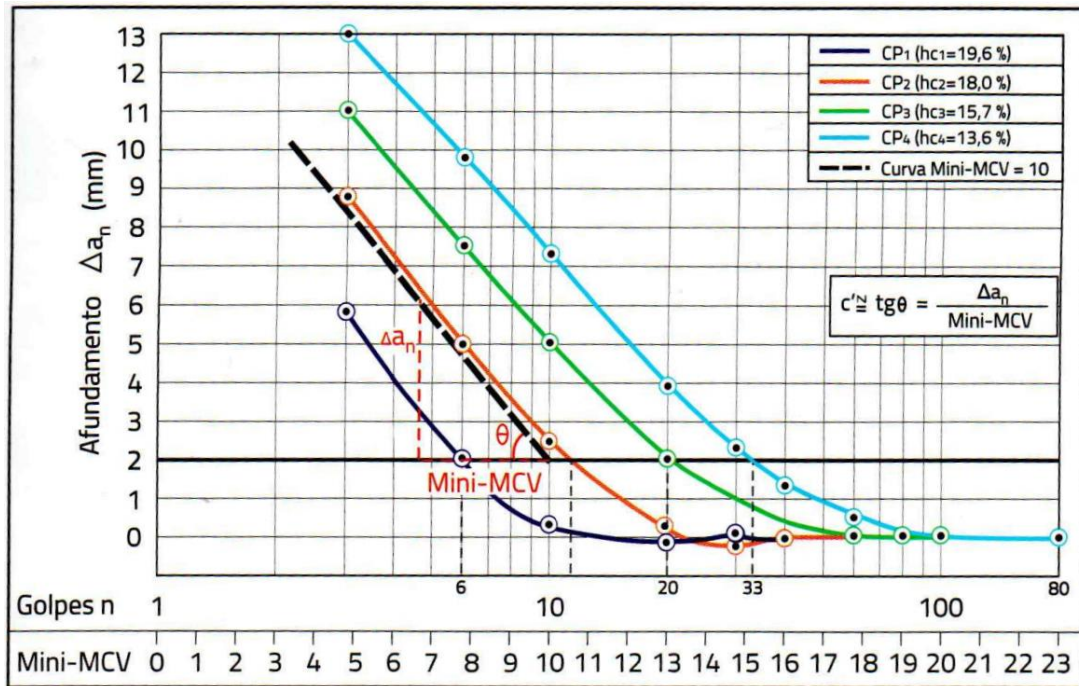


Figura 2.4 – Curva de Deformabilidade (Villibor e Alves, 2019)

- Índice de laterização, e' : o índice de laterização é calculado utilizando o índice d' , correspondente a 10 golpes e do parâmetro Pi .

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (2.4)$$

Onde: Pi = Perda por massa de imersão em água (%);
 d' = Coeficiente d' .

Segundo Villibor e Alves (2019), as areias argilosas bem graduadas possuem valor de d' elevados, enquanto argilas lateríticas possuem valor de d' baixo. Também segundo este autor Siltes saprolíticos e areias pouco coesivas não possuem picos acentuados, o que dificulta a determinação do valor de d' .

Em relação ao parâmetro Pi , Nogami e Villibor (1995) informam que para solos lateríticos compactados segundo o procedimento Mini-MCV, os resultados diminuem de valor após o teor de umidade correspondente ao Mini-MCV igual a 10. Para argilas e argilas arenosas lateríticas, o Pi para o Mini-MCV igual a 10 é praticamente zero. Por fim, solos saprolíticos apresentam Pi muito superiores, quando comparados com solos lateríticos, obtendo-se valores de Pi superiores a 250%.

O índice e' foi concebido para indicar ou não o comportamento laterítico dos solos. Nogami e Villibor (1995) verificaram que valores de $d' < 20$ (kg/m³)/% e $Pi < 100$ % indicam comportamentos lateríticos do solo.

Com base nestas premissas apresentadas acima, estes autores elaboraram o ábaco para a classificação MCT dos solos, conforme Figura 2.5.

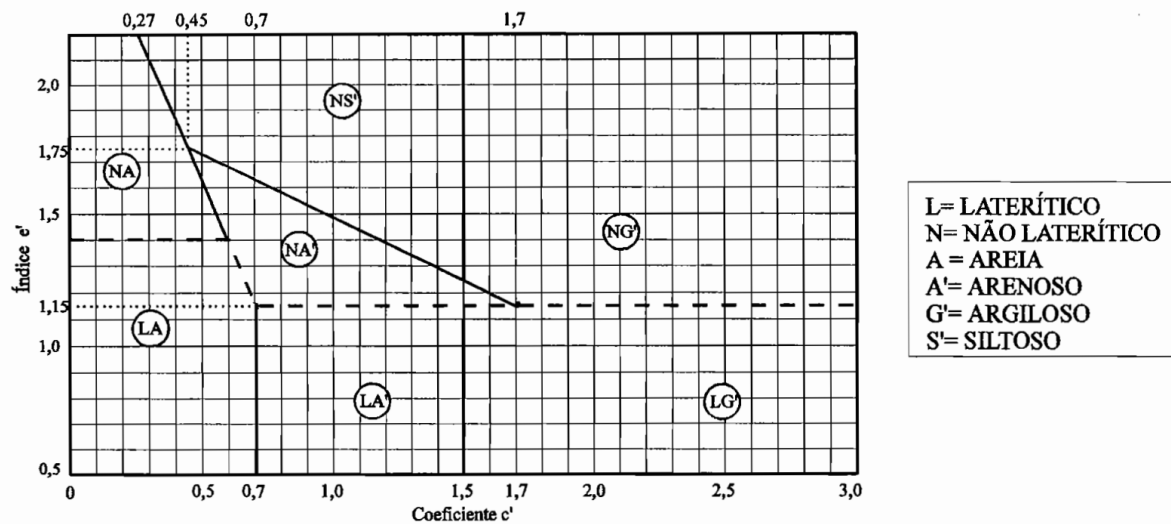


Figura 2.5 – Gráfico da classificação MCT (Nogami e Villibor, 1980, atualizado em 1995).

Cabe destacar que na nova metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis – Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa lançada pelo DNIT (2021a) e aprimorada pela Instrução de serviço n.º 247 (2021b), a classificação MCT ganhou maior importância, pois nas informações a serem inseridas sobre as propriedades do material solo no *software* do MeDiNa é necessário dispor de dados de classificação do grupo MCT, o coeficiente c' e o índice e' , gerando, desta maneira, um banco de dados dos solos cadastrados no aplicativo computacional (Figura 2.6).

Vertamatti (1988) propôs a alteração do ábaco da classificação MCT, considerando a possibilidade de o solo ter um comportamento entre o laterítico e o não laterítico, que foi denominado transicional (Figura 2.7). Também foi proposta a inclusão de solos não lateríticos silto-argilosos (NS'G'), transicionais arenosos-argilosos (TA'G') e os lateríticos arenosos-argilosos (LA'G'). Sua proposta também usa como referência da umidade ótima o MINI-MCV igual a 10.

Este é, portanto, um aspecto que merece maiores reflexões sobre a oportunidade ou não de se adotar a complementação realizada por Vertamatti (1988) no âmbito do Método de

Dimensionamento Nacional – MeDiNa proposto pelo DNIT(2021).

Propriedades da Camada 3

| BASE DE DADOS | |
|------------------------------|--|
| Projeto | |
| Solo Argiloso LG'(1) | |
| Solo Arenoso-argiloso LG'(2) | |
| Solo Argiloso LG'(5) | |
| Solo Siltoso NS' | |
| Solo Fino NA | |
| Solo Arenoso Fino LA' | |
| Solo Argiloso LG'(4) | |
| Solo LG' (s:1521) | |
| Solo NA' (s:1492) | |
| Solo NG' (s:1494) | |

| SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO | |
|--------------------------------------|--|
| Material | Solo Argiloso LG'(5) |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 20,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 |
| Contato | Não Aderido |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Linear |
| Módulo (MPa) | 393 |
| Características | |
| Descrição do Material | Solo do Maranhão |
| Grupo MCT | LG' |
| MCT - Coeficiente c' | 2,48 |
| MCT - Índice e' | 0,79 |
| Massa específica (g/cm³) | 1,458 |
| Umidade Ótima (%) | 26,5 |
| Energia Compactação | Intermediária |
| Norma ou Especificação | DNIT ES 139 |
| Deformação Permanente | |
| Modelo: | $ep = psi1.(s3^psi2).(sd^psi3).(N^psi4)$ |
| Coeficiente de Regressão (k1 ou p... | 0,021 |
| Coeficiente de Regressão (k2 ou p... | 0,606 |
| Coeficiente de Regressão (k3 ou p... | 2,048 |
| Coeficiente de Regressão (k4 ou p... | 0,091 |

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Figura 2.6 – Propriedades do solo a serem inseridas no MeDiNa (DNIT, 2021b).

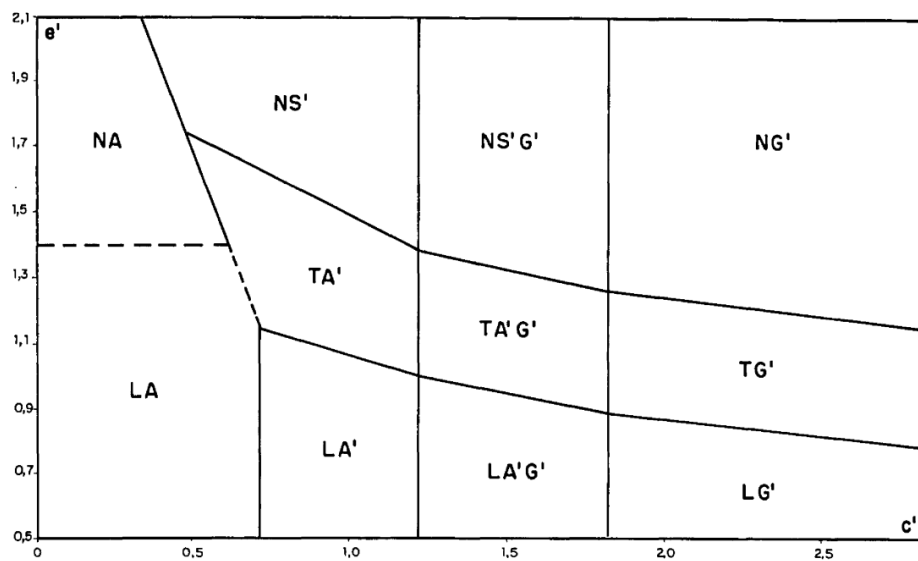


Figura 2.7 – Proposta da nova classificação MCT, MCT-M (Vertamatti, 1988).

2.2.4 Comportamento dos solos profundamente intemperizados

O comportamento do solo é bastante influenciado pelo seu grau de saturação. Fredlund (1993) identifica a curva de retenção como uma das principais propriedades para entender o comportamento do solo. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015) a curva de retenção apresenta três zonas distintas: saturada, desaturação e residual, conforme apresentado na Figura 2.8.

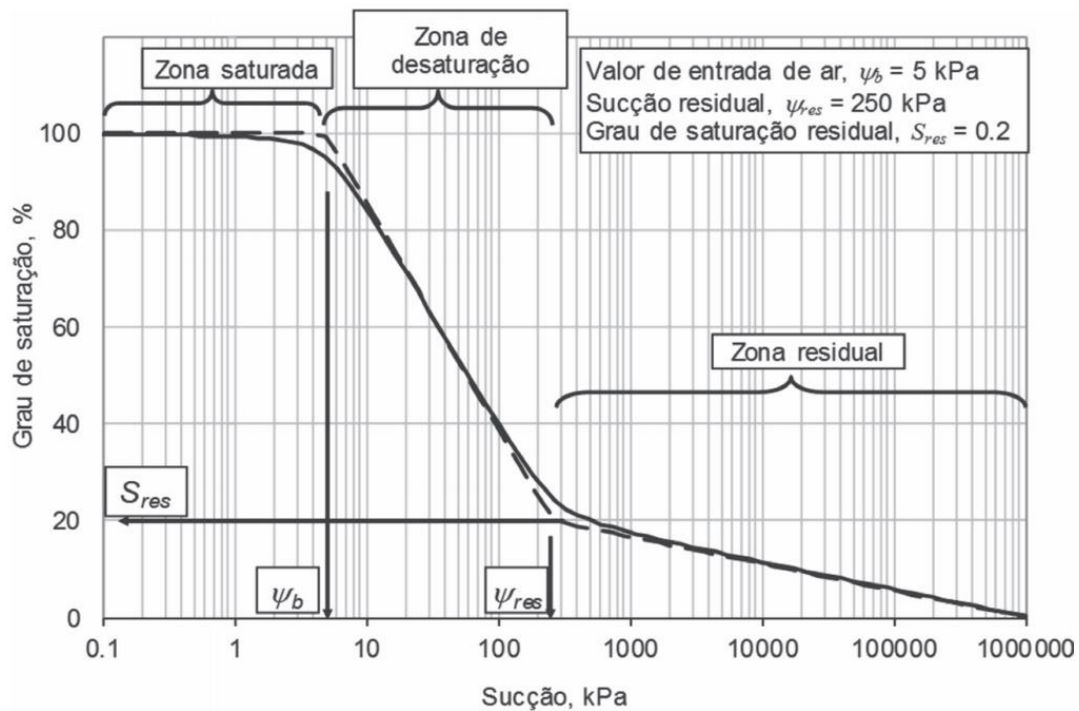


Figura 2.8 – Parâmetros de uma curva de retenção (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

É bem possível que, solos profundamente intemperizados apresentam estas zonas distintas duas vezes, ou seja, apresentam comportamento bimodal, conforme elucidado na Figura 2.9. No Distrito Federal, Rezende (2003) e Silva (2009) estudaram tal propriedade e identificaram solos bimodais. Além disso, Restrepo (2010) verificou que tal característica faz com que o fluxo se dê por grande parte nos macroporos do solo. A Figura 2.9 apresenta os formatos típicos das curvas de retenção dos solos, conforme Camapum de Carvalho *et al.* (2015).

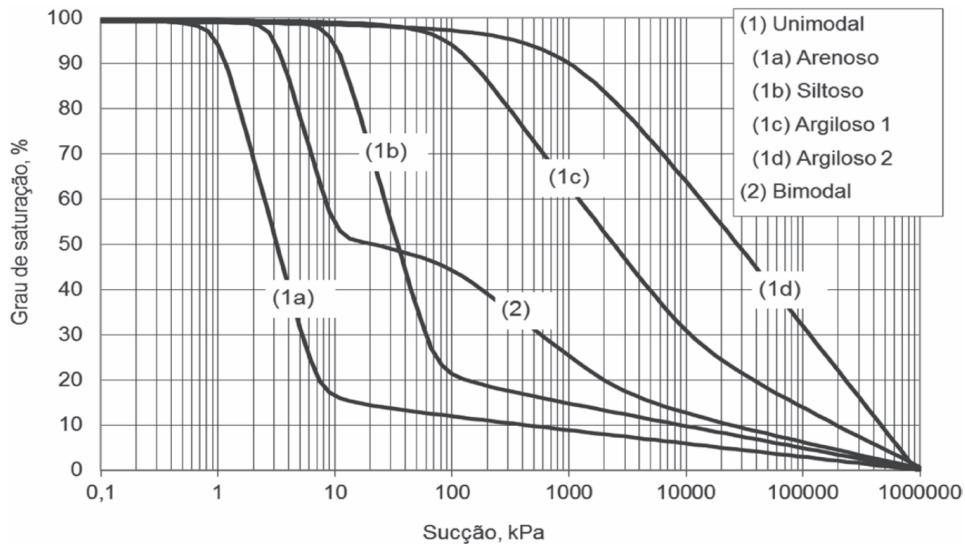


Figura 2.9 – Formatos típicos de curvas de retenção (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015)

2.2.5 Efeito da cimentação natural dos solos tropicais

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, em destaque a gibbsita e a goethita, acabam cimentando os solos lateríticos, gerando agregações com certa estabilidade estrutural. A adoção no ensaio de sedimentação do uso ou não de defloculante ressalta esta característica aglutinante do solo laterítico.

Além disso, segundo estes autores, o comportamento dos solos tropicais é conduzido pelo solo agregado e não pela partícula de argila em si. Na Figura 2.10, obtida a partir de estudos de Wanderley Neto (2020), é possível verificar a variação significativa da curva granulométrica, em especial do solo laterítico com e sem o uso do defloculante.

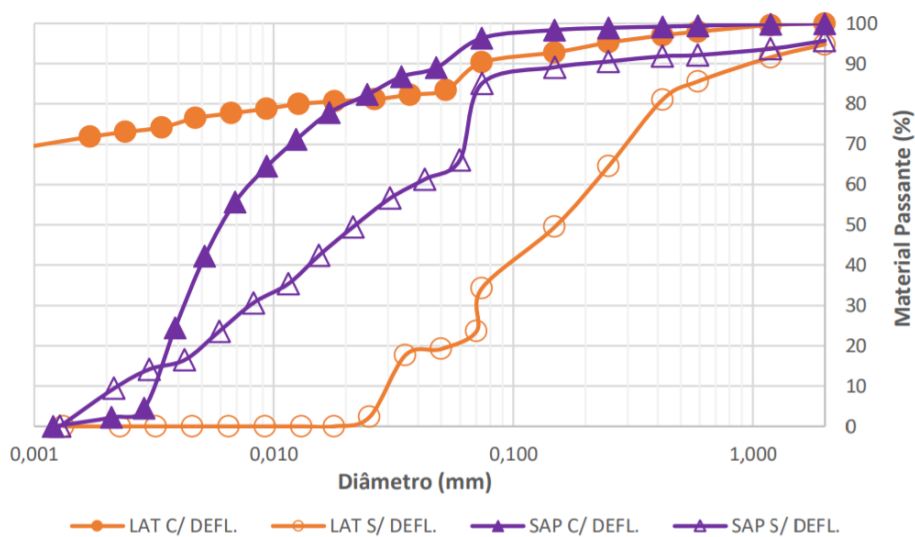


Figura 2.10 – Curva granulométrica de solo laterítico e saprolítico (Wanderley Neto, 2020).

2.3 SOLOS TROPICAIS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE COM CAL

2.3.1 Efeito da alteração do pH nos solos tropicais

De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (2015), os solos brasileiros são ligeiramente ácidos, estando o pH entre 3,5 e 5,5 e constitui-se um parâmetro de fácil obtenção de resultados para caracterização do solo.

A EMBRAPA (1997, atualizado em 2017) desenvolveu metodologia para leitura do pH em suspensão em meio aquoso, respeitando a proporção solo líquido em 1:2,5. Em 2017, esta empresa apresentou nova metodologia para substituição do H₂O por KCl 1 mol·L⁻¹, mantendo a proporção descrita anteriormente.

Além do pH, é importante ater-se ao valor do ponto de carga zero – PCZ, caracterizado pelo resultado onde os íons determinantes de potencial (H⁺ e OH⁻) são iguais. Solos com pH em água menor que o PCZ são solos com capacidade de troca de ânions (CTA) e aqueles com pH em água maior que o PCZ apresentam capacidade de troca de cátions (CTC).

O PCZ pode ser determinado pela formulação proposta por Keng e Uehara (1974), conforme Equação 2.5.

$$PCZ = 2pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (2.5)$$

Caso o PCZ aponte valores positivos, indica que a amostra tem predominância de óxidos-hidróxidos de ferro e alumínio e, para valores negativos, a grande presença de argilas silicatas (Cardoso, 2002).

Quando o hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂ entra em contato com a argila (Castro, 1995), os íons Ca⁺² e OH⁻ são facilmente dissociados na presença de água. Volk e Jackson (1963, *apud* Castro, 1995) definiram em 5 faixas de pH as principais reações químicas.

- pH < 4,0: Neutralização de hidrogênio trocável, via troca catiônica;
- 4,0 < pH < 5,6: neutralização de H⁺ e Al⁺³ pH-dependentes e hidrólise dos íons Fe⁺² Fe⁺³ e Al⁺³, via troca catiônica;
- 5,6 < pH < 7,6: formação de hidroxí-polímeros de alumina e neutralização de grupamentos terminais aluminol, Al(OH)_n;
- 7,6 < pH < 11 : neutralização de grupos fracos - Al(OH) e reação com grupamentos silanol, SiOH,

- pH > 11: início das reações pozolânicas, liberação de sílica e alumina com formação de compostos cimentantes.

Prado (2016, atualizado em 2022) informa que o cálcio e o alumínio são cátions floculantes (aglutinadores) e que o sódio é um cátion dispersante.

2.3.2 Teor mínimo de cal em estabilizações químicas de solos em pavimentos

A Norma DNIT 419 (2019b) especifica o método de ensaio para determinar o teor mínimo de cal para estabilização química do solo, por meio da elaboração da curva do potencial hidrogeniônico x teor de cal em porcentagem (Figura 2.11), identificando o teor mínimo de cal quando se atinge o pH igual a 12,4, ponto em que ocorre a saturação do Ca(OH)_2 .

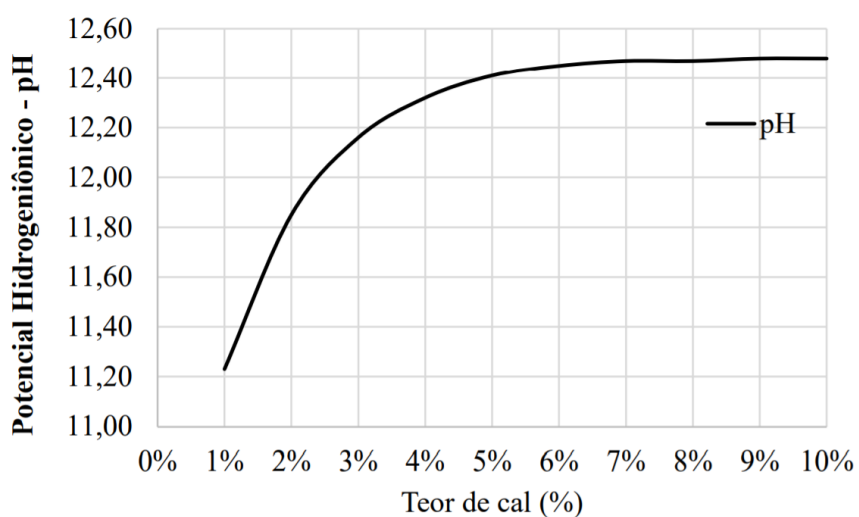
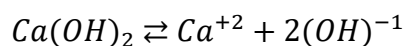


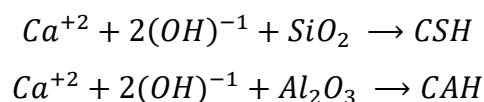
Figura 2.11 – Exemplo da curva do teor de cal (DNIT, 2019).

Esta norma também apresenta as equações da reação da cal com os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio presentes no solo, conforme sequência abaixo.

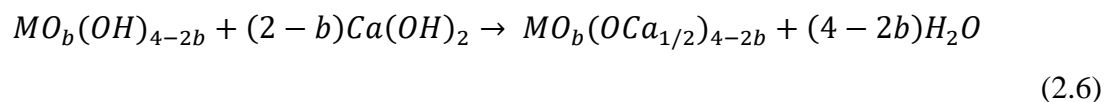
Em $\text{pH} \geq 12,4$ – Solubilização do hidróxido de cálcio (DNIT, 2019):



Os íons de cálcio e de hidróxido passam a reagir com os óxidos de silício e alumínio gerando silicatos de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH).

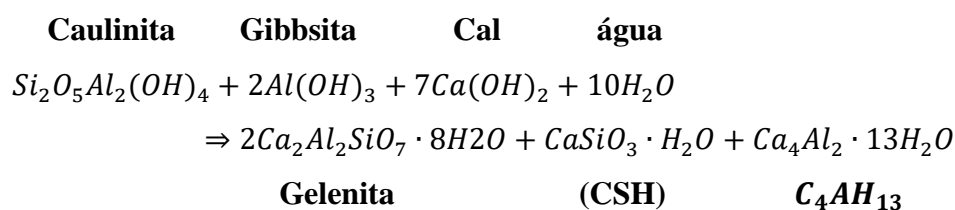
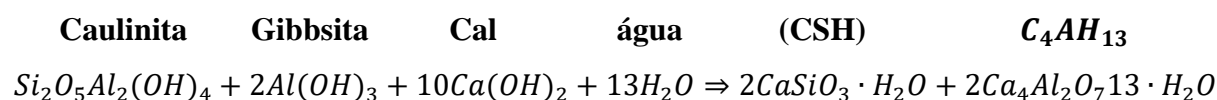


Para os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, a equação pode ser escrita de maneira geral, conforme Equação 2.6 (DNIT, 2019).



Onde: $M = Al^{3+}, Fe^{3+}, Ti^{3+}, etc$, e $b = 0, 1, 1/2, 3/2$

Alguns exemplos das reações químicas são elucidados abaixo (DNIT, 2019):



2.3.3 Lixiviação, migração química e condutividade hidráulica

Lima (2003) identificou em voçorocas o processo de carreamento e acumulação de finos causadas por lixiviação. A lixiviação de elementos químicos também é estudada na agronomia, pois há preocupação com os agentes químicos utilizados para a melhoria das propriedades do solo. Scorza Júnior e Rigitano (2012) verificaram que a lixiviação do tiametoxam em latossolo vermelho, na região do Mato Grosso, foi inferior a 50 cm de profundidade após 156 dias.

Castro (2015), analisou a migração do fósforo em solos tratados com fertilizantes granulares, a partir de um solo laterítico do município de Rio Verde, Estado de Goiás. Foi observado em laboratório que, após cinco semanas da mistura, a propagação do fósforo foi em torno de 10mm. Cabe salientar que aditivos químicos como os fertilizantes minerais podem afetar a estabilidade textural e estrutural dos solos tropicais (Pérez 2018, 2022).

Amadi e Okeiyi (2017) misturaram em um solo laterítico de Minna, Nigéria, teores de cal virgem e hidratada, com porcentagens variando em 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%, e compararam

os seus resultados após 28 dias de cura. Foi verificado que a condutividade hidráulica aferida em laboratório é reduzida conforme aumenta os teores de cal empregados, conforme demonstrado na Figura 2.12.

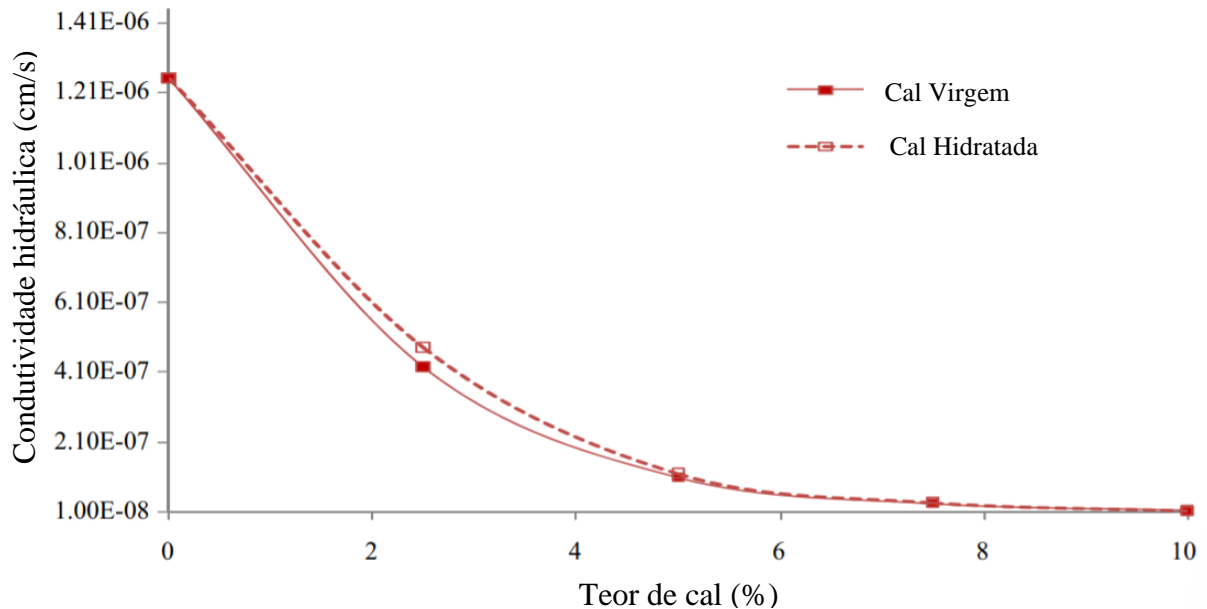


Figura 2.12 – Condutividade hidráulica com várias dosagens e tempo de cura de 28 dias (Modificado Amadi e Okeiyi, 2017).

2.3.4 Variação do pH com o tempo

Imbrosi *et al.* (2019) analisaram um solo laterítico do Distrito Federal estabilizado com 5% de cal tipo CH-III e verificaram em laboratório que o pH reduziu após 245 dias da mistura do solo com a cal, sendo reduzido o pH em H₂O em 0,21 e, em KCl, 0,19.

Verificaram também que solos estabilizados com cal tendem a precipitar mais rápidos que solos sem estabilização química, demonstrando o poder aglutinador da cal.

Collins *et al.* (1970) verificaram em um solo no sul de Michigan que há variação na leitura de pH em campo de acordo com a sazonalidade. Verificaram também que a umidade presente no solo interfere na leitura do pH, sendo identificado leituras crescentes de pH em solos secos em estufa, seco ao ar livre e solos com a umidade de campo, nesta ordem.

2.3.5 Capacidade de troca de cátions - CTC

Segundo Embrapa (2018), latossolos apresentam capacidade de troca de cátions menores que 17 cmolc kg⁻¹ de argila. Prado (2016, atualizado em 2022), ratifica tal informação

e conclui que quanto mais intemperizado o solo, menores são os valores de CTC.

Também segundo este autor a CTC dos latossolos, são dependentes de pH. A caulinita é responsável pelas cargas elétricas negativas, mas os óxidos de ferro (hematita, goethita, lepidocrocita) e alumínio (gibbsita) podem apresentar cargas elétricas líquidas positivas, negativas ou neutras, conforme o pH do meio.

3. MATERIAIS E METODOLOGIAS DE CAMPO E LABORATÓRIO

Este capítulo apresenta-se em dois subitens, materiais e métodos. Inicialmente, é realizada uma explanação das características dos materiais estudados e a metodologia adotada em campo, englobando a definição do local de estudo, os pontos de coleta, o planejamento de campo e a terminologia das amostras. Na segunda etapa, consta a metodologia adotada em laboratório: acomodação e preparo das amostras, obtenção dos teores de umidade, classificação MCT, curvas granulométricas por sedimentação, caracterização mineralógica, caracterização química, pH em H₂O e em KCl, curva do teor de cal e a variação do pH com o tempo.

O estudo focou em latossolos que constituem a estrutura do pavimento de uma ciclovia, localizada no Distrito Federal, e no seu subleito. Foram realizadas prospecções nos anos de 2020 e 2021 e em diversas profundidades, procurando identificar possíveis mudanças nas propriedades físico-químicas do solo. Após as coletas dos materiais, por meio de amostras deformadas, foram realizados ensaios geotécnicos, no laboratório do DER/DF, visando avaliar a ocorrência de migração química da cal utilizada na melhoria da camada de base do pavimento para subleito da ciclovia e suas consequências nas propriedades físico-químicas dos solos analisados.

3.1 MATERIAIS E METODOLOGIA DE CAMPO

3.1.1 Local do estudo

Conforme informando anteriormente, o material estudado integra a estrutura de uma ciclovia localizada na rodovia distrital DF-003 – Estrada Parque Indústria e Abastecimento (EPIA), entre o entroncamento com as BR-010/020/030/DF-001/DF-150 (Parque Rodoviário do DER/DF) e o entroncamento com a DF-007 (EPTT) – Estrada Parque Torto (Granja do Torto), possuindo 5,2 km de extensão e 3,0 m de largura. A Figura 3.1 localiza geograficamente esta ciclovia junto ao Sistema Rodoviário do Distrito Federal – SRDF.

A estrutura da ciclovia consiste em revestimento em Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ, com 3 cm de espessura, executado sobre base com 15 cm de espessura de solo melhorado com 3% de cal e apoiada em subleito compactado, conforme seção típica apresentada na Figura 3.2.

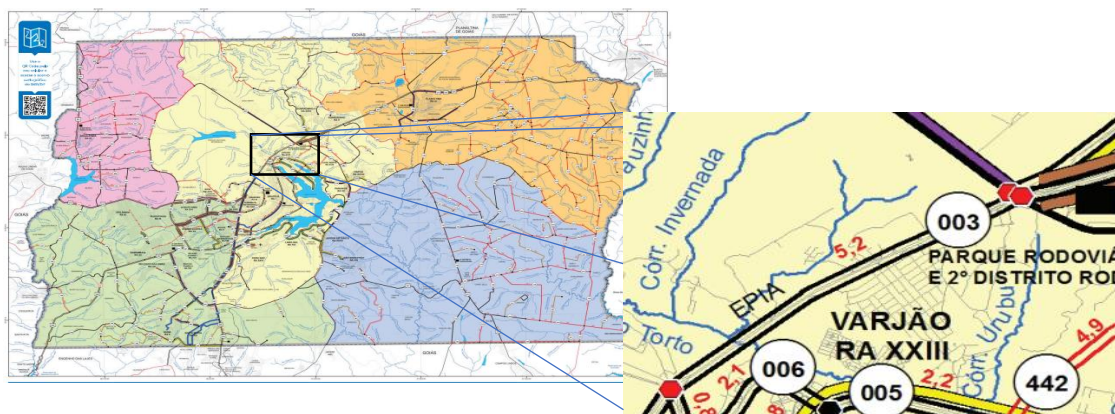


Figura 3.1 – Localização geográfica da ciclovia (DER/DF, 2020).

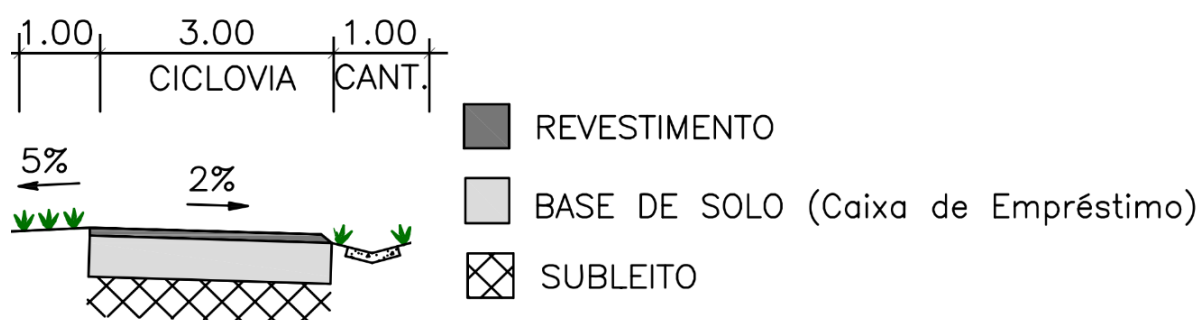


Figura 3.2 – Seção tipo da ciclovia (Modificado DER/DF, 2022).

Para realização dos estudos, escolheu-se um trecho da ciclovia que apresentasse as seguintes características:

- Subleito em latossolo – O subleito em latossolo tem como objetivo, caso ocorra a migração química de elementos da cal para o subleito, este possua características químicas e mineralógicas propícias para reagir quimicamente com os contaminantes.
- Ciclovia executada em trecho de aterro – A escolha do trecho em aterro evita o acúmulo de águas pluviais provenientes de chuva propiciando a sua infiltração de modo descendente favorecendo a migração química apenas por meio da ação da sucção.
- Material homogêneo – De forma a evitar grandes variabilidades nos resultados dos ensaios laboratoriais por causa da mudança significativa das propriedades físicas dos materiais, o trecho em estudo deve apresentar umidade ótima e massa específica aparente seca similares.

Após as premissas estabelecidas, foi identificado o trecho a ser pesquisado, conforme

explanado no tópico a seguir.

3.1.2 Pontos de coleta na ciclovia da DF-003

Foram escolhidos três pontos de prospecção para a realização das coletas de material. Para melhor localização geográfica das demarcações destes locais, as coordenadas encontram-se no sistema Universal Transversa de Mercator – UTM, SIRGAS 2000, meridiano central – 45, Fuso UTM 23. Os pontos de coletas apresentam as seguintes coordenadas:

- Ponto 1 – 190580,937 E; 8261880,040 N;
- Ponto 2 – 190483,451 E; 8261817,180 N;
- Ponto 3 – 190404,010 E; 8261742,260 N.

O espaçamento do Ponto 01 para o Ponto 02 é de 134 m e do Ponto 02 para o Ponto 03 é de 109 m, conforme a Figura 3.3. Mais a diante, no tópico 3.1.4 será apresentada à disposição dos furos ao longo dos pontos.



Figura 3.3 – Disposição dos pontos de coleta (Google, 2021).

3.1.3 Caixa de empréstimo do subleito

Antes da execução da ciclovia, havia um desnível considerável entre o terreno natural e

a rodovia distrital existente (DF-003), sendo necessário, ao se executar a obra, a implantação de um aterro complementar. Para isso utilizou-se tanto no subleito, quanto na camada de base melhorada quimicamente da ciclovia uma caixa de empréstimo, localizada no Parque Rodoviário do DER/DF, com coordenada central E: 194889,298, N: 8263776,835 (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Caixa de empréstimo no Parque Rodoviário do DER/DF, em 2014 (Geoportal, 2020).

3.1.4 Planejamento de campo

Durante a execução da ciclovia ao longo dos anos 2018 e 2019 e logo após a sua inauguração, em 2019, não foi executado nenhum processo de monitoramento da migração química da cal incorporada na camada de base. Foram realizados somente o controle tecnológico de campo e de laboratório em relação ao grau de compactação, Índice Suporte Califórnia (ISC), umidade ótima e caracterização do solo durante a realização da obra.

Portanto, visando a compreensão do comportamento dos materiais constituintes das camadas de base e subleito em contato com uma camada melhorada quimicamente, foram determinadas as seguintes coletas em campo:

- Coletas na lateral do pavimento – Esta coleta tem como objetivo verificar, com a ação direta da chuva, a variação das características químicas e granulométricas do latossolo em estudo. Foram realizadas coletas nos anos de 2020 e 2021. O espaçamento entre os furos foi de 1m para evitar influência entre furos.
- Coleta no centro do pavimento – Esta coleta objetivou analisar, sem a influência direta da chuva, as características do solo, mesmo ciente que existe uma pequena quantidade de água que infiltre no revestimento asfáltico (CAUQ). Esta coleta foi realizada no ano de 2021.
- Coleta mais afastada do pavimento – Por meio desta coleta, busca-se identificar as características do solo em estudo sem a contaminação química. As coletas foram realizadas em 2021.

Para melhor entendimento das premissas supracitadas, a Figura 3.5 mostra a localização destes furos de coleta em cada um dos 03 pontos estudados e a (c)

Figura 3.6 (a), (b) e (c) apresentam a vista frontal dos Pontos 01, 02 e 03, respectivamente além de demonstrar a posição das prospecções.



Figura 3.5 – Localização por ponto dos furos.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6 – Disposição dos furos: (a) Ponto 01; (b) Ponto 02; (c) Ponto 03

Em relação à profundidade, foram considerados os seguintes perfis geotécnicos:

- Revestimento em CAUQ – Camada de 3 cm de espessura implantada para proporcionar o conforto e a segurança dos usuários. Esta camada não foi estudada;
- Camada de base – Camada de 15 cm de espessura construída com o solo melhorado com 3% de cal CH-III.
- Camada de migração – Camada de 5cm de espessura, logo abaixo da camada de base, determinada para analisar os impactos do contato direto com o solo melhorado quimicamente de maneira mais proeminente. Espera-se a identificação de maiores migrações químicas.
- Subleito – O subleito foi considerado após a camada de migração, aprofundando no perfil por mais 20 cm. A expectativa nesta camada é identificar a ocorrência ou não de migração química oriunda da camada de base.
- Subleito Profundo – Após atravessar o subleito, a prospecção avançou, por mais 30 cm ou até que o material apresentasse clara mudança tátil visual. Esta camada é denominada subleito profundo. A análise desta camada objetiva-se averiguar se a migração química oriunda da camada de base atinge maiores profundidades ainda no solo na condição compactada mecanicamente.

A Figura 3.7 apresenta, em cada furo realizado, os perfis das camadas coletadas. Cabe

ressaltar que no furo afastado, por não apresentar a camada de solo melhorado quimicamente, somente foi analisado o subleito na maior profundidade possível. A prospecção central foi até a camada do subleito, devido a restrições do equipamento de coleta.

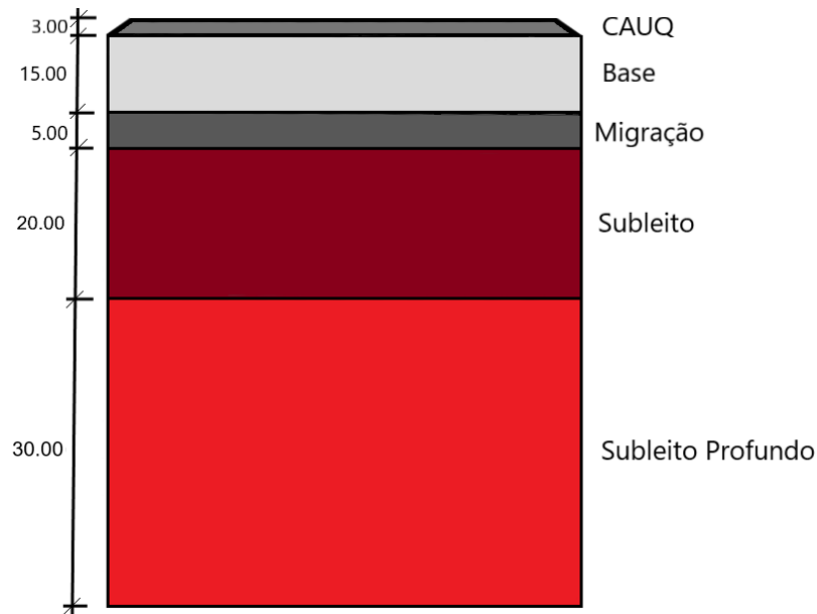


Figura 3.7 – Perfil das camadas coletadas.

3.1.5 Terminologia

Após a definição dos locais das coletas, do posicionamento dos furos a serem realizados em cada ponto e da separação dos materiais a serem ensaiados pelo critério de profundidade, fez-se necessária a adoção de uma terminologia de fácil entendimento, visando uma compreensão visual e lógica. A seguir, apresenta-se uma terminologia padrão e a explicação dos seus elementos, conforme apresentado

FN-P-C-AN

Onde:

F: Furo, letra fixa em todas as amostras;

N: Número do ponto a ser coletado (1, 2 ou 3);

P: Posição do furo, podendo ser lateral (L), central (C) ou afastado (A);

C: Camada do perfil geotécnico, sendo Base (Ba), Migração (Mi), Subleito (Sl) e Subleito Profundo (SP);

AN: Ano da coleta do material, (20 ou 21).

Exemplo: uma coleta no furo 02, na lateral do pavimento, na camada de base realizada no ano de 2021 a terminologia da amostra será F2-L-Ba-21. A escolha desta terminologia também objetivou facilitar pesquisas futuras na própria ciclovia, propiciando um histórico organizado das amostras. Assim, foram realizados, em cada um dos 03 pontos de estudo, 12 furos de coleta, totalizando 36 amostras nos perfis de solo estudados.

3.2 *METODOLOGIA DE LABORATÓRIO*

3.2.1 Acomodação e preparo das amostras

Após as coletas em campo, as amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos com resistência suficiente para não rasgarem ao serem manuseados e conservados.

Estas amostras tiveram as umidades de campo preservadas, sendo adotado dois sacos plásticos para cada amostra acondicionada e a armazenagem ocorrida em local sem a incidência de luz solar e com temperatura ambiente amena.

Nos casos em que foi necessária a redução da umidade do solo, este material foi desidratado à sombra e ao ar, pois, conforme explicado no tópico 2.4.5, os solos com distribuição de poros bimodais podem ter o seu comportamento alterado em baixos teores de umidade. A exceção deste preparo limitou-se à realização do peneiramento parcial do solo no ensaio de sedimentação e à execução da caracterização mineralógica por meio do ensaio de Difração de Raio-X – DRX em que os solos foram secos em estufa.

3.2.2 Determinação do teor de umidade das amostras

O primeiro parâmetro obtido de cada amostra foi o teor de umidade. Este parâmetro é fundamental para determinar o peso das amostras secas, sendo necessário para os ensaios realizados e que serão descritos nos tópicos seguintes. Os teores de umidade foram obtidos de acordo com a Norma DNER-ME 123 (1994c).

3.2.3 Classificação MCT

Realizou-se a classificação MCT do solo proveniente da caixa de empréstimo e os procedimentos para a realização serão descritos a seguir.

Inicialmente, passou-se o solo na peneira de abertura de malha de 2,00mm. Em seguida, fez-se a separação do material em porções de 500g com base no peso seco de material obtido pela determinação do teor de umidade de campo. Por meio do ensaio de compactação e ISC

realizados pelo DER/DF, obteve-se a umidade ótima do solo e foi calculada a quantidade de água necessária a ser adicionada ou retirada, de maneira a obter uma amostra na umidade ótima, duas amostras acima da umidade ótima e duas amostras abaixo desta umidade, variando em, aproximadamente, 2% o teor de umidade entre as amostras. Na Figura 3.8, é claramente identificado que à medida que se altera o teor de umidade do solo há a modificação em sua coloração.



Figura 3.8 – Amostras para o ensaio MCT com diferentes teores de umidade. Da esquerda para a direita: solo menos úmido para mais úmido.

Após homogeneização do solo, e sua manutenção em estado homogeneizado por pelo menos 12 horas, realizou-se a compactação do material, conforme preconiza a normativa DNER-ME 258 (1994e). Em seguida, determinou-se o peso e o volume de cada amostra.

Por fim, extraiu-se cerca de 1cm do material para fora do molde, fez-se a medição da altura deste material externo ao molde e ele foi colocado com o devido cuidado em recipiente com água, tentando-se evitar movimentos bruscos e ondulações no líquido para a realização do ensaio de perda de massa por imersão, conforme a norma DNER-ME 256 (1994d). Decorridos 20 horas de ensaio, retirou-se o material submerso que foi desprendido do molde, fez-se sua pesagem e determinou-se a perda de massa de solo por imersão em água.

3.2.4 Caracterização mineralógica

O material ensaiado foi analisado pela técnica de DRX com o objetivo de identificar os

minerais mais relevantes presentes nas amostras coletadas. A análise mineralógica foi realizada no Laboratório de Difractometria de Raio X, do Instituto de Geociências (IG), da Universidade de Brasília (UnB).

O equipamento utilizado é da marca RIGAKU e as amostras foram secas em estufa, passadas na peneira de abertura de 0,074mm e adotado para análise das amostras a dispersão do solo no pó finamente separado.

Não foi analisado o subleito profundo, somente as camadas de base, migração e subleito, devido à restrição da quantidade de amostras impostas pelo IG.

3.2.5 Correção da leitura do densímetro em função do líquido e da temperatura

No ensaio de sedimentação, é necessário corrigir a leitura do densímetro em função da temperatura e do líquido em que o densímetro se encontra. Conforme o fabricante, o hexametáfosfato de sódio possui densidade relativa teórica de $2,480\text{g/cm}^3$ 20°C , fazendo com que a solução de 125 ml de hexametáfosfato de sódio com 875ml de água destilada apresente uma densidade relativa teórica de $1,185\text{g/cm}^3$ 20°C , ou seja, maior que a densidade relativa teórica da água destilada, que é $1,000\text{g/cm}^3$ 4°C .

A redução da temperatura para cerca de 5°C ocorreu por meio da inserção de gelo. Como a cuba de imersão detém um sistema de controle de temperatura, a elevação da temperatura do líquido sucedeu-se de maneira controlada, sendo conferida por dois termômetros, um dentro da proveta e outro dentro da cuba de imersão. A Figura 3.9 ilustra o procedimento adotado na correção da leitura dos densímetros utilizados no ensaio (calibração).

As curvas de calibração foram obtidas em água destilada e na solução de 875ml de água destilada com 125ml de hexametáfosfato de sódio. Foram realizadas leituras dos densímetros variando-se a temperatura entre $8,5^\circ\text{C}$ a 35°C .

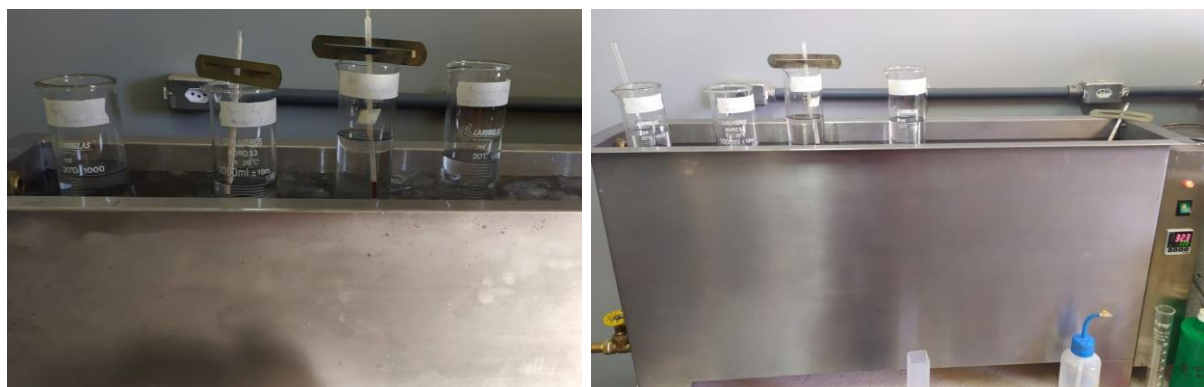


Figura 3.9 – Correção da leitura do densímetro em função do líquido e da temperatura.

3.2.6 Densidade real dos grãos

Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 093/94, no qual se utiliza picnômetros com capacidade de 50ml de volume, conforme preconizado na norma DNER-ME 041(1994a).

Com o volume conhecido do picnômetro e a variação do volume do líquido com a presença do solo, é possível determinar a massa específica dos grãos. Precauções devem ser tomadas, principalmente, com a saída de todos os gases do picnômetro e com as pesagens precisas nas etapas, evitando-se, assim, variabilidades significativas da massa específica dos grãos, visto que a norma DNER-ME 093 (1994f) considera o ensaio satisfatório quando pelo menos dois resultados não diferirem de 0,009 entre eles.

Conforme alertado no tópico 3.2.1, não foi realizada a secagem do material, sendo o mesmo levemente destorroado e passado na peneira com abertura de 2,00mm

Para compensar tal procedimento, em cada picnômetro foi depositado cerca de 13g de material, e não 10g como previsto em norma. Nos cálculos, levou-se em consideração o teor de umidade do solo, pois ele não foi seco em estufa.

3.2.7 Curva granulométrica por sedimentação

Por se tratar de latossolo argiloso, foram realizadas as curvas granulométricas por sedimentação e por peneiramento parcial, tendo como base a norma DNER-ME 051 (1994b) sendo que a classificação granulométrica seguiu a NBR 6502 (ABNT, 1995).

O material, em sua umidade de campo, foi levemente destorroado e passado na peneira com abertura de 2,00mm. Em seguida, foram pesadas porções com 70g de solo.

Para a verificação do potencial agregador do solo laterítico, foram preparadas porções de solo com o uso de defloculante e dispersor e sem o uso do defloculante e do dispersor

Antes do início do ensaio, as amostras ficaram submersas e inertes em 125ml de solução líquida por um período mínimo de 12h e, no máximo, de 18h. Nas amostras com defloculante, utilizou-se o hexametáfosfato de sódio tamponada com carbonato de sódio e nas amostras sem defloculante, água destilada. Nos solos com o uso de defloculante, o tempo de dispersão adotado foi de 10min, considerado suficiente para o ensaio.

Após o período de repouso, as porções foram transferidas separadamente para provetas e elevado o seu volume até 1000ml com água destilada. Em seguida, as misturas dentro de cada

provetas foram agitadas durante 1min e colocadas em recipiente tipo ‘banho maria’ (cuba de imersão), a fim de diminuir o efeito da variação da temperatura ambiente nas provetas durante os ensaios.

Foram realizadas as leituras da densidade do líquido nos tempos: 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h e 25h, anotando-se também a temperatura da suspensão armazenada em cada proveta. Transcorridas as 25h do ensaio, o material foi lavado na peneira de abertura de 0,075mm. Salienta-se que esta lavagem deve ser feita com cuidado para não desagregar o material pela energia da queda de água da torneira, bem como evitar a lavagem do material em excesso.

Por fim, o material foi seco em estufa por pelo menos 16h e realizado o peneiramento por meio das peneiras de 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,30mm, 0,15mm e 0,075mm, anotando-se o peso de cada material retido.

Para o peneiramento, foi utilizado o agitador de peneiras mecânico da marca W.S. Tyler, modelo RO-TAP RX-29, e o tempo de peneiramento foi fixado em 10min, considerado satisfatório para esta etapa.

3.2.8 Variação do pH em H₂O, em KCl com o tempo

Da mesma amostra de solo em que foi realizado o ensaio MCT, fez-se o estudo da variação do pH com o tempo. A amostra foi acondicionada, conforme o item 3.2.1, na umidade ótima para a compactação em campo e com 3% de cal tipo CH-III em massa. Foram realizadas leituras do pH em H₂O e em KCl nos seguintes intervalos de tempo de dias: 0 (1h após a mistura), 1, 3, 8, 14, 24, 56, 90, 123 e 200.

3.2.9 pH em H₂O, em KCl e curva do teor de cal

Para a obtenção do pH do solo e das misturas melhoradas com cal, utilizou-se como referência a norma DNIT 419 (DNIT, 2019b).

A referida norma preconiza que o solo previamente seco ao ar passe pela peneira de abertura de 0,42mm. Devido ao material do estudo estar com a umidade de campo, ele foi preparado na peneira de abertura de 2,00mm, sem prejuízo aos resultados, conforme os resultados a serem apresentados no tópico 4.10.

Em cada ensaio para obter o pH, utilizou-se três amostras com o intuito de verificar a variabilidade das leituras em cada amostra. Pesou-se em estado úmido o equivalente à 25g de

solo seco para cada amostra. Após o acondicionamento em recipientes de vidro com tampa, foram adicionados 100ml de água destilada ou KCl.

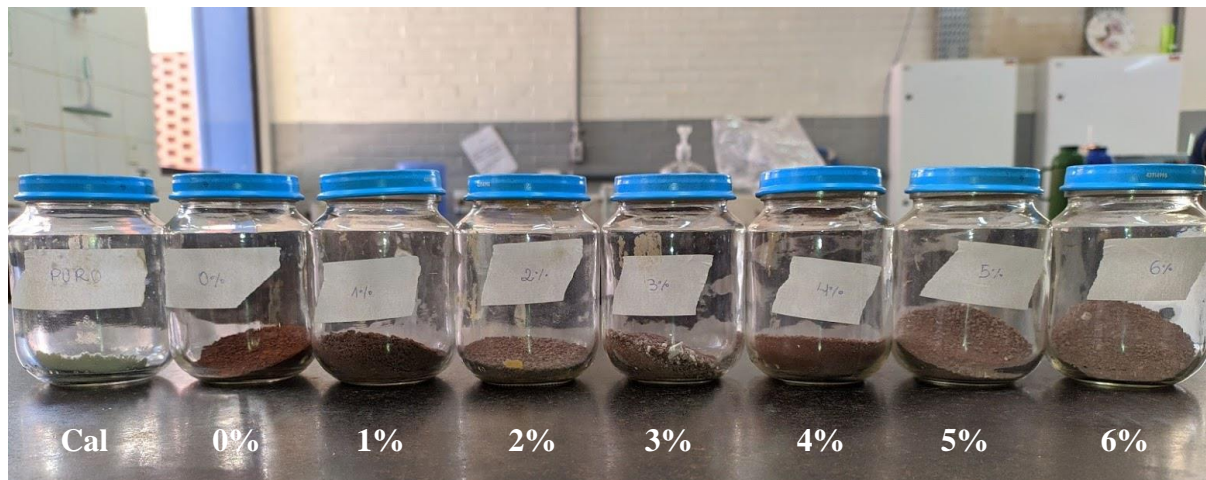


Figura 3.10 – Amostras para obtenção da curva teor de cal x pH.

Para a obtenção da curva Teor de cal x Potencial Hidrogeniônico – pH, a norma DNIT 419 (2019b) indica que se varie a porcentagem de cal a cada 2%, começando com o solo *in natura* (0% de cal) até 10% de cal adicionada. Como era conhecido o teor de cal adotado em pista (3%), variou-se a porcentagem de cal de 1% em 1% até se obter uma curva com 6% de cal. A Figura 3.10 apresenta a disposição das amostras em recipientes com as variações de adição de cal realizadas. Também foi obtido o pH em KCl.

Na realização das leituras do pH das amostras, agita-se o recipiente com a mão e em movimentos circulares por 30s, em intervalos de tempo de 10min, durante 1h. Ao término do tempo, inicia-se o processo de leitura.

Foram realizadas 4 leituras em cada amostra, agitando a mesma por 10s entre cada leitura, desprezando-se a leitura inicial e realizando a média das 3 leituras remanescentes.

O equipamento utilizado para os ensaios de pH em H₂O, em KCl (cloreto de potássio) e curva do teor de cal foi o medidor de pH Lucadema 210-P.

3.2.10 Caracterização química em laboratório

Foi realizada a caracterização química de todas as amostras contidas no ponto 01, no laboratório particular da Soloquímica, localizado na Asa Sul, Brasília/DF. As amostras foram secas em estufa de circulação de ar forçada, a temperatura de 40°C.

Nesta análise química, foram realizados os seguintes ensaios e de acordo com a seguinte metodologia apresentada pela empresa:

- Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), Sódio (Na) e Alumínio (Al) trocáveis ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) – São extraídos por meio de solução em KCl 1M, conjuntamente com a Espectrofotometria de Absorção Atômica – marca Biospectro, modelos SP-22 – usando óxido de lantânio – La_2O_3 .
- Capacidade de troca de cátions – CTC ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$), a pH 7 – Segundo Embrapa (2017) é a soma das bases trocáveis (Ca, Mg, K e Na) mais a acidez em potencial (H^+).
- Índice de Saturação por bases (%) – é a relação, em porcentagem, da soma das bases trocáveis e a CTC, conforme metodologia da Embrapa (2017).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. Este capítulo é dividido em 13 subitens.

Apresenta-se a classificação pedológica do solo, os parâmetros de campo e de laboratório obtido durante a execução do trecho pesquisado, além dos teores de umidade das amostras. Também é apresentada a Classificação MCT e MCT-M do material natural juntamente com a caracterização químico-mineralógica das amostras.

Para melhor interpretação dos dados de sedimentação foi realizada a correção da leitura do densímetro em função da temperatura e da densidade real dos grãos.

Com intuito de melhorar a compreensão das leituras de pH foi realizada a variação do pH com o tempo, bem como a elaboração das curvas do teor ótimo de cal, a identificação da variação da leitura do pH com a umidade do solo e os valores esperados de pH nas amostras.

Adentrando ao objetivo principal da pesquisa foi analisada a migração química, sob o ponto de vista temporal e espacial das diversas amostras, comparando esta variação com a alteração da sua composição granulométrica. Foi complementado este estudo com a caracterização química em laboratório.

Por fim, apresenta-se como sugestão a verificação do teor de estabilizante químico aplicado no solo, por meio da interpretação dos resultados obtidos na “*curva de teor ótimo de cal*”.

4.1 CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA DO TRECHO ESTUDADO

Unificando o mapa pedológico com o mapa rodoviário e destacando o local estudado é esperado, no local em que foi executada a ciclovía, a presença de Cambissolo Háplico e/ou latossolo vermelho-amarelo. Já para a caixa de empréstimo espera-se a presença de latossolo vermelho argiloso, conforme detalhado na Figura 4.1.

Ao realizar as prospecções no solo local as previsões do mapa pedológico se concretizaram. Foi identificada a presença de um solo de característica silto-arenosa com fragmentos de rochas e sem coesão, conforme Figura 4.2. Este material, destaca-se por uma baixa permeabilidade e alta expansão.

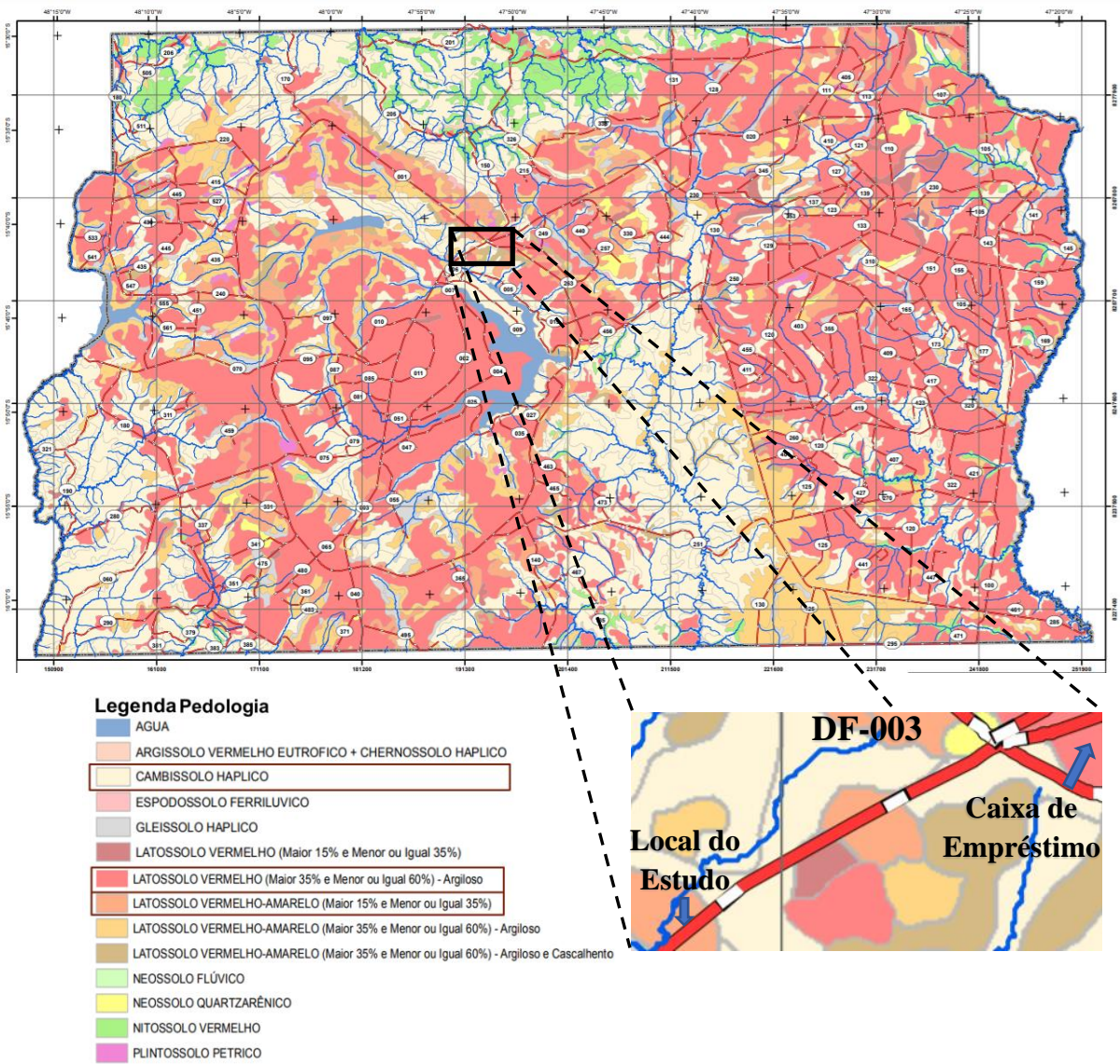


Figura 4.1 – Pedologia do solo esperado na área de estudo (Modificado DER/DF, 2020)



Figura 4.2 – Prospecção do solo silto-argiloso do local de estudo

A presença de um material menos intemperizado justificou, durante a elaboração do projeto e implantação da obra, a necessidade de se executar o corpo de aterro com material que apresentasse uma qualidade superior, do ponto de vista rodoviário. Ao se realizar as prospecções no corpo de aterro o solo apresentou classificação tátil visual como latossolo argiloso com coloração vermelha, conforme pode ser observado na Figura 4.3.

Em campo não foi observado um avanço significativo da camada de base na lateral do pavimento, ou seja, a camada de base praticamente finaliza no limite do revestimento asfáltico.



Figura 4.3 – Prospecção na lateral da ciclovia – corpo de aterro

4.2 PARÂMETROS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

No período que foi executada a obra o DNIT ainda não tinha normatizado critérios para estabelecer teores mínimos de cal em solos estabilizados quimicamente nem dos parâmetros de qualidade cal, pois o trecho foi executado em 2018 e as normativas foram elaboradas em 2019. Logo, o critério de aprovação em campo era atender o ISC mínimo, umidade ótima e grau de compactação. O trecho estudado é representado por um único parâmetro de campo para os três pontos de coleta. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros do solo obtidos em ensaios laboratoriais fornecidos pelo DER/DF.

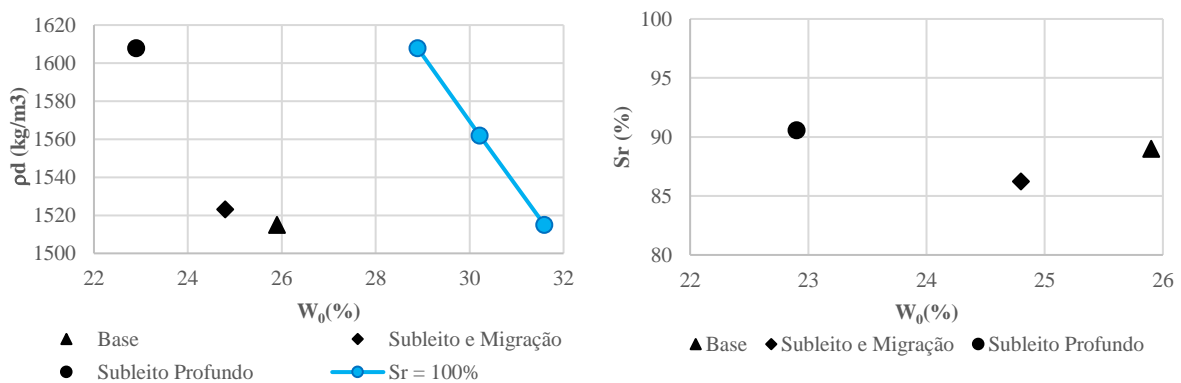
Como observado na Tabela 4.1 as camadas foram compactadas com teores de umidade variando entre 25,9% e 22,9%.

Analisando-se graficamente os resultados apresentados na Tabela 4.1, observa-se na Figura 4.4a que a umidade em campo está aumentando na medida que se aprofunda na estrutura de pavimento com o menor valor sendo obtido para a base e o maior para o subleito profundo.

No entanto, verifica-se na Figura 4.4b que o grau de saturação variou pouco com a umidade de campo.

Tabela 4.1 – Parâmetros do solo obtidos em campo e em laboratório (DER/DF, 2018)

| | Dados obtidos em Laboratório | Dados obtidos em Campo |
|---|------------------------------|------------------------|
| Base – (melhorada com 3% de cal) | | |
| Data de Execução | 16/07/2018 | 16/07/2018 |
| ISC (%) | 22,0 | N/A |
| w_{ot} (%) | 27,3 | |
| w_0 (%) | | 25,9 |
| ρ_d (kg/m ³) | 1481 | 1515 |
| Grau de compactação (%) | N/A | 102,3 |
| Subleito e Migração | | |
| Data de Execução | 19/06/2018 | 20/06/2018 |
| ISC (%) | 11,9 | N/A |
| w_{ot} (%) | 25,1 | |
| w_0 (%) | | 24,8 |
| ρ_d (kg/m ³) | 1474 | 1523 |
| Grau de compactação (%) | N/A | 103,3 |
| Subleito Profundo | | |
| Data de Execução | 15/06/2018 | 16/06/2018 |
| ISC (%) | 22,0 | N/A |
| w_{ot} (%) | 23,7 | |
| w_0 (%) | | 22,9 |
| ρ_d (kg/m ³) | 1591 | 1608 |
| Grau de compactação (%) | N/A | 101,1 |



(a)

(b)

Figura 4.4 – (a) Massa específica aparente seca (ρ_d) de campo em função do teor de umidade (w_0); (b) grau de saturação (S_r) em função do teor de umidade (w_0).

Destaca-se que a linha apresentada para a saturação completa ($S_r=100\%$) e os graus de saturação para as diferentes camadas foram calculados considerando-se a densidade relativa dos grãos média igual a 2,715, conforme dados da Tabela 4.5 (contida no tópico 4.7).

Os resultados apresentados por Guimarães *et al.* 1997 e inseridos nas discussões apresentadas por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021), apontam para o fato de que a menor massa específica aparente seca e a maior umidade registrada para a base está atrelada a maior estabilidade e/ou mesmo maior geração de agregados com a incorporação da cal, lembrando que tal comportamento não necessariamente se repetirá para outros perfis de intemperismo tropical, podendo inclusive ser obtido o oposto do aqui verificado quando da adição de insumos químicos, a depender inclusive, das propriedades do próprio insumo.

4.3 TEORES DE UMIDADE DAS AMOSTRAS

A primeira propriedade obtida dos materiais foi a determinação do teor de umidade do solo, no momento da coleta, pois este dado foi utilizado em diversos ensaios, principalmente para determinar a massa de solo seco. A Tabela 4.2 apresenta os teores de umidade do solo em suas respectivas camadas.

Tabela 4.2 – Teor de umidade das amostras

| Camada | Ponto 01 | Ponto 02 | Ponto 03 |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2020 – Lateral | | | |
| Base | 28,60 (*) | 30,26 | 15,36 |
| Migração | 26,93 (*) | 25,01 | 18,60 |
| Subleito | 28,64 (*) | 24,96 | 22,66 |
| Subleito Profundo | 20,80(*) | 21,22 | 22,46 |
| 2021 – Lateral | | | |
| Base | 23,46 | 22,48 | 21,94 |
| Migração | 20,94 | 22,58 | 21,29 |
| Subleito | 21,75 | 21,56 | 21,78 |
| Subleito Profundo | 22,50 | 20,89 | 14,00 |
| 2021 – Central | | | |
| Base | 26,41 | 23,09 | 25,30 |
| Migração | 25,16 | 22,40 | 21,32 |
| Subleito | 25,70 | 22,57 | 24,69 |
| 2021 – Afastado | | | |
| Subleito Profundo | 22,81 | 11,87 | 12,78 |

(*) Amostras coletadas no período chuvoso

As amostras foram coletadas em 2020 e 2021 no período seco, com exceção das amostras destacadas, para as quais a coleta ocorreu no final do período chuvoso colocando em evidência a susceptibilidade da umidade do solo às condições climáticas.

4.4 CLASSIFICAÇÃO MCT E MCT-M

Com o objetivo de entender o comportamento do solo foi realizada a classificação MCT e depois comparada com a classificação MCT-M. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros obtidos para a classificação MCT e, na Figura 4.5, a classificação junto ao ábaco MCT.

Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos ensaio MCT.

| Parâmetros | Resultados obtidos |
|-------------------|--------------------|
| Pi (MCV 10) | 97,2% |
| d' | 96 |
| c' | 2,30 |
| e' | 1,06 |
| Classificação MCT | LG' |

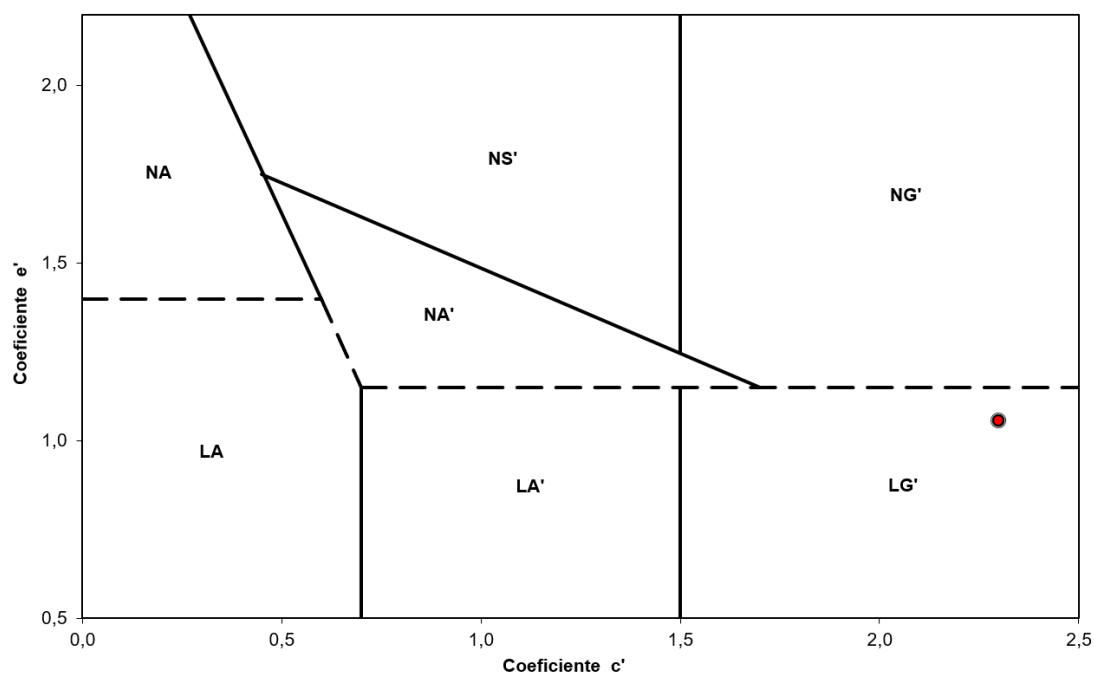


Figura 4.5 – Classificação MCT do solo natural.

Ao se realizar a classificação MCT-M, proposta por Vertamatti (1988), os coeficientes c' e o índice e' são recalculados. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.6.

Portanto, a classificação MCT-M aponta como um o solo transicional argiloso laterítico. Esta classificação indica que o material apresenta comportamento laterítico, contudo, alguns parâmetros podem ser de comportamento não laterítico.

Tabela 4.4 – Classificação MCT-M.

| Parâmetros | Resultados obtidos |
|---------------------|--------------------|
| Pi (MCV 10) | 97,2% |
| d' | 96 |
| c' | 2,1 |
| e' | 1,97 |
| Classificação MCT-M | TG' |

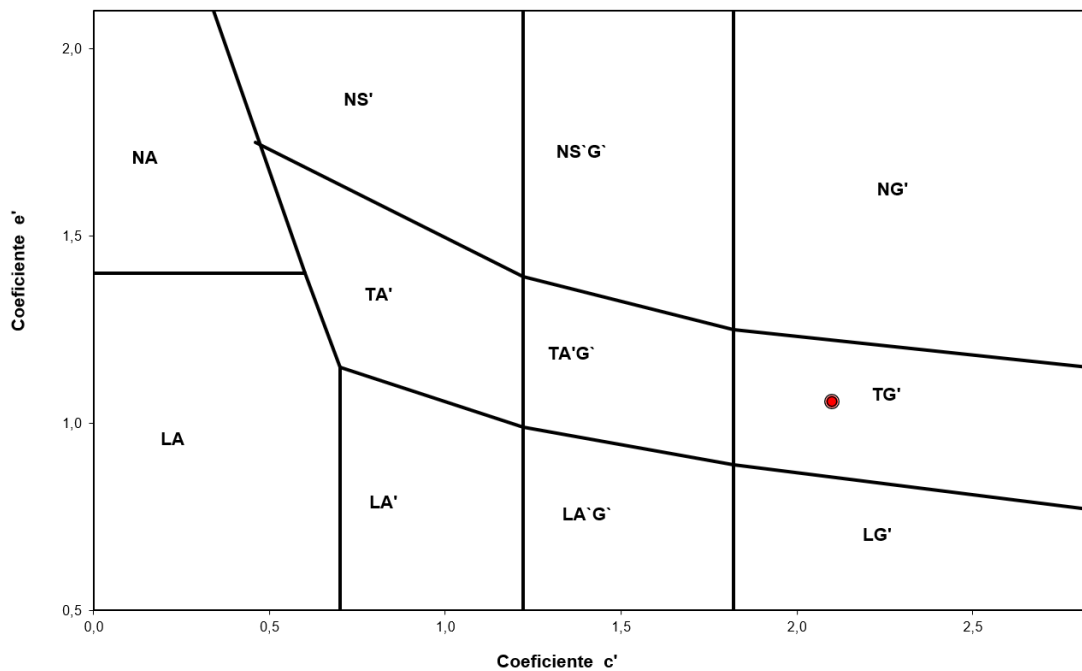


Figura 4.6 – Classificação MCT-M do solo natural.

4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-MINERALÓGICA

Foi realizada a classificação mineralógica dos solos laterais extraídos em 2020 e das três camadas menos profundas. Portanto, foram analisadas as seguintes amostras de solo dos pontos 01, 02 e 03 nas camadas de base, migração e subleito.

O DRX elaborado pelo Laboratório de Difractometria do IG-UnB apresentou a qualificação mineralógica dos 8 minerais mais quantiosos em cada amostra de solo. As imagens do DRX serão apresentadas no Apêndice A.

Pelos resultados obtidos, verifica-se que não houve grande variabilidade nos principais minerais encontrados. Os seguintes minerais foram identificados com maior relevância:

- Caulinita
- Hematita
- Calcita (*)
- Gibbsita
- Anatase
- Quartzo
- Rutilo

(*) A calcita somente foi identificada na camada de base revelando-se compatível com aditivação química usada.

A presença de calcita (Carbonato de cálcio) na camada de base era esperada, considerando que é um dos minerais constituintes do calcário e uma das matérias primas constituintes no processo de fabricação da cal. Conforme o exemplo apresentado no tópico 2.3.2 a Caulinita e a Gibbsita são minerais propícios para reagirem com a calcita gerando, assim, reações cimentantes.

Para um melhor entendimento da migração dos compostos químicos oriundo da cal, seria ideal realizar a quantificação dos minerais, que é realizada junto ao *software* do equipamento. Além disso, a elaboração da fluorescência de Raio-X ajudaria no melhor entendimento das reações químicas que ocorreram entre a cal e o solo, identificando os elementos químicos provenientes das reações químicas. Tais análises podem ser realizadas em uma etapa futura de aprofundamento desta pesquisa.

4.6 CORREÇÃO DA LEITURA DO DENSÍMETRO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A elaboração da correção da leitura do densímetro em função da temperatura e do líquido em que se encontram os sedimentos é de suma importância no ensaio de sedimentação e é adotada para compatibilizar as curvas granulométricas obtidas pelo método do peneiramento e pela leitura do densímetro nas provetas. No Apêndice B apresente as curvas e equações dos dois densímetros utilizados nos ensaios.

Ao analisar os comportamentos das curvas de correção podem ser destacados dois

aspectos. O primeiro é que, como esperado, a solução 125ml de hexametáfosfato de sódio com 875ml de água destilada apresenta densidade relativa superior à da água destilada, pois as leituras no densímetro sempre foram maiores.

Outro fato é que, para o ensaio de sedimentação, a formulação da equação da correção da temperatura em função da leitura do densímetro em uma polinomial de ordem 2 é plausível, pois apresenta um coeficiente de determinação bastante elevado.

Por fim, para evitar possíveis distorções nas curvas de sedimentação é recomendável verificar, periodicamente, as leituras do densímetro e, principalmente, quando houver mudança nos insumos que compõe a solução.

4.7 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

Após a realização do ensaio pelo método do picnômetro, são apresentados na Tabela 4.5 os resultados da densidade real dos grãos obtidas para cada amostra ensaiada. Foi incluído também os dados do solo oriundo da caixa de empréstimo com e sem cal denominados solos de referência.

| Tabela 4.5 – Densidade real dos grãos das amostras | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Solos de Referência | | | |
| Solo Natural | | 2,699 | |
| Solo com 3% de cal | | 2,748 | |
| Camada | Ponto 01 | Ponto 02 | Ponto 03 |
| 2020 – Lateral | | | |
| Base | 2,713 | 2,761 | 2,723 |
| Migração | 2,690 | 2,764 | 2,647 |
| Subleito | 2,706 | 2,693 | 2,661 |
| Subleito Profundo | 2,662 | 2,709 | 2,692 |
| 2021 – Lateral | | | |
| Base | 2,711 | 2,803 | 2,727 |
| Migração | 2,746 | 2,724 | 2,728 |
| Subleito | 2,670 | 2,726 | 2,691 |
| Subleito Profundo | 2,688 | 2,684 | 2,737 |
| 2021 – Central | | | |
| Base | 2,704 | 2,668 | 2,735 |
| Migração | 2,754 | 2,744 | 2,733 |
| Subleito | 2,694 | 2,749 | 2,703 |
| 2021 – Afastado | | | |
| Subleito Profundo | 2,694 | 2,760 | 2,734 |

Apesar da variabilidade dos resultados é possível constatar e associar nesta tabela o crescimento da densidade real com a presença da cal conforme apontado pelas amostras de referência.

Foi observado como menor valor de GS 2,661 e como maior valor 2,803 a sendo média igual a 2,715. Em tese, a variabilidade dos resultados aponta para diferenças existentes nas composições químico-mineralógicas das amostras analisadas, ressaltando-se que, conforme Camapum de Carvalho *et al.* (2015), a maior presença de hematita eleva a densidade real e maior presença de gibbsita a diminui.

Em pesquisa futura seria importante verificar o índice de vazios em campo em função da profundidade e do tempo, obtido indiretamente por massa específica aparente do solo empregando o método do frasco de areia, conjuntamente com a densidade real dos grãos.

4.8 VARIAÇÃO DO PH EM H₂O E EM KCL COM O TEMPO

Será apresentada na Figura 4.7 a variação do pH (em H₂O e em KCl) do solo laterítico utilizado nas camadas da estrutura de pavimento melhorado com 3% de cal ao longo de 200 dias de estudo após mistura na umidade ótima. Também foi inserido no gráfico a variação do ponto de carga zero, conforme formulação proposta por Keng e Uehara (1974).

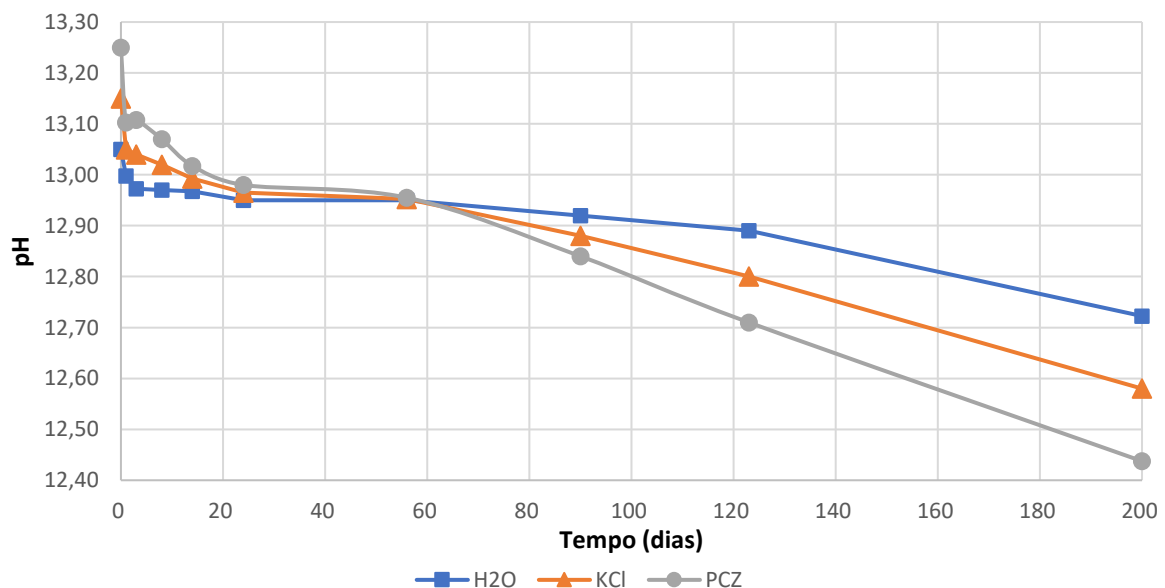


Figura 4.7 – Variação do pH com o tempo.

Antes de adentrar nas discussões cabe esclarecer que segundo Prado (2016, atualizado em 2022), a agregação torna-se máxima quando o pH coincide com o PCZ e passa a diminuir quando dele se afasta. Faz-se necessário, no entanto, contextualizar temporalmente as análises. Essa referência deve ser considerada em relação ao estado inicial do solo sendo que após as mudanças ocorridas na química do meio dará origem a novos valores de pH em água e KCl gerando novos PCZ.

Atingido o equilíbrio estas novas condições se constituirão em referência para comportamentos que poderão advir de outras intervenções químicas no meio. Cabe ainda destacar que, por se tratar de solo laterítico, contendo agregações o equilíbrio químico entre o meio e a globalidade das partículas integrando o solo levará certo tempo o que amplia a importância da presente análise da variação do pH da mistura solo - 3% de cal com o tempo.

Ao longo dos 200 dias de observação verificou-se uma redução nos valores de pH em água e KCl e do PCZ calculado sendo essa redução de maior amplitude nos três primeiros dias para o pH em água e nos primeiros 14 dias para o pH em KCl e para o PCZ. Decorridos esses períodos iniciais as variações se tornam pequenas até os 60 dias quando o pH em água e KCl e, por consequência, o PCZ se tornam iguais. A partir dos 60 dias o pH em KCl se torna superior ao pH em água tornando o PCZ inferior a ambos, sendo importante observar que as variações passam então a serem mais acentuadas nos três parâmetros

Com o pH em água ultrapassando o pH em KCl o solo, que tinha uma capacidade de troca aniônica, passou a ter o comportamento catiônico. A mudança do solo de CTA para CTC indica que a reação do hidróxido de cálcio (íons OH^-) com o solo está gerando silicato ou aluminato de cálcio hidratado, e conseqüentemente, reduzindo o pH ao longo do tempo.

As variações ao longo do tempo com redução nos valores de pH apontam para a penetração de parte da química da cal nos agregados sendo provavelmente favorecida essa penetração após os 60 dias. Essa observação é importante, pois esses elementos e/ou compostos químicos provenientes da cal ao adentrarem nos agregados poderão ampliar ou reduzir a estabilidade dos agregados a depender do solo, por exemplo, os resultados mostrados por Ayala (2020) e Wanderley Neto (2020) mostraram resultados para um solo laterítico cujas agregações perderam estabilidade com o tempo em função respectivamente da presença de cal e de cimento Portland.

Diante de tais ponderações faz-se necessário levar em consideração a redução dos valores de pH ao longo do tempo entre o término da execução do trecho no campo e as

prospecções. Como a última camada a ser executada é a base, a correção será baseada sua data de execução. A Tabela 4.6 apresenta os valores extrapolados a data da coleta.

Com o aprimoramento dos dados contidos na Figura 4.7 será possível estimar, em pesquisa futura, qual é o teor de cal em cada camada.

Analisando também os dados contidos no documento confeccionado por Imbrosi *et al.* (2019) é possível identificar que no seu experimento que a amostra sem o uso do ultrassom apresentou inicialmente capacidade de troca catiônica e depois mudou para um solo com capacidade de troca aniônica, conforme Figura 4.8. Também é possível observar que, ao se interpolar os resultados, as leituras se igualam no 60° e no 245° dia.

Tabela 4.6 – Extrapolação da variação do pH com o tempo

| Ponto | Data execução | Data coleta | Δ dias | Δ pH _{H2O} | Δ pH _{KCl} |
|-------------|---------------|-------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| 2020 | | | | | |
| 01 | 16/07/2018 | 10/03/2020 | 603 | 0,48 | 1,06 |
| 02 | 16/07/2018 | 19/08/2020 | 765 | 0,61 | 1,34 |
| 03 | 16/07/2018 | 20/08/2020 | 766 | 0,61 | 1,34 |
| 2021 | | | | | |
| 01 | 16/07/2018 | 20/07/2021 | 1100 | 0,88 | 1,93 |
| 02 | 16/07/2018 | 11/08/2021 | 1122 | 0,90 | 1,96 |
| 03 | 16/07/2018 | 17/08/2021 | 1128 | 0,90 | 1,97 |

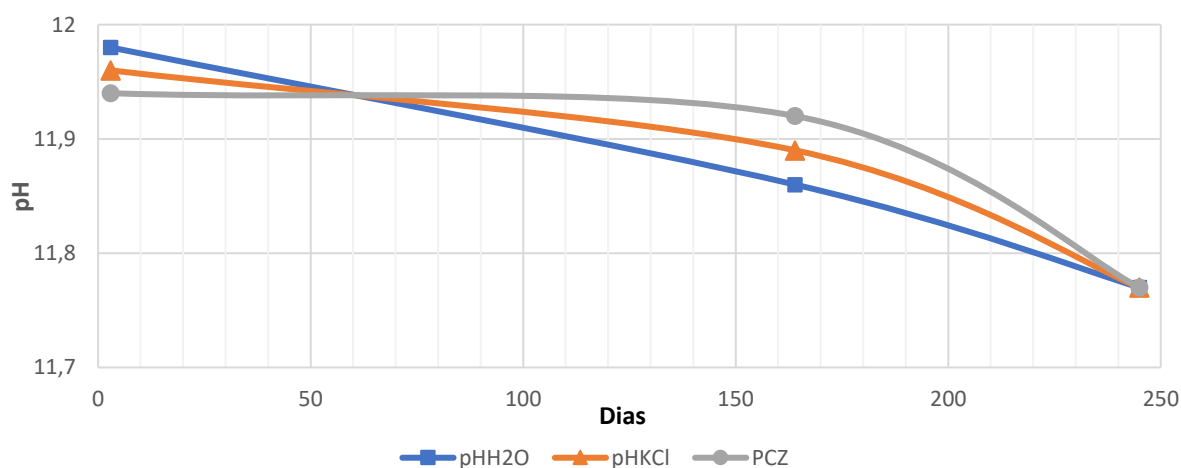


Figura 4.8 – Variação do pH com o tempo do experimento de Imbrosi *et al.* (2019).

4.9 CURVA DO TEOR DE ÓTIMO DE CAL

Foram elaboradas as curvas do teor ótimo de cal para o solo seco ao ar e após mistura

na umidade ótima, tanto em H₂O quanto em KCl 1M do solo constituinte da caixa de empréstimo. A elaboração das curvas com a umidade do solo seco ao ar e na umidade ótima (Figura 4.9) tem como objetivo verificar a influência da umidade inicial nos valores de pH obtidos. Essa importância está atrelada ao fato de que quando seco ao ar as agregações e microagregações, geralmente presentes nos solos lateríticos, encontram-se em estado não saturado e com sucção matricial atuante elevada propiciando a penetração imediata do fluido água-cal do meio no estado em que se encontra no interior das agregações.

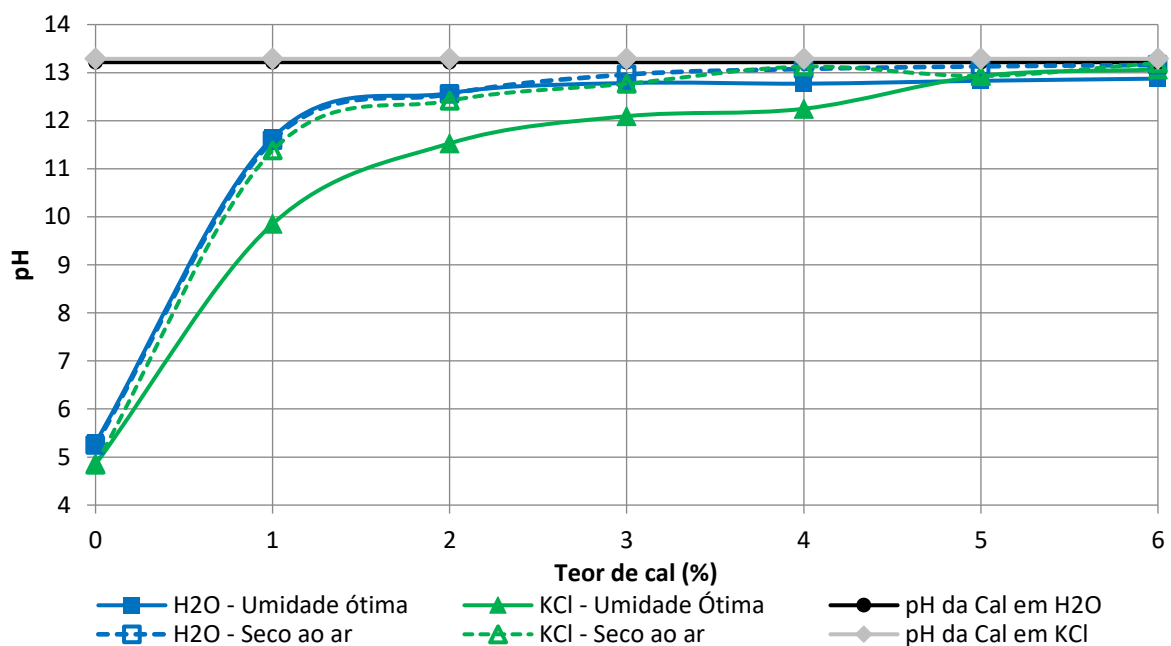


Figura 4.9 – Curvas do teor de cal.

Quando o solo se encontra na umidade ótima, em especial tendo em vista que o solo não passou por processo de pré-secagem antes da compactação, estas agregações se encontram comumente em estado saturado e com sucção matricial atuante apenas em suas superfícies e com sucção osmótica em seus interiores distintas daquelas atuantes no meio. Com isso, no solo na umidade ótima o fluido do meio se processará com o tempo tendendo a reduzir o pH até que o equilíbrio seja atingido.

Os valores de pH obtidos da cal em H₂O (13,22) e em KCl (13,29) ficaram bem próximos, indicando proximidade da saturação dos íons H⁺ no meio aquoso.

Foi observado também que as curvas de pH em H₂O do material seco ao ar e do material na umidade ótima apesar de ficarem próximas, apontam para menores valores no caso do solo

na umidade ótima.

Destaca-se, no entanto, que a proximidade dos valores de pH do solo seco ao ar com o do solo na umidade ótima pode propiciar correlações aceitáveis de leitura de pH realizado em campo com leituras de pH realizadas em laboratório, sendo possível verificar, com base na curva pH x teor de cal obtida em laboratório a porcentagem de cal presente em campo, sendo essa discussão mais bem detalhada no tópico 4.13.

A alteração da curva do pH em KCl indica que o teor de umidade pode influenciar nas leituras obtidas no pHmetro. Para teores de cal elevados (superiores a 5%) o pH em KCl e em H₂O convergem aos mesmos valores apontando um estado limite e saturação do material com o aditivo químico.

A adoção de 3% de cal para melhorar o solo foi, em princípio correta, pois em 2018, ano em que o trecho estudado foi executado, não era normatizada a adoção de teores mínimos de cal pelo critério de pH, mas como pode ser observado na Figura 4.9 os valores extraídos ficaram acima de 12,40, sendo obtido no material seco ao ar o pH de 12,96 e no material na umidade ótima de 12,78.

4.10 VARIAÇÃO DO PH COM A UMIDADE DO SOLO

Após a verificação da possível alteração das leituras de pH em função da umidade foi reproduzido o experimento elaborado por Collins *et al.* (1970), no qual foram feitas leituras dos valores de pH do solo natural em 3 situações distintas: Solo seco em estufa, solo seco ao ar e solo na umidade ótima, todos passando na peneira de abertura de 0,42mm. Também foi acrescentada neste estudo amostra de solo na umidade ótima passando na peneira com abertura de 2,00 mm para verificar se eventuais presenças de materiais inertes (ex. fragmentos de quartzo) entre as malhas da peneira de 2,00mm e 0,42mm não interferem na leitura do pH. Os resultados estão expressos na Figura 4.10.

Entre os solos na umidade ótima e passando na peneira #10 (2mm) e na peneira #40 (0,42mm) conforme preconizado na norma DNIT 419-ME (2019b), a diferença é, no presente caso, pequena, apontando para a representatividade das determinações de pH em campo.

Apesar de pequena, verifica-se certa variação do pH para amostras na umidade ótima em relação à seca ao ar. Contudo, houve uma redução significativa do valor de pH do material seco em estufa indicando que pode haver uma variação nos resultados obtidos de acordo com o preparo da amostra. Logo, para maior efetividade do controle de pH *in situ* objetivando a

averguiação do teor de cal utilizado é recomendável que os resultados de laboratório sejam obtidos para o material em condições similares a de utilização em campo.

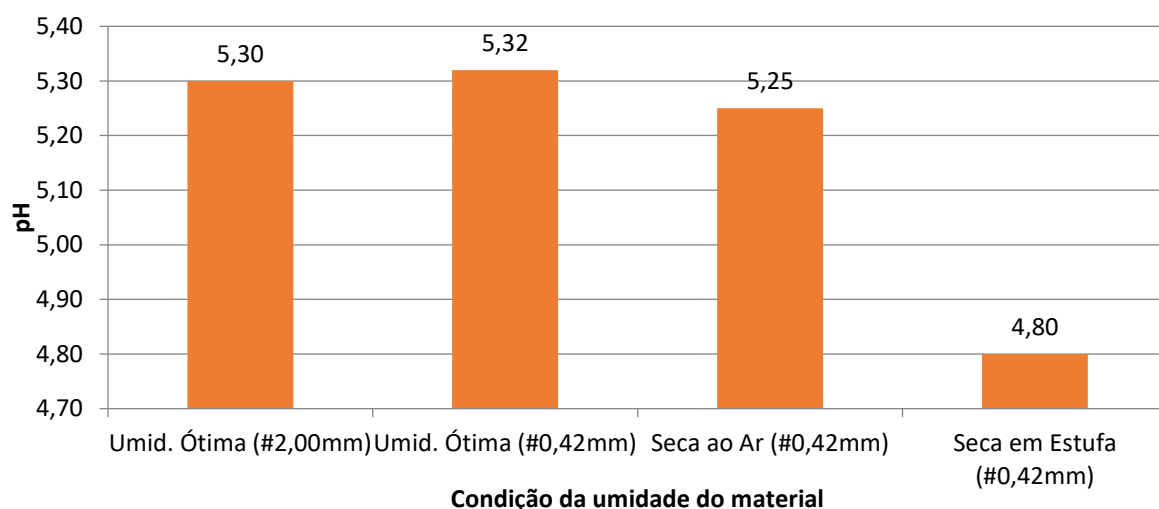


Figura 4.10 – variação das leituras de pH com a variação da umidade do solo.

Portanto, no presente estudo, a alteração da metodologia adotada em relação ao preconizado na norma DNIT 419-ME (2019b) não impactou significativamente na leitura dos resultados.

4.11 VALORES DE REFERÊNCIA PH E NA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foi realizada a classificação granulométrica por sedimentação com e sem o uso do defloculante do material proveniente da caixa de empréstimo. Para verificar se há mudança granulométrica significativa no perfil do solo realizou-se a coleta em duas camadas, uma entre 0,20m e 0,60m de profundidade e a outra entre 0,60m a 1,00m de profundidade.

Nestes dois perfis também foram realizadas as curvas granulométricas de sedimentação do solo natural adicionando 3% de cal, no qual esperou-se 24h para realizar o ensaio. A Figura 4.11 apresenta as oito curvas granulométricas.

Na transição entre as leituras realizadas pelo densímetro transformadas em diâmetro das partículas pela lei de Stokes e o diâmetro dos grãos obtidos pelo peneiramento parcial das amostras observa-se uma queda abrupta na curva granulométrica (próximo ao diâmetro de 0,074mm). Esta queda se dá pelo procedimento de lavagem do material em que a queda da água gera energia suficiente para realizar a quebra as partículas agregadas naturalmente.

Nas amostras sem o uso do defloculante esta queda é reduzida quando no material foi adicionada a cal reforçando o entendimento que, mesmo ocorrendo somente 24h após a homogeneização, ocorreram ações cimentantes benéficas ao solo.

A variação da profundidade do perfil geotécnico não influenciou no comportamento das curvas granulométricas, principalmente na fração de diâmetros menores que 0,074mm. Portanto, foi adotado como referência a média dos valores dos dois perfis geotécnicos.

Além de se considerar as curvas de distribuição obtidas analisou também o solo subdividido em faixas de acordo com os termos relativos a solos contida na NBR 6502 (1995), que classifica, partindo de um material mais granular para o material menos granular, os tipos de solo nas seguintes faixas granulométricas:

- Areia Grossa – AG: Grãos compreendidos entre 2,0 mm e 0,6 mm;
- Areia Média – AM: Grãos compreendidos entre 0,6 mm e 0,2 mm;
- Areia Fina – AF: Grãos compreendidos entre 0,2 mm e 0,06 mm;
- Silte – St: Grãos compreendidos entre 0,06 mm e 0,002 mm;
- Argila – Ar: Grãos menores que 0,002 mm.

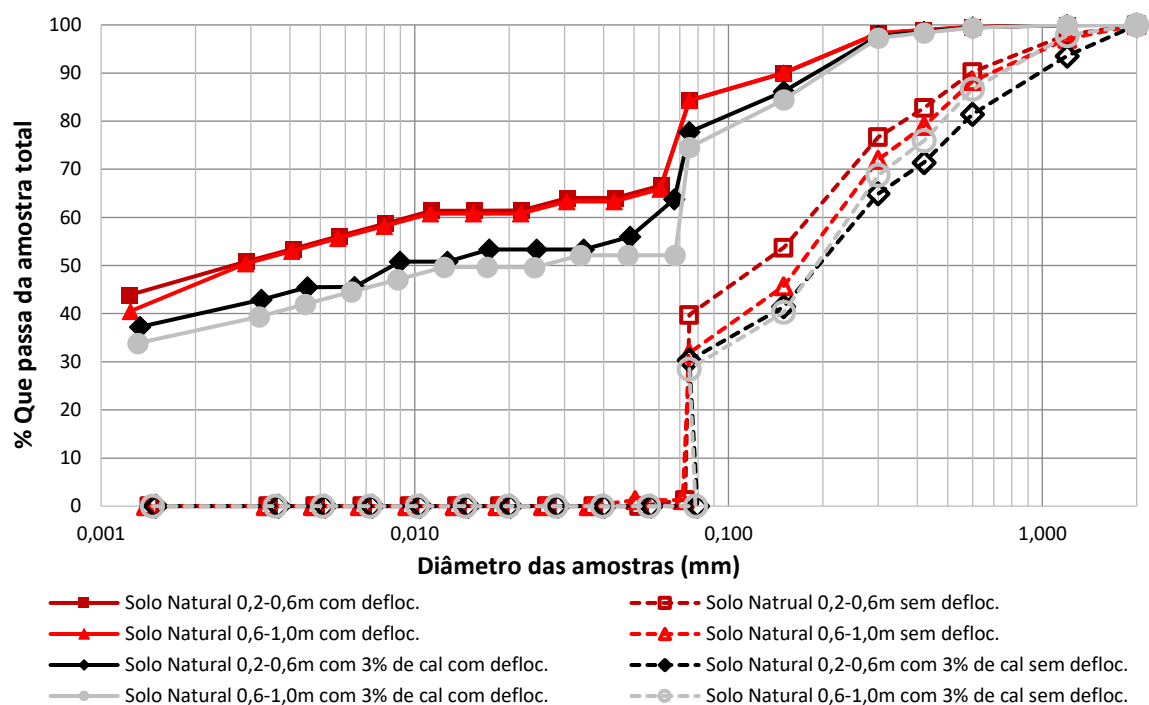


Figura 4.11 – Curvas granulométricas do solo natural e do solo melhorado quimicamente.

Na Tabela 4.7 consta os valores adotados como referência do solo natural e na Tabela

4.8 os valores do solo natural com 3% de cal.

Tabela 4.7 – Classificação granulométrica por sedimentação do solo natural com e sem o uso de defloculante

| Terminologia | Faixa granulométrica | Fração do material (%) | |
|--------------|----------------------|------------------------|------------|
| | | C/ Defloc. | S/ Defloc. |
| Areia Grossa | 0,6 mm a 2,0 mm | 0,41 | 10,71 |
| Areia Média | 0,2 mm a 0,6 mm | 6,82 | 31,35 |
| Areia Fina | 0,06 mm a 0,2 mm | 26,64 | 57,04 |
| Silte | 0,002 mm a 0,06 mm | 19,37 | 0,90 |
| Argila | Abaixo de 0,002 mm | 46,76 | - |
| - | Silte + Argila | 66,13 | 0,90 |

Na Tabela 4.7 pode ser observado que, ao usar o defloculante 66,13% do material é composto de silte ou argila, sendo 19,37% de silte e 46,76% de argila. Porém, ao realizar a sedimentação sem o uso do defloculante observa-se que a fração silte+argila praticamente desaparece, sendo observado 0,90% da fração silte.

Tabela 4.8 – Classificação granulométrica por sedimentação da base melhorada com 3% de cal com e sem defloculante

| Terminologia | Faixa granulométrica | Fração do material (%) | |
|--------------|----------------------|------------------------|------------|
| | | C/ Defloc. | S/ Defloc. |
| Areia Grossa | 0,6 mm a 2,0 mm | 0,56 | 15,94 |
| Areia Média | 0,2 mm a 0,6 mm | 10,06 | 34,53 |
| Areia Fina | 0,06 mm a 0,2 mm | 32,91 | 49,53 |
| Silte | 0,002 mm a 0,06 mm | 17,33 | - |
| Argila | Abaixo de 0,002 mm | 39,14 | - |
| - | Silte + Argila | 56,47 | - |

Ao se adicionar os 3% de cal foi observada no material com o uso do defloculante uma redução de 9,66% da fração silte+argila, caindo de 66,13% para 56,47%. Já no material sem o uso do defloculante a fração silte+argila desaparece realizando a comparação com o solo natural há um aumento de 5,23% da fração areia grossa e de 3,18% da fração areia média. Portanto, os resultados analisados demonstram, que para o solo estudado a cal propicia a agregação e/ou estabiliza as partículas 24h após a mistura.

Como a execução do trecho estudado ocorreu em 2018, antes da vigência da Norma DNIT 419-ME (2019b), não houve nenhum estudo em relação ao pH encontrado no ato da estabilização química do material.

No tópico 3.1.4 foi informado que o teor de cal adotado para melhorar o material constituinte da base foi de 3%. Com a curva de “*pH x teor de cal*” obtida na Figura 4.9 é possível extrair que o pH esperado na base seria em H₂O de 12,78. Analogamente o pH em KCl do solo natural é 4,85 e da base 12,09. Portanto, adotou-se estes dois valores como referência para os estudos que virão a seguir.

4.12 MIGRAÇÃO QUÍMICA

Este tópico será dividido em três subtópicos: Estudo temporal (2020 x 2021), Estudo transversal e caracterização química em laboratório. Em cada estudo será analisada a variação do pH conjuntamente com a variação da composição granulométrica do material.

4.12.1 Estudo temporal (2020 x 2021)

O estudo temporal se deu na lateral da ciclovia, por ser um trecho em que está mais propício as ações das chuvas e para se evitar danos na estrutura de pavimento. Para a análise do pH adotou-se como referência o pH da base em H₂O, 12,78, e em KCl, 12,09, ambos obtidos para a condição de umidade ótima do solo com incorporação de 3% de cal. Já para o solo natural, adotou-se o pH em H₂O, 5,30, e o pH em KCl, 4,85, conforme apresentado no tópico 4.11, correspondente ao solo sem incorporação de cal.

São apresentadas a seguir as análises realizadas quanto ao pH e à granulometria assim como um resumo dessa análise temporal.

a) pH

A Tabela 4.9 apresenta os pH de referência e os valores determinados em 2020 e 2021 e a diferença entre os valores de referência e os determinados ΔpH assim como entre os pH determinados em H₂O e em KCl, ΔpH . Também consta nesta Tabela o PCZ. As camadas foram abreviadas na sua nomenclatura. A camada de base foi denominada “Ba”, a de migração “Mi”, a de subleito “Sl” e a de Subleito Profundo para “SP”.

Todas as leituras em H₂O foram superiores ao PCZ indicando que o solo apresenta uma capacidade de troca catiônica em todas as camadas, o que corrobora para que o solo reaja quimicamente com os cátions de Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, K⁺, H⁺.

Tabela 4.9 – 2020x2021 – pH em H₂O, KCl e PCZ

| Ponto 01 | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|------|------------|-------------------------------|
| 2020 | | H₂O | | | KCl | | | PCZ | Δ pH₍₂₎₋₍₄₎ |
| Camada | pH Ref. (1) | pH₍₂₎ | Δ pH'₍₁₋₂₎ | pH Ref. (3) | pH₍₄₎ | Δ pH'₍₃₋₄₎ | | | |
| Ba | 12,78 | 8,69 | 4,09 | 12,09 | 8,44 | 3,65 | 8,19 | 0,25 | |
| Mi | 5,30 | 8,17 | -2,87 | 4,85 | 7,85 | -3,00 | 7,53 | 0,32 | |
| Sl | 5,30 | 7,32 | -2,02 | 4,85 | 6,65 | -1,80 | 5,98 | 0,67 | |
| SP | 5,30 | 7,05 | -1,75 | 4,85 | 6,49 | -1,64 | 5,92 | 0,57 | |
| 2021 | | H₂O | | | KCl | | | PCZ | Δ pH₍₂₎₋₍₄₎ |
| Camada | pH Ref. (1) | pH₍₂₎ | Δ pH'₍₁₋₂₎ | pH Ref. (3) | pH₍₄₎ | Δ pH'₍₃₋₄₎ | | | |
| Ba | 12,78 | 8,34 | 4,44 | 12,09 | 8,22 | 3,87 | 8,11 | 0,12 | |
| Mi | 5,30 | 7,60 | -2,30 | 4,85 | 7,06 | -2,21 | 6,52 | 0,54 | |
| Sl | 5,30 | 6,93 | -1,63 | 4,85 | 6,41 | -1,56 | 5,89 | 0,52 | |
| SP | 5,30 | 7,21 | -1,91 | 4,85 | 6,63 | -1,78 | 6,05 | 0,58 | |
| Ponto 02 | | | | | | | | | |
| 2020 | | H₂O | | | KCl | | | PCZ | Δ pH₍₂₎₋₍₄₎ |
| Camada | pH Ref. (1) | pH₍₂₎ | Δ pH'₍₁₋₂₎ | pH Ref. (3) | pH₍₄₎ | Δ pH'₍₃₋₄₎ | | | |
| Ba | 12,78 | 8,42 | 4,36 | 12,09 | 8,22 | 3,87 | 8,01 | 0,21 | |
| Mi | 5,30 | 8,33 | -2,30 | 4,85 | 8,19 | -3,34 | 8,05 | 0,14 | |
| Sl | 5,30 | 7,06 | -1,63 | 4,85 | 6,48 | -1,63 | 5,90 | 0,58 | |
| SP | 5,30 | 7,45 | -1,91 | 4,85 | 6,77 | -1,92 | 6,09 | 0,68 | |
| 2021 | | H₂O | | | KCl | | | PCZ | Δ pH₍₂₎₋₍₄₎ |
| Camada | pH Ref. (1) | pH₍₂₎ | Δ pH'₍₁₋₂₎ | pH Ref. (3) | pH₍₄₎ | Δ pH'₍₃₋₄₎ | | | |
| Ba | 12,78 | 8,52 | 4,26 | 12,09 | 8,30 | 3,79 | 8,08 | 0,22 | |
| Mi | 5,30 | 7,44 | -2,30 | 4,85 | 6,84 | -1,99 | 6,25 | 0,60 | |
| Sl | 5,30 | 6,78 | -1,63 | 4,85 | 6,44 | -1,59 | 6,10 | 0,34 | |
| SP | 5,30 | 6,76 | -1,91 | 4,85 | 6,28 | -1,43 | 5,80 | 0,48 | |
| Ponto 03 | | | | | | | | | |
| 2020 | | H₂O | | | KCl | | | PCZ | Δ pH₍₂₎₋₍₄₎ |
| Camada | pH Ref. (1) | pH₍₂₎ | Δ pH'₍₁₋₂₎ | pH Ref. (3) | pH₍₄₎ | Δ pH'₍₃₋₄₎ | | | |
| Ba | 12,78 | 8,57 | 4,21 | 12,09 | 8,30 | 3,79 | 8,02 | 0,28 | |
| Mi | 5,30 | 7,87 | -2,30 | 4,85 | 7,16 | -2,31 | 6,46 | 0,71 | |
| Sl | 5,30 | 7,45 | -1,63 | 4,85 | 6,73 | -1,88 | 6,01 | 0,72 | |
| SP | 5,30 | 6,44 | -1,91 | 4,85 | 6,23 | -1,38 | 6,02 | 0,21 | |
| 2021 | | H₂O | | | KCl | | | PCZ | Δ pH₍₂₎₋₍₄₎ |
| Camada | pH Ref. (1) | pH₍₂₎ | Δ pH'₍₁₋₂₎ | pH Ref. (3) | pH₍₄₎ | Δ pH'₍₃₋₄₎ | | | |
| Ba | 12,78 | 8,45 | 4,33 | 12,09 | 8,31 | 3,78 | 8,16 | 0,15 | |
| Mi | 5,30 | 8,39 | -2,30 | 4,85 | 8,24 | -3,39 | 8,10 | 0,14 | |
| Sl | 5,30 | 7,11 | -1,63 | 4,85 | 6,60 | -1,75 | 6,09 | 0,51 | |
| SP | 5,30 | 6,72 | -1,91 | 4,85 | 5,37 | -0,52 | 4,02 | 1,35 | |

Nas camadas de base a redução significativa dos valores medidos do pH em H₂O e em KCl em relação aos valores de referência indicam três possibilidades: ocorrência de migração

química com perda de saturação do Ca(OH)_2 , ou seja, houve a redução do potencial das reações químicas; uso de um teor efetivo de cal inferior ao fixado; heterogeneidade das misturas realizadas. Todas estas possibilidades implicam na necessidade de maiores controles nas obras executadas e avaliação temporal da migração da cal.

O aumento do pH em H_2O nas demais camadas do solo indicam uma possível migração dos cátions no fluxo descendente, indicando que a cal adicionada à camada de base, foi identificada indiretamente pela variação do pH nas camadas inferiores ao pavimento. Embora as variações de pH não sejam muito grandes, para a sua efetiva consideração faz-se necessário ponderar o volume de solo envolvido considerando-se inclusive o entorno receptor não compreendido diretamente na estrutura de pavimento. Tal observação não descarta as possibilidades de uso de menor teor de cal e da heterogeneidade da mistura, mas aponta para a necessidade de estudo complementares.

Em 2020, no Ponto 01, os valores foram diminuindo ao se aprofundar no perfil de solo, obtendo-se o pH de 8,69 na camada de base, 8,17 na camada de migração (camada com 5 cm após a camada de base), 7,32 no subleito (camada com 30 cm abaixo da camada de base) e 7,05 no subleito profundo (camada a 70 cm de profundidade da camada de base). Cabe destacar que tal migração pode ocorrer não só devido a infiltração de água como também em consequência da atuação de gradientes de sucção matricial e osmótica no solo.

Continuando a análise do Ponto 01, mas analisando os dados de 2021 e comparando com o ano de 2020, observa-se uma redução dos valores de pH tanto em água como em KCl nas camadas Ba, Mi e SI e ampliação na camada SP, confirmando assim o processo migratório de elementos e compostos químicos oriundos da cal.

Destaca-se ainda o fato dos valores de ΔpH ($\text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$) serem positivos e tenderem a apresentar menores valores para a base sinalizando, embora com o predomínio dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, para sua maior concentração nas camadas mais profundas da estrutura de pavimento. Tal comportamento sinaliza para o consumo da gibbsita nas reações com a cal.

Em relação ao Ponto 02 foi observado também que o pH da base ficou bem próximo ao pH da camada de migração, tanto no pH em H_2O (8,42 e 8,33) quanto no pH em KCl (8,22 e 8,19), indicando um possível equilíbrio do potencial hidrogeniônico das camadas. Contudo, analisando os dados do ano de 2021 este comportamento não se confirma, apontando uma possível coleta da camada de migração com parte da camada de base, pois as camadas em

campo não são perfeitamente estabelecidas podendo ocorrer pequenas variações ao serem executadas, implicando em alterações na espessura efetiva executada.

Também foi verificado no Ponto 02 um leve aumento do pH em H₂O da base, 0,10, passando de 8,42 em 2020 para 8,52 em 2021. Tal variação pode ser oriunda de eventual heterogeneidade do solo e não é significativa ao ponto de se estabelecer uma possível contaminação ou erro no procedimento do ensaio ou da leitura.

Também para os dados do ponto 02, mas no ano de 2021, observou-se um comportamento semelhante ao observado no ponto 01, com exceção do pH em H₂O do subleito e do subleito profundo, que tiveram os seus valores bem próximos.

Os valores do pH em H₂O e em KCl do Ponto 03 se assemelham aos valores encontrados nos Pontos 01 e 02. Em relação ao valor de referência e comparando com o ano de 2020 a camada de base apresentou uma variação de pH em H₂O de 4,21. Nas camadas subjacentes o pH em H₂O elevou-se em 2,30 na camada de migração, 1,63 no subleito e 1,91 no subleito profundo.

Comparando os dados de 2021 do Ponto 03 observou-se a redução de 0,12 no pH da base em H₂O comparando 2021 com 2020. O pH em H₂O da camada de migração (8,39) se aproximou do pH da base (8,45), indicando uma possível migração ou a execução de uma camada de base com espessura superior a 15 cm, prejudicando a identificação correta do plano de coleta.

Na Figura 4.12 são apresentados, por camada, os resultados obtidos nos anos 2020 e 2021 do pH em H₂O dos Ponto 01 (a), Ponto 02 (b) e Ponto 03 (c). Já a Figura 4.13 apresenta a variação do pH em KCl dos mesmo Ponto 01 (a), Ponto 02 (b) e Ponto 03 (c).

Comparando a variação do pH em H₂O dos anos de 2020 e 2021, contida na Figura 4.12 constata-se uma capacidade do solo em variar o potencial hidrogeniônico da camada da base ampliando o das camadas subjacentes devido à migração de compostos químicos da cal. Comportamento semelhante pode ser observado na Figura 4.13 em que o pH em KCl apresenta o mesmo comportamento observado para o pH em H₂O.

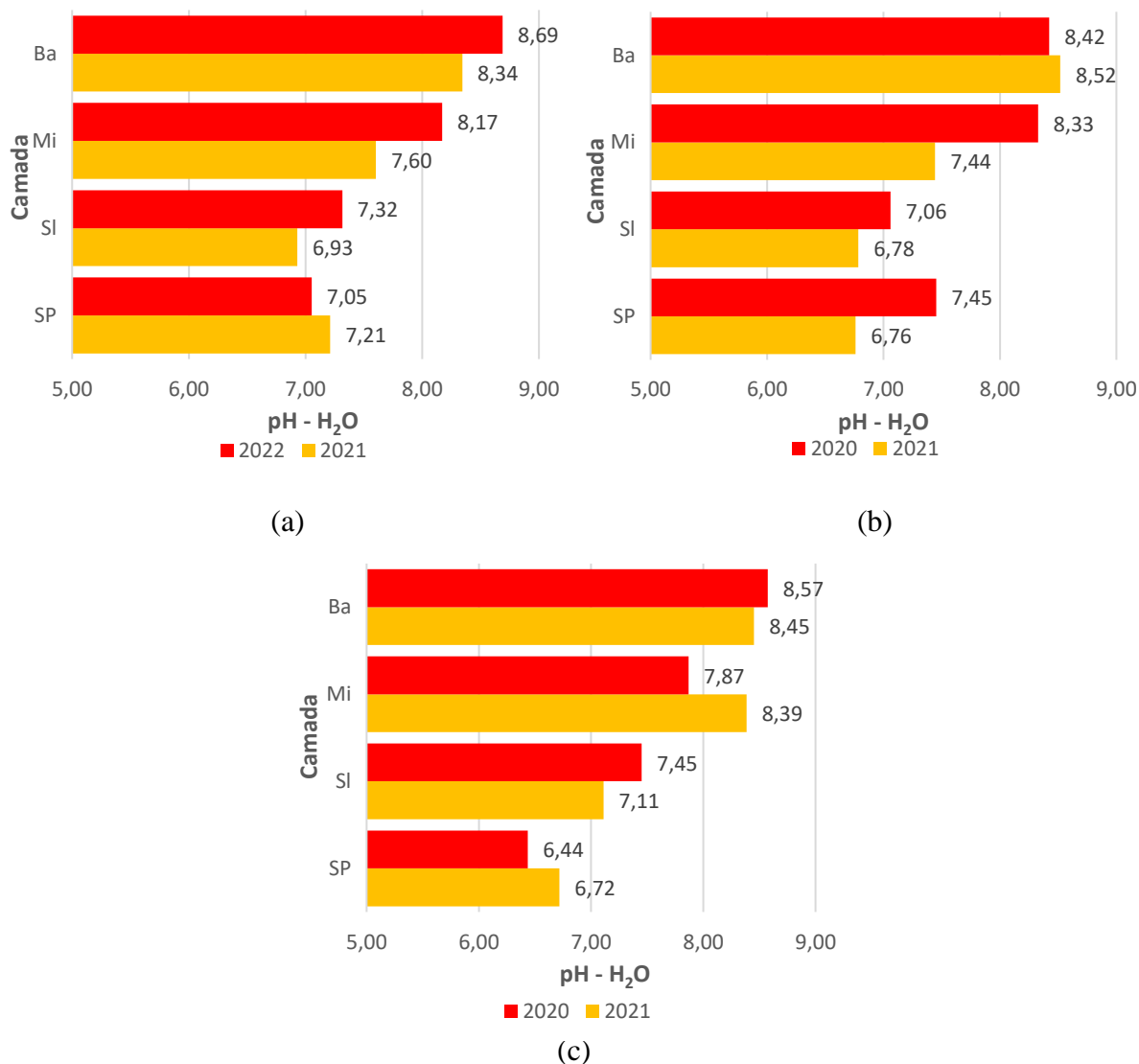


Figura 4.12 – 2020x2021 – Variação do pH em H₂O: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c).

O aumento do pH em H₂O na camada subleito profundo, observados no Ponto 01 e no Ponto 03 indica uma possível retenção do fluxo migratório dos componentes químicos da cal, causada pela presença do saprólito identificado na região e que apresenta geralmente menor permeabilidade e gradiente de sucção.

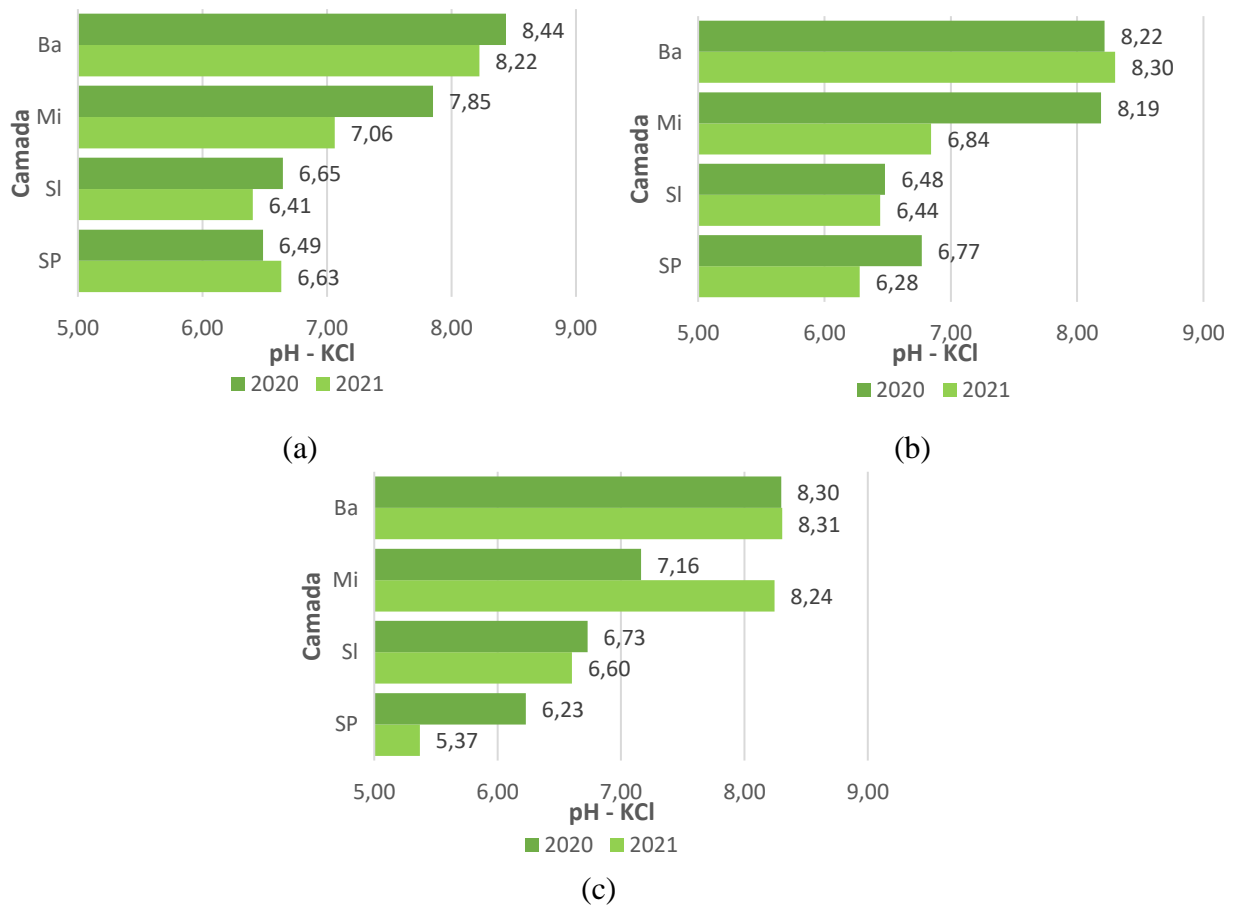


Figura 4.13 – 2020x2021 – Variação do pH em H₂O: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c).

Na Figura 4.13, em especial no Ponto 03, observou-se uma estabilidade nos valores encontrado do pH em KCl na camada de base, do ano de 2020 (8,30) para o ano de 2021 (8,31). Assim como para o pH em H₂O, o pH em KCl da camada de migração (8,24) ficou bem próximo da camada de base (8,31).

b) Análise granulométrica

Primeiramente serão apresentados os dados da análise granulométrica sem o uso do defloculante dos três pontos de coleta e posteriormente os dados com o uso do defloculante.

O ensaio de sedimentação sem o uso de defloculante tem como objetivo identificar a textura do solo se não coincidente, o mais próximo possível do estado em que ele se encontra e o ensaio com agente desagregador e/ou defloculador avaliar o solo considerando as partículas individualizadas. No presente estudo foi tomada como referência uma amostra de solo coletada na jazida e ensaiada com e sem o uso de defloculante sendo que para a base foi efetuado o ensaio de referência 24 horas após a adição de 3% de cal e para as camadas de migração,

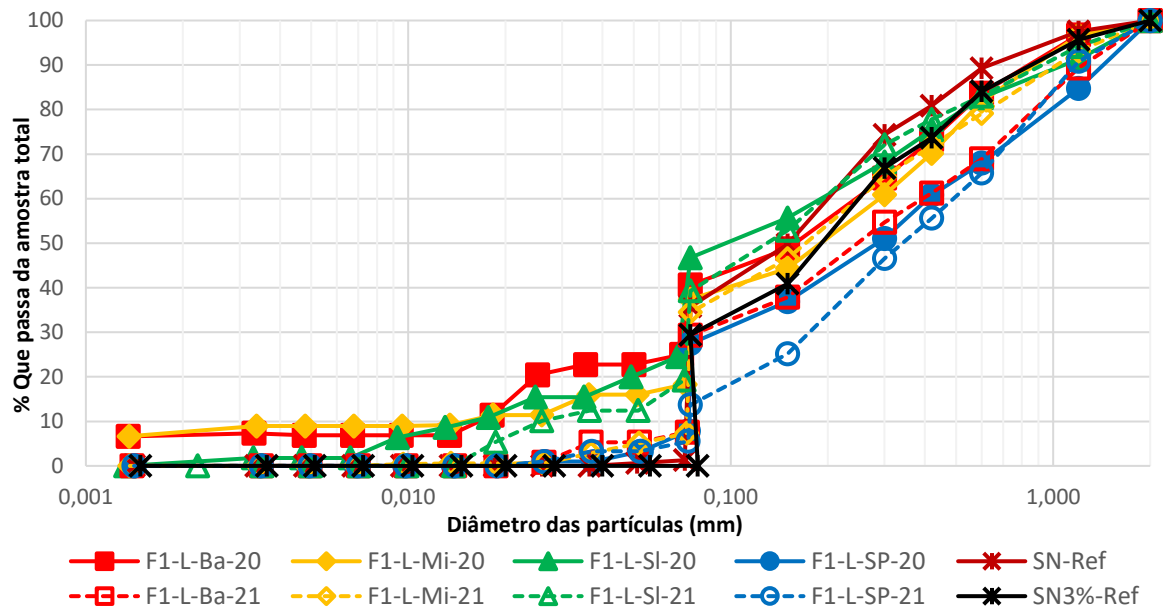
subleito e subleito profundo usou-se o mesmo solo, porém sem a adição de cal.

No Ponto 01 a Figura 4.14 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação sem o uso de defloculante para a curva granulométrica do solo natural (SN-Ref.) e do solo com 3% de cal (SN3%-Ref.), assim como as curvas granulométricas obtidas para o solo coletado *in situ* em 2020 e 2021 para o solo proveniente da base (Ba), da camada de migração (Mi), da camada de subleito (SI) e da camada de subleito profundo (SP). A terminologia adotada foi aquela apresentada no subcapítulo 3.1.5.

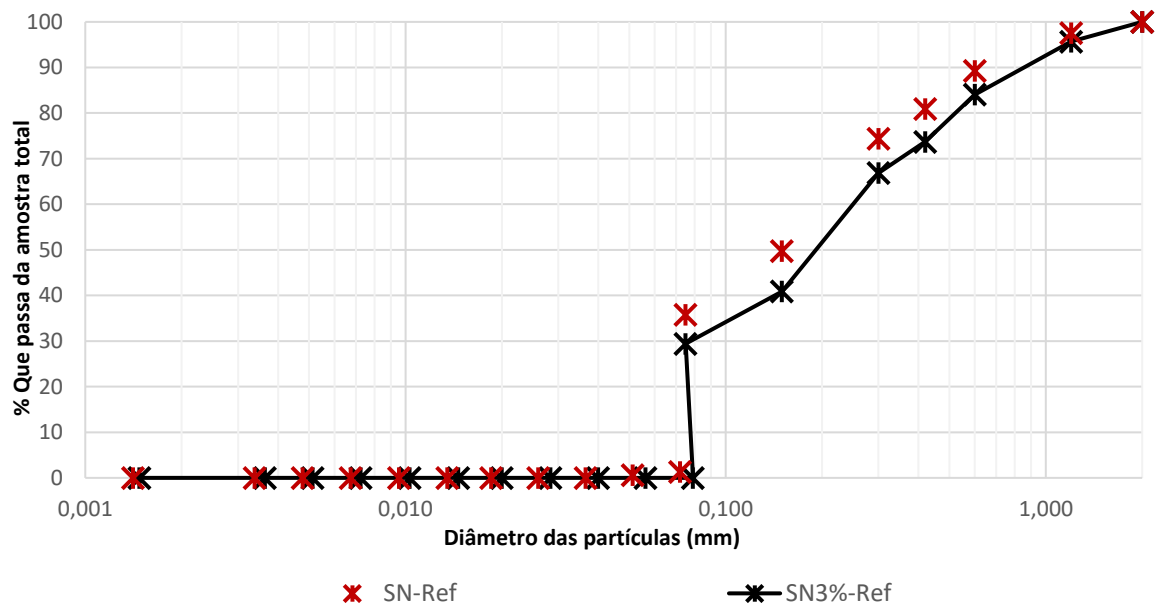
Embora se deva ter em mente a possibilidade de variabilidade em campo não só do solo como das misturas solo-cal os resultados mostrados na Figura 4.14a apontam para a ação desagregadora exercida pela cal quando considerada a fração mais grossa do solo, em especial, ao se comparar os resultados obtidos em 2020 (linha cheia) com os de 2021 (linha tracejada) para a camada de base, pois a diferença da porcentagem do material passante em cada diâmetro aumentou. Observa-se também a ampliação da fração mais fina passante na peneira #200 em especial nas camadas receptoras de modo mais direto da cal introduzida no solo, a base e a camada de migração.

A Figura 4.14b, na qual se colocou unicamente os resultados obtidos para o solo natural e o solo 24 horas após a mistura com a cal deixa claro, no entanto, pela coincidência quase total da curva, que o impacto da cal nas agregações não é imediato, pois a fração fina menor que 0,074 mm foi mantida ocorrendo apenas uma pequena ampliação na fração mais grossa o que pode ter se dado devido à variabilidade do solo ou ao fortalecimento externo das agregações pela ação química da cal.

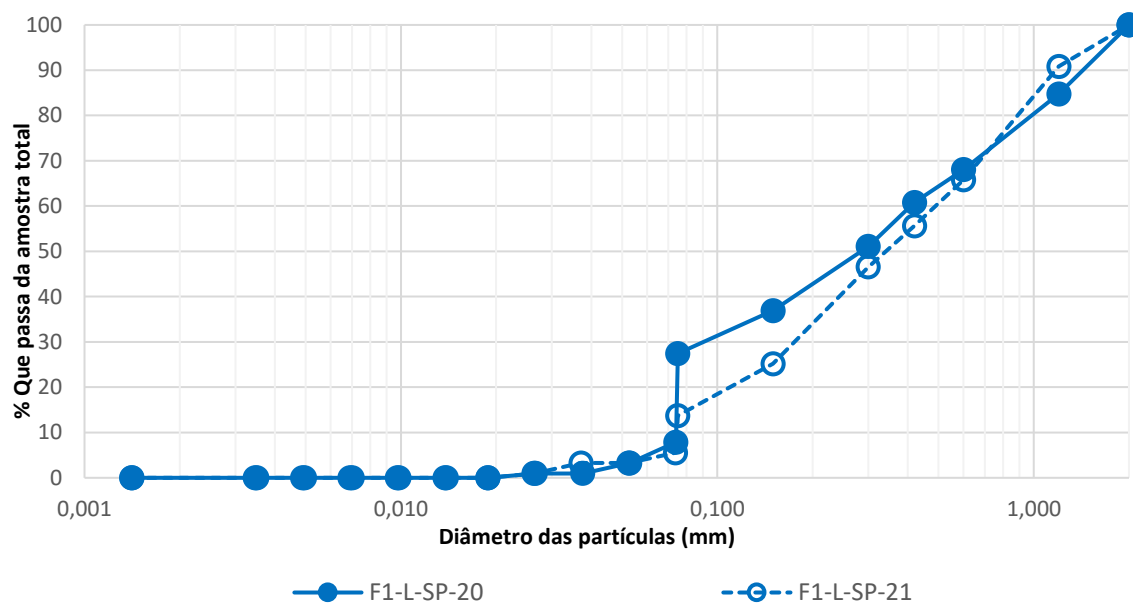
Ao se observar os resultados obtidos para o subleito profundo (Figura 4.14c) verifica-se que ao ser atingido em 2020 por compostos químicos oriundos da cal as agregações foram fragilizadas diminuindo a fração grossa (diâmetro equivalente $> 0,074$ mm) e aumentando a fração fina (diâmetro equivalente $< 0,074$ mm) sendo, no entanto, readquirida a estabilidade em 2021.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.14 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 01 sem o uso do defloculante: a) todos os resultados; b) natural e mistura com 3% de cal; c) subleito profundo.

A Tabela 4.10 apresenta comparativamente os resultados obtidos do Ponto 01 considerando-se as respectivas frações granulométricas de acordo com a terminologia da NBR 6502 (1995) sem que se fizesse uso de defloculante nos materiais coletados nos anos de 2020 e 2021. Não foi realizado estudo comparativo com o solo de referência devido a sua variabilidade, evitando-se, assim, conclusões precipitadas acerca da variação granulométrica ao longo do tempo.

Analisando o comportamento textural do ano de 2021 comparativamente com o ano de 2020 verifica-se que o aumento da fração areia grossa foi mais expressivo. Na base o aumento foi de 14,73%, na camada de migração 2,73% e no subleito profundo 2,25%. O decréscimo de 0,35% da fração areia grossa no subleito comparando 2020 com 2021 não pode ser atribuído a uma piora no comportamento do solo, e sim a variabilidade dos resultados.

Consequentemente, a reação química de aglutinação continuou ocorrendo. De um ano para o outro a fração silte+argila reduziu 17,67% na camada de base, 11,01% na camada de migração, 11,97% na camada de subleito e 0,76% na camada de subleito profundo não sendo mais detectável a fração argila em nenhuma das amostras coletadas em 2021.

Em síntese, os resultados obtidos e mostrados na Figura 4.14a conjuntamente com as

comparações apresentadas na Tabela 4.10 sinalizam para um certo potencial inicial desagregador da cal (2020) seguido do restabelecimento e mesmo formação de agregações e/ou suas estabilizações com a adição da cal ao longo do tempo na fração mais grossa (2021), requerendo no entanto, cautela e maior reflexão ao se comparar os resultados com o observado por Ayala (2020) para um outro solo laterítico do Distrito Federal em que a cal atuou instabilizando os agregados após um ano de cura *in situ*. A não conformidade absoluta entre os dois resultados coloca em evidência a importância de se analisar o fenômeno em cada caso até que se defina com clareza os fatores, principalmente as condições de contorno e natureza do solo, que levam a ocorrência dos fenômenos de agregação e desagregação.

Tabela 4.10 – 2020x2021 – Variação granulométrica sem o uso do defloculante – Ponto 01

| Term. | Base | | | Migração | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 16,36 | 31,09 | -14,73 | 18,16 | 20,89 | -2,73 |
| AM | 29,59 | 25,42 | 4,17 | 32,01 | 26,45 | 5,56 |
| AF | 30,23 | 37,34 | -7,11 | 32,89 | 46,72 | -13,83 |
| St | 16,74 | 6,15 | 10,59 | 8,73 | 5,94 | 2,79 |
| Ar | 7,08 | 0,00 | 7,08 | 8,21 | 0,00 | 8,21 |
| St + Ar | 23,82 | 6,15 | 17,67 | 16,95 | 5,94 | 11,01 |

| Term. | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 17,33 | 16,98 | 0,35 | 31,98 | 34,23 | -2,25 |
| AM | 22,83 | 23,72 | -0,89 | 26,41 | 33,48 | -7,07 |
| AF | 37,3 | 44,03 | -6,73 | 36,79 | 28,23 | 8,56 |
| St | 21,34 | 15,27 | 6,07 | 4,82 | 4,06 | 0,76 |
| Ar | 1,19 | 0,00 | 1,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 27,24 | 15,27 | 11,97 | 4,82 | 4,06 | 0,76 |

Analisando as curvas granulométricas do Ponto 02 sem o uso do defloculante (Figura 4.15), observou-se que, comparando o ano de 2020 com 2021 a porcentagem da fração fina passando na peneira #200 (diâmetros menores que 0,074 mm) diminuiu em 2021, indicando uma aglutinação dos finos. Verifica-se nesta Figura que a ampliação da fração granular observada na Figura 4.14b quando da incorporação da cal foi desfeita e gerou desagregação em 2020 com ampliação da fração fina sendo, no entanto, a estabilidade das agregações restabelecida em 2021. Observação similar pode ser feita à descrita para a Figura 4.14c quando da análise do subleito profundo.

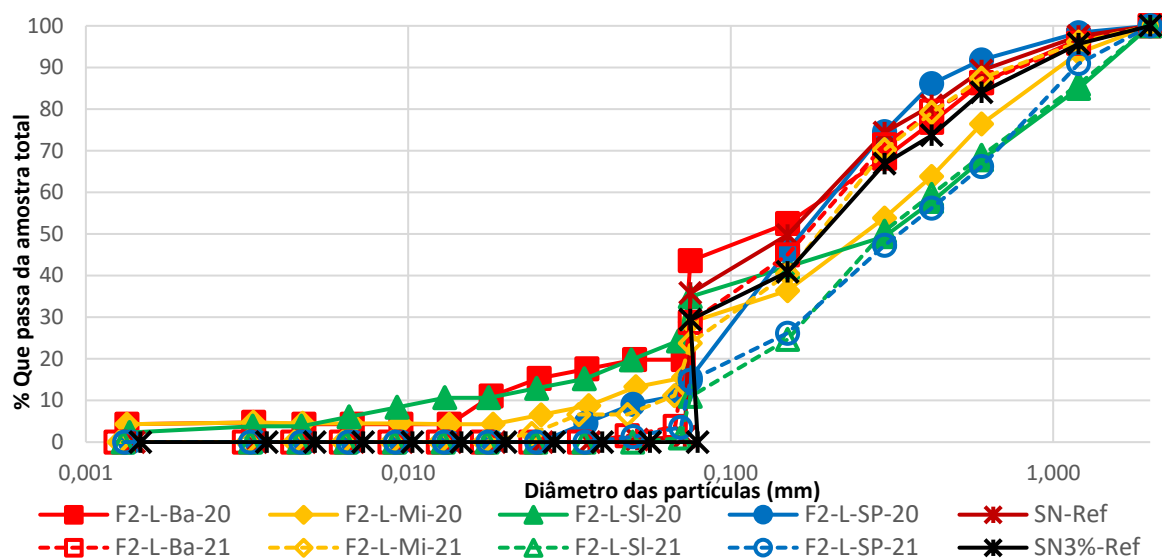


Figura 4.15 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 02 sem o uso do defloculante.

Ao analisar os dados contidos na Tabela 4.11 destaca-se que enquanto no subleito a fração areia grossa foi mantida entre 2020 e 2021, no subleito profundo ela cresceu de 8,19% em 2020 para 33,78% em 2021.

Tabela 4.11 – 2020x2021 – Variação granulométrica sem o uso do defloculante – Ponto 02

| Term. | Base | | | Migração | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 13,65 | 13,66 | -0,01 | 23,56 | 12,56 | 11,00 |
| AM | 28,60 | 32,51 | -3,91 | 34,24 | 37,07 | -2,83 |
| AF | 37,09 | 50,93 | -13,83 | 27,92 | 40,87 | -12,95 |
| St | 15,82 | 2,90 | 12,92 | 9,67 | 9,49 | 0,18 |
| Ar | 4,83 | 0,00 | 4,83 | 4,60 | 0,00 | 4,60 |
| St + Ar | 20,65 | 2,90 | 17,75 | 14,27 | 9,49 | 4,78 |

| Term. | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 32,18 | 31,12 | 1,06 | 8,19 | 33,78 | -25,59 |
| AM | 23,33 | 35,56 | -12,24 | 36,28 | 33,04 | 3,24 |
| AF | 22,23 | 32,81 | -10,58 | 45,31 | 30,75 | 14,56 |
| St | 18,95 | 0,51 | 18,44 | 10,22 | 2,43 | 7,79 |
| Ar | 3,32 | 0,00 | 3,32 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 22,27 | 0,51 | 21,76 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

A Figura 4.16 apresenta as curvas granulométricas do Ponto 03 sem o uso do defloculante. Os comportamentos das curvas são semelhantes ao observado no Ponto 01 e Ponto

02, exceto da curva de sedimentação da camada de migração do ano de 2020 que apresenta um aumento na fração arenosa o que pode ser atribuído a variabilidade do material.

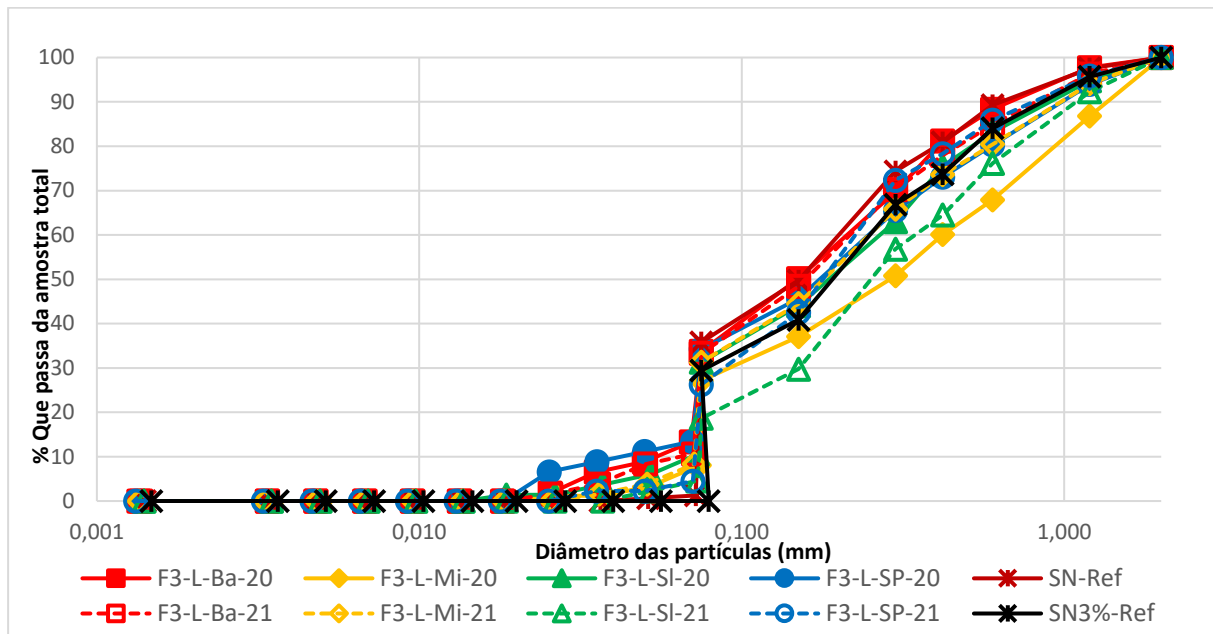


Figura 4.16 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 03 sem o uso do defloculante.

A Tabela 4.12 apresenta a variação granulométrica dos materiais constituintes do Ponto 03, comparando 2020 e 2021. Tanto no ano de 2020 quanto no ano de 2021 não foi observada a presença de fração argila em qualquer das camadas.

Em relação a camada de migração cabe destaque ao passar de 2020 para 2021 a redução na fração de areia grossa de 32,08% para 19,56% e o aumento da fração de areia fina de 36,59% em 2020 para 45,74%. Esta variação pode ter sido causada pela fragilização das cimentações com o tempo ou ser simplesmente devida à variabilidade do solo.

Na camada de subleito comparando os anos de 2020 e 2021 ocorreu um aumento das frações areia grossa e areia média e uma redução das frações areia fina e silte. Já no subleito profundo observou-se a redução das frações areia grossa e silte com ampliação das frações areia fina.

Considerando-se o fato de que as rodovias começam a se submeterem ao efeito das cargas logo após inauguradas faz-se recomendável em casos similares ao estudado que se considere nas análises de comportamento a instabilidade das agregações gerada pela cal na fase inicial, pois uma vez destruídas a ação estabilizadora futura perde a sua função.

Tabela 4.12 – 2020x2021 – Variação granulométrica sem o uso do defloculante – Ponto 03

| Base | | | | Migração | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Term. | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 11,63 | 15,07 | -3,44 | 32,08 | 19,56 | 12,52 |
| AM | 31,65 | 29,25 | 2,40 | 26,26 | 28,84 | -2,58 |
| AF | 45,60 | 46,26 | -0,66 | 36,59 | 45,74 | -9,15 |
| St | 11,11 | 9,42 | 1,69 | 5,06 | 5,86 | -0,80 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 11,11 | 9,42 | 1,69 | 5,06 | 5,86 | -0,80 |

| Subleito | | | | Subleito Profundo | | |
|----------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Term. | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 16,82 | 23,84 | -7,02 | 19,71 | 14,13 | 5,58 |
| AM | 32,82 | 37,39 | -4,58 | 28,00 | 33,44 | -5,44 |
| AF | 42,65 | 35,48 | 7,16 | 40,02 | 49,09 | -9,07 |
| St | 7,72 | 3,29 | 4,43 | 12,27 | 3,34 | 8,93 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 7,72 | 3,29 | 4,43 | 12,27 | 3,34 | 8,93 |

Analisando-se agora os resultados obtidos com o uso de defloculante do Ponto 01 observa-se na Figura 4.17 que a cal está a piorar a estabilidade das agregações, só a restabelecendo em 2021 e apenas para a camada de base, o que de certo modo converge, mas não na mesma proporção, pois se trata de solos distintos, para as observações realizadas por Ayala (2020).

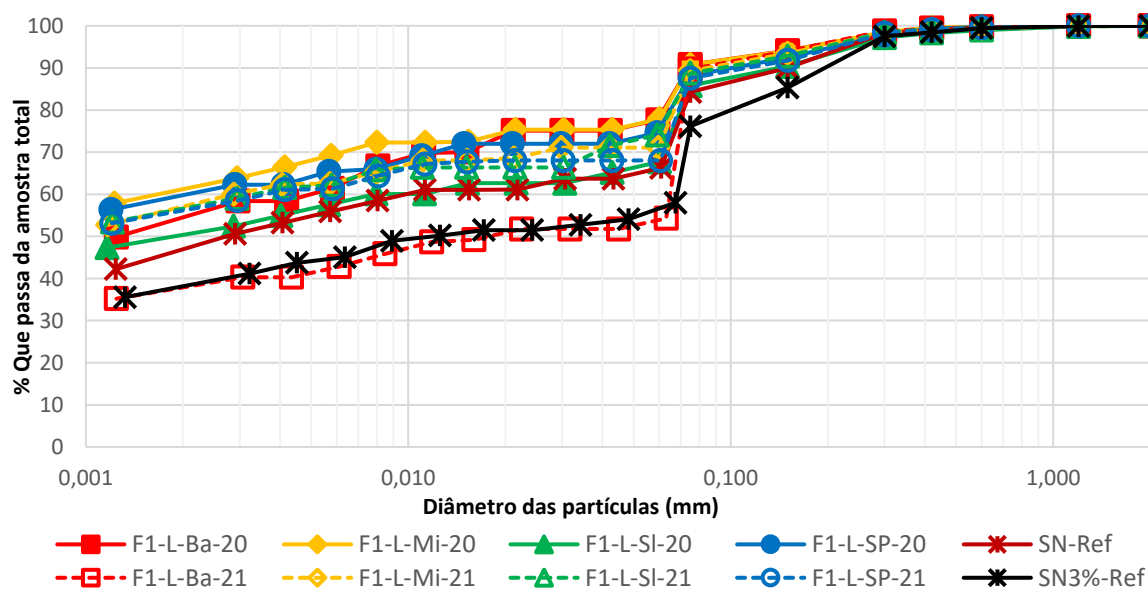


Figura 4.17 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 01 com o uso do defloculante.

Na Tabela 4.13 é apresentada a variação granulométrica temporal com o uso do defloculante do Ponto 01 colocando-se em destaque as faixas granulométricas entre o ano de 2020 e 2021. Os dados dessa Tabela guardam coerência com as análises realizadas sobre a Figura 4.17.

Tabela 4.13 – 2020x2021 – Variação granulométrica com o uso do defloculante – Ponto 01

| Term. | Base | | | Migração | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 0,25 | 0,39 | -0,14 | 0,12 | 0,64 | -0,52 |
| AM | 4,25 | 4,03 | 0,22 | 4,37 | 4,27 | 0,10 |
| AF | 17,35 | 41,72 | -24,37 | 17,62 | 23,62 | -6,00 |
| St | 23,50 | 15,67 | 7,83 | 16,71 | 15,00 | 1,71 |
| Ar | 54,65 | 38,19 | 16,46 | 61,18 | 56,47 | 4,71 |
| St + Ar | 78,15 | 53,86 | 24,29 | 77,89 | 71,47 | 6,42 |
| Term. | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
| | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,25 | 0,43 | -0,18 |
| AM | 6,38 | 4,83 | 1,55 | 5,52 | 5,66 | -0,14 |
| AF | 24,95 | 19,87 | 5,08 | 18,83 | 25,90 | -7,07 |
| St | 17,76 | 18,34 | -0,58 | 15,93 | 11,97 | 3,96 |
| Ar | 49,91 | 56,48 | -6,57 | 59,47 | 56,04 | 3,43 |
| St + Ar | 67,68 | 74,81 | -7,13 | 75,4 | 68,02 | 7,38 |

Na Figura 4.18, onde estão as curvas granulométricas do solo com o uso do defloculante do Ponto 02, observa-se que apenas o subleito e subleito profundo tiveram as estabilidades das agregações melhoradas em relação ao solo natural cabendo aqui um parêntese para esclarecer que conforme mostrado por Roseno e Camapum de Carvalho (2007) os solos tropicais profundamente intemperizados, como é o caso do solo estudado, possuem agregações que resistem a ação química (defloculante), outras que resistem ao esforço mecânico (ultrassom) e aquelas que não resistem a ambos os agentes instabilizadores.

Analisando-se os dados contidos na Tabela 4.14 por faixa granulométrica, considerando-se o uso do defloculante, verifica-se coerência com as análises realizadas a partir da Figura 4.18.

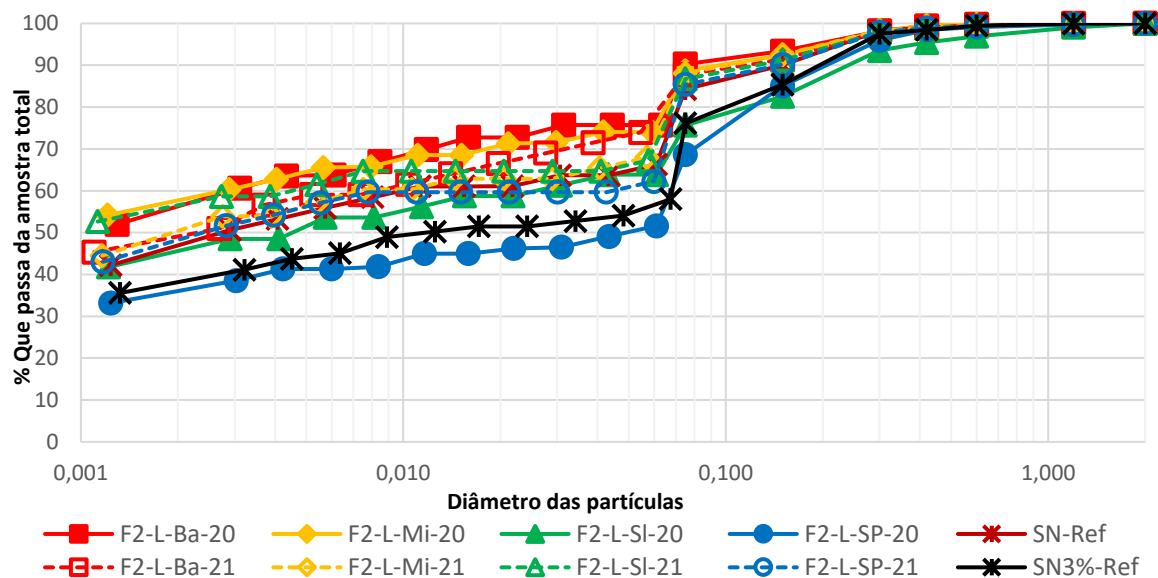


Figura 4.18 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 02 com o uso do defloculante.

Tabela 4.14 – 2020x2021 – Variação granulométrica com o uso do defloculante – Ponto 02

| | Base | | | Migração | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Term. | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 0,21 | 0,56 | -0,35 | 0,19 | 0,52 | -0,32 |
| AM | 4,84 | 5,81 | -0,97 | 5,53 | 5,06 | 0,47 |
| AF | 19,26 | 15,96 | 3,29 | 19,33 | 23,13 | -3,80 |
| St | 18,40 | 29,90 | -11,50 | 17,56 | 22,33 | -4,78 |
| Ar | 57,29 | 47,77 | 9,53 | 57,38 | 48,96 | 8,42 |
| St + Ar | 75,69 | 77,67 | -1,97 | 74,94 | 71,30 | 3,65 |

| | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Term. | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 3,07 | 0,65 | 2,41 | 0,90 | 0,66 | 0,24 |
| AM | 10,73 | 5,92 | 4,81 | 10,42 | 6,60 | 3,82 |
| AF | 22,34 | 23,51 | -1,17 | 37,22 | 30,23 | 6,99 |
| St | 18,47 | 14,54 | 3,93 | 15,22 | 15,17 | 0,05 |
| Ar | 45,40 | 55,38 | -9,98 | 36,24 | 47,34 | -11,09 |
| St + Ar | 63,86 | 69,91 | -6,05 | 51,46 | 62,50 | -11,04 |

Na Figura 4.19, estão as curvas granulométricas do solo com o uso do defloculante do Ponto 03. Analisando a variação temporal, observa-se aqui a mesma constatação realizada em relação à figura 4.18, ou seja, apenas o subleito e em especial o subleito profundo apresentaram uma melhoria na estabilidade das agregações em 2021, sendo ela pior em 2020.

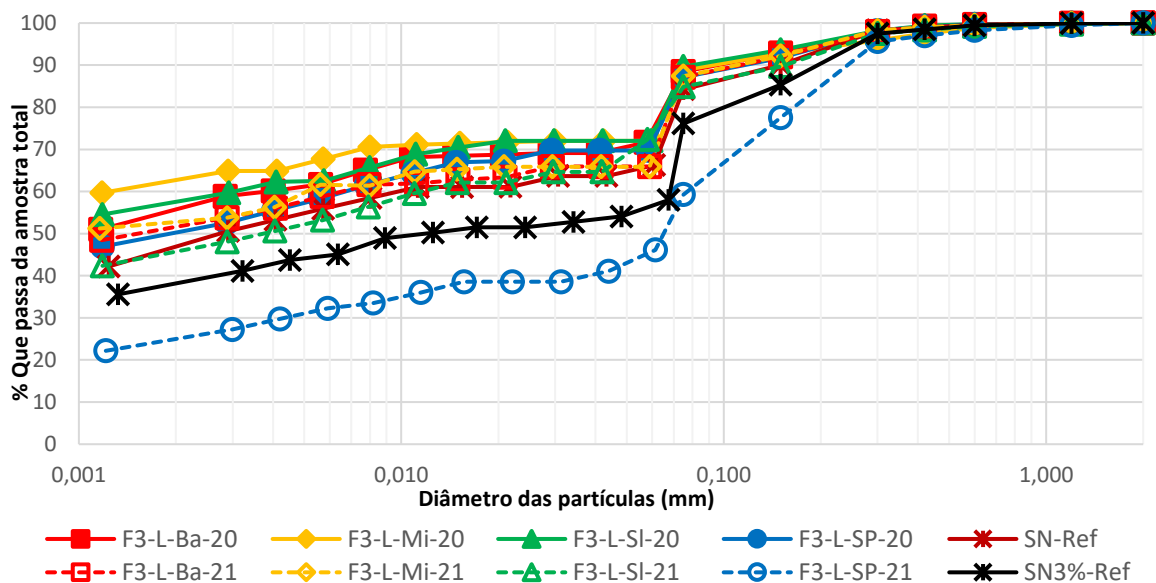


Figura 4.19 – 2020x2021 – Curvas granulométricas do Ponto 03 com o uso do defloculante.

Na Tabela 4.15 é possível observar os dados referentes a variação granulométrica com o uso de defloculante do Ponto 03 e o fato observado na Figura 4.19 pode ser constatado numericamente.

Tabela 4.15 – 2020x2021 – Variação granulométrica com o uso do defloculante – Ponto 03

| | Base | | | Migração | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Term. | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1-2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1-2)}$ (%) |
| AG | 0,35 | 0,64 | -0,29 | 1,18 | 0,53 | 0,65 |
| AM | 5,10 | 5,38 | -0,28 | 5,00 | 5,28 | -0,28 |
| AF | 20,45 | 26,62 | -6,17 | 21,81 | 26,82 | -5,01 |
| St | 19,12 | 16,16 | 2,96 | 9,61 | 14,86 | -5,25 |
| Ar | 54,97 | 51,20 | 3,77 | 62,40 | 52,52 | 9,88 |
| St + Ar | 74,09 | 67,36 | 6,73 | 72,01 | 67,38 | 4,63 |
| | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
| Term. | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1-2)}$ (%) | 2020 ₍₁₎ (%) | 2021 ₍₂₎ (%) | $\Delta_{(1-2)}$ (%) |
| AG | 0,26 | 0,78 | -0,52 | 0,40 | 1,74 | -1,34 |
| AM | 4,60 | 6,92 | -2,32 | 5,72 | 14,72 | -9,01 |
| AF | 22,55 | 18,47 | 4,08 | 22,43 | 37,81 | -15,38 |
| St | 15,33 | 28,50 | -13,17 | 21,60 | 20,73 | 0,87 |
| Ar | 57,27 | 45,33 | 11,94 | 49,85 | 24,99 | 24,86 |
| St + Ar | 72,60 | 73,83 | -1,23 | 71,45 | 45,72 | 25,73 |

c) **Resumo dos dados da análise temporal (2020x2021)**

Após a apresentação dos dados referentes ao pH em H₂O e em KCl, da análise granulométrica sem e com o uso do defloculante das 04 camadas de observação para os 03 pontos de coleta alguns comentários devem ser tecidos. São eles:

- Verificou-se que em todas as amostras apresentadas os valores de pH em H₂O foram superiores ao PCZ, indicando que todas as amostras apresentam capacidade de troca de cátions – CTC. Esta condição favorece que os ânions presentes no solo reajam quimicamente com os cátions presentes na cal (óxido e hidróxido de cálcio e magnésio), cabendo destacar, no entanto, que a atuação da cal no interior das agregações presentes no solo requer tempo para o equilíbrio, não ocorrendo de forma imediata;
- A camada de migração apresentou valores de pH em H₂O próximos aos obtidos para a camada de base em algumas amostras. Tal fato pode ter sido causado pela variação da espessura da camada de base durante a execução, tendo em vista que esta camada é delgada (5cm) comparada com as demais, ou pela simples migração química;
- Nas análises granulométricas a cal só conseguiu preservar certa ação aglutinadora em 2021, preservação esta que não se manteve ao ser usado o defloculante hexametáfosfato de sódio;
- No ensaio de sedimentação sem o uso do defloculante nas amostras que continham frações argila em 2020 não apresentaram tal fração em 2021, indicando predominância de aglutinação estável em presença de água;
- Nas curvas de sedimentação com o uso do defloculante, geralmente a fração fina do solo dos materiais analisados em 2021 apresentam, face ao analisado em 2020, redução da porcentagem que passa da amostra total, no entanto, de um modo geral, mostraram-se menos estáveis frente ao defloculante, mesmo as amostras coletadas em 2021;

4.12.2 Estudo de seção transversal

Este estudo teve como objetivo verificar o impacto da migração química em três posições distintas: no centro e na lateral (a 1,50m do centro) do pavimento e no terreno natural afastado do revestimento (a 3,00 m da lateral), conforme explanado nos tópicos 3.1.4 e 3.1.5.

A coleta de amostras no centro do pavimento permitiu analisar o comportamento do solo na condição mais impermeabilizada possível e mais afastada dos pontos de aeração e de infiltração da água da chuva. Já a coleta e análise de amostras oriundas da lateral do pavimento teve como objetivo verificar a variação das características do solo tratado com cal e sob sua possível influência quando submetido à ação direta da chuva e à influência dos períodos sazonais. Por fim, a análise do material afastado objetivou verificar a influência da camada melhorada com cal a uma distância significativa da camada de base melhorada com cal.

As análises comparativas de fundamentaram em resultados de pH e granulometria mostrados a seguir, destacando-se o fato de que para o solo afastado devido à sua cota inferior à da estrutura de pavimento só foi analisado o subleito profundo, e para o furo central a amostragem foi interrompida no subleito não atingindo o subleito profundo.

a) pH

Na Tabela 4.16 estão apresentados os resultados obtidos das leituras do pH em H₂O dos furos central, lateral e afastado da base melhorada com cal. Nesta tabela “N/A” significa não aplicável.

Na camada subjacente ao solo da base melhorado quimicamente, camada de migração, observou-se, que o pH em H₂O, apresentou valores mais próximos ao da camada de base no furo central (8,13) do que o valor encontrado no furo lateral (7,60). Também no subleito, o pH em H₂O do furo central (6,64) ficou levemente menor que o pH em H₂O do furo lateral (6,93), indicando uma migração superior nas laterais.

Ao analisar o solo profundo e o solo mais afastado foi observado, para ambas as amostras, que o pH em H₂O lido foi de 7,21, indicando que, a 55cm de profundidade da camada melhorada com cal e a 3m de distância é percebida a migração química, pois foi observado variação significativa do pH para os pontos 1 e 2 ao se comparar com o solo de referência. Esta migração ocorreu em solos compactados, que possivelmente apresentam coeficiente de permeabilidade baixo em condição saturada, porém atuação significativa da sucção na condição não saturada.

Em relação ao Ponto 02 observou-se que o pH em H₂O encontrado no centro da camada de base (8,19) foi ligeiramente menor que o valor encontrado na camada lateral (8,52). Tal comportamento é semelhante ao observado no Ponto 01, porém ocorrendo de uma maneira mais acentuada.

Tabela 4.16 – pH em H₂O – Furos Lateral, Central e Afastado

| pH H ₂ O | | | | | | | |
|---------------------|----------|-------------|-------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Ponto 01 | | | | | | | |
| Camada | Ref. (1) | Central (2) | Lateral (3) | Afastado (4) | Δ pH'(1-2) | Δ pH'(2-3) | Δ pH'(3-4) |
| Ba | 12,78 | 8,31 | 8,34 | N/A | 4,47 | -0,03 | N/A |
| Mi | 5,30 | 8,13 | 7,60 | N/A | -2,83 | 0,53 | N/A |
| Sl | 5,30 | 6,64 | 6,93 | N/A | -1,34 | -0,29 | N/A |
| SP | 5,30 | N/A | 7,21 | 7,21 | N/A | N/A | 0,00 |
| Ponto 02 | | | | | | | |
| Camada | Ref. (1) | Central (2) | Lateral (3) | Afastado (4) | Δ pH'(1-2) | Δ pH'(2-3) | Δ pH'(3-4) |
| Ba | 12,78 | 8,19 | 8,52 | N/A | 4,59 | -0,33 | N/A |
| Mi | 5,30 | 7,68 | 7,44 | N/A | -2,38 | 0,24 | N/A |
| Sl | 5,30 | 7,21 | 6,78 | N/A | -1,91 | 0,43 | N/A |
| SP | 5,30 | N/A | 6,76 | 7,05 | N/A | N/A | -0,29 |
| Ponto 03 | | | | | | | |
| Camada | Ref. (1) | Central (2) | Lateral (3) | Afastado (4) | Δ pH'(1-2) | Δ pH'(2-3) | Δ pH'(3-4) |
| Ba | 12,78 | 8,43 | 8,45 | N/A | 4,35 | -0,02 | N/A |
| Mi | 5,30 | 7,77 | 8,39 | N/A | -2,47 | -0,62 | N/A |
| Sl | 5,30 | 7,44 | 7,11 | N/A | -2,14 | 0,33 | N/A |
| SP | 5,30 | N/A | 6,72 | 5,51 | N/A | N/A | 1,21 |

Em relação a camada de migração do ponto 2, o pH em H₂O do centro (7,68) apresenta valores maiores que o pH em H₂O das laterais (7,44) o que também foi observado no Ponto 01.

Contudo, o subleito não apresentou o mesmo comportamento que no Ponto 01. O valor encontrado do pH em H₂O no centro do pavimento (7,21) foi maior que o valor encontrado na lateral (6,78).

Outro comportamento distinto do ponto 1 foi obtido para o material afastado para o qual o pH em H₂O deste material (7,05) ficou levemente superior ao valor observado na lateral da estrutura do pavimento (6,76).

Já no Ponto 03 é possível verificar que os valores do pH em H₂O da base do furo central (8,43) e do furo lateral (8,45) foram praticamente iguais.

Todavia, ao analisar a camada de migração o pH em H₂O do furo central (7,77) se aproximou mais do pH do subleito (7,44) do que do valor obtido para a base (8,43). Tal fato não ocorreu no pH em H₂O do furo lateral (8,39), que se aproximou mais da base (8,45) do que do valor encontrado no subleito (7,11). Com base nos dados citados anteriormente também é possível verificar que o pH em H₂O do furo central é levemente superior ao pH do furo lateral.

Em relação ao subleito profundo da prospecção afastada o pH em H₂O do solo (5,51)

apresentou-se próximo ao pH em H₂O do solo de referência (5,30), indicando pouca contaminação oriunda da cal usada na melhoria da base.

Com o auxílio do Software “*Statistica, V.12.0*” foram realizadas as seções transversais dos Ponto 01, Ponto 02 e Ponto 03, curvas que identificam os valores de pH por faixa de cor. Estas curvas “*Isohidrogeniônicas*” ou “*IsopH*” elucidam como a distribuição do pH se encontra na seção transversal do terreno. Para melhor elucidação e simplificar as condições de contorno os valores foram espelhados adotando-se como referência o eixo do centro do pavimento de modo a se ter uma representação simétrica da distribuição dos valores de pH.

Não foi considerada a inclinação do terreno na elaboração da seção transversal. Para a modelagem numérica e estatística foi adotado como condição de contorno o pH do solo de referência. Os valores da base e do subleito profundo foram situados nas cotas de profundidade 0 e 70 cm, respectivamente. Os demais valores foram posicionados no meio de cada camada. Também foi adicionado elemento gráfico que representa o revestimento do pavimento, assim como as linhas que dividem as camadas ensaiadas. Na Figura 4.20 apresenta-se a distribuição do pH em H₂O do Ponto 01 (a), Ponto 02 (b) e Ponto 03 (c).

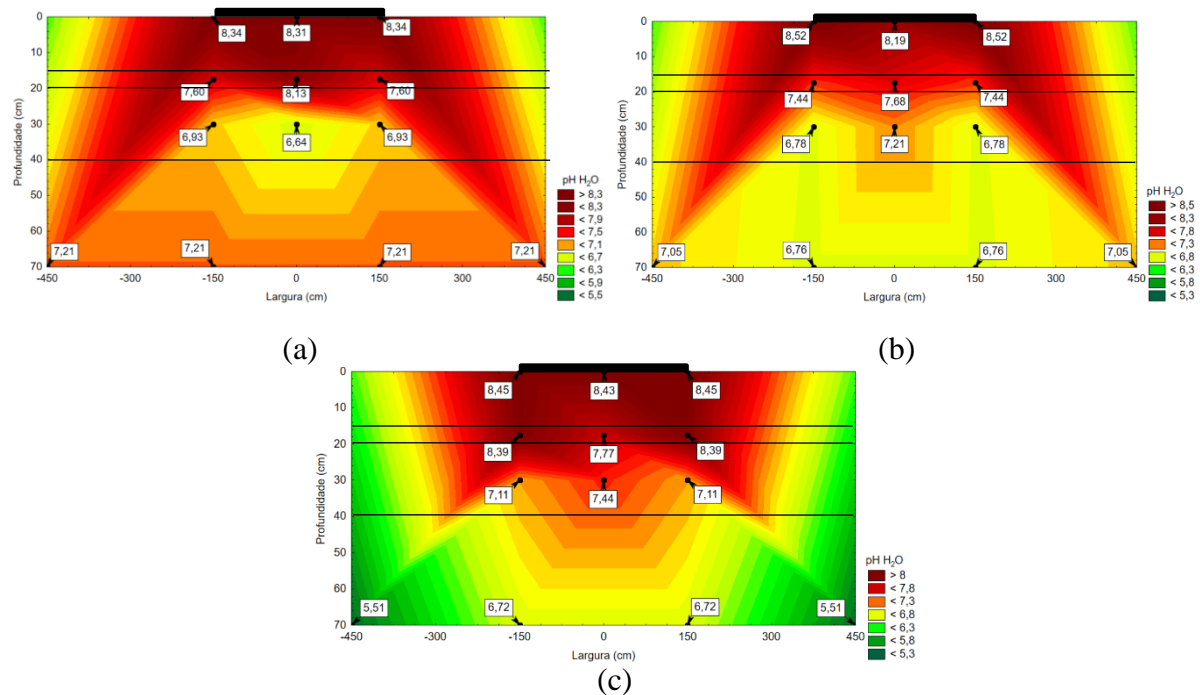


Figura 4.20 – Distribuição pH em H₂O: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c).

Na Tabela 4.17 é apresentado o pH em KCl dos furos Lateral (Lat.), Central (Centr.) e Afastado (Afast.) do Ponto 01, Ponto 02 e Ponto 03. Assim como observado para o pH em H₂O

o comportamento da distribuição do pH ficou semelhante.

Tabela 4.17 – pH em KCl – Furos Lateral, Central e Afastado

| pH KCl | | | | | | | |
|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|---|---|---|
| Ponto 01 | | | | | | | |
| Camada | pH Ref. (1) | Centr. (2) | Lat. (3) | Afast. (4) | $\Delta \text{pH}'_{(1-2)}$ | $\Delta \text{pH}'_{(2-3)}$ | $\Delta \text{pH}'_{(3-4)}$ |
| Ba | 12,09 | 8,15 | 8,22 | N/A | 3,94 | -0,07 | N/A |
| Mi | 4,85 | 8,01 | 7,06 | N/A | -2,71 | 0,95 | N/A |
| Sl | 4,85 | 6,08 | 6,41 | N/A | -0,78 | -0,33 | N/A |
| SP | 4,85 | N/A | 6,63 | 6,75 | N/A | N/A | -0,12 |
| Ponto 02 | | | | | | | |
| Camada | pH Ref. (1) | Centr. (2) | Lat. (3) | Afast. (4) | $\Delta \text{pH}'_{(1-2)}$ | $\Delta \text{pH}'_{(2-3)}$ | $\Delta \text{pH}'_{(3-4)}$ |
| Ba | 12,09 | 7,98 | 8,30 | N/A | 4,11 | -0,32 | N/A |
| Mi | 4,85 | 7,52 | 6,84 | N/A | -2,71 | 0,68 | N/A |
| Sl | 4,85 | 6,65 | 6,44 | N/A | -0,78 | 0,21 | N/A |
| SP | 4,85 | N/A | 6,28 | 6,20 | N/A | N/A | 0,08 |
| Ponto 03 | | | | | | | |
| Camada | pH Ref. (1) | Centr. (2) | Lat. (3) | Afast. (4) | $\Delta \text{pH}'_{(1-2)}$ | $\Delta \text{pH}'_{(2-3)}$ | $\Delta \text{pH}'_{(3-4)}$ |
| Ba | 12,09 | 8,34 | 8,31 | N/A | 3,75 | 0,03 | N/A |
| Mi | 4,85 | 7,44 | 8,24 | N/A | -2,71 | -0,80 | N/A |
| Sl | 4,85 | 6,79 | 6,60 | N/A | -0,78 | 0,19 | N/A |
| SP | 4,85 | N/A | 5,37 | 5,28 | N/A | N/A | 0,09 |

No Ponto 03 o pH em KCl da base (8,34) e do furo lateral (8,31), assim como no pH em H₂O, também apresentaram valores bem próximos, indicando homogeneidade da camada.

Também foi elaborada graficamente a distribuição do pH em KCl em relação à seção transversal sendo os resultados apresentados na Figura 4.21 considerando-se a distribuição do pH em KCl do Ponto 01 (a), Ponto 02 (b) e Ponto 03 (c).

Na Tabela 4.18 estão apresentados os PCZ dos solos, baseados na formulação de Keng e Uehara (1974). Como os valores do pH em H₂O são superiores ao PCZ as amostras analisadas apresentam capacidade de troca de cátions e que os valores do PCZ decrescem com o aumento da profundidade, com exceção do Ponto 01.

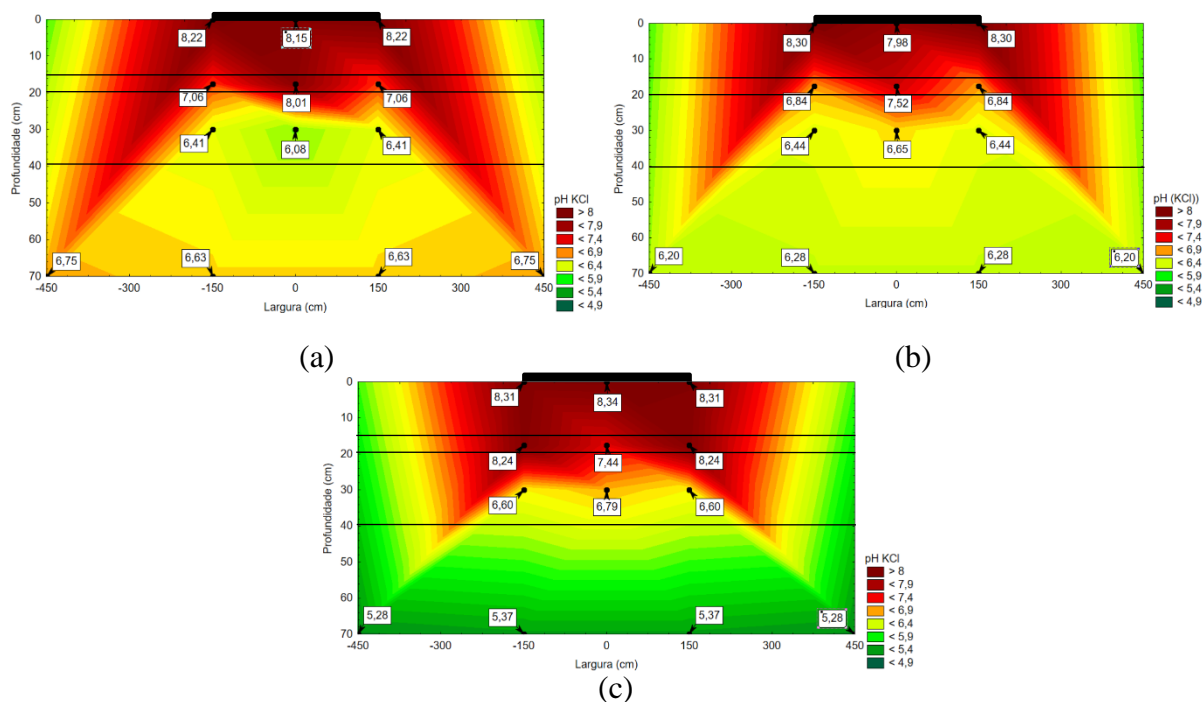


Figura 4.21 – Distribuição pH em KCl: Ponto 01 (a); Ponto 02 (b); Ponto 03 (c).

Tabela 4.18 – PCZ calculados – Furos Lateral, Central e Afastado

| Ponto 01 | | | |
|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Camada | PCZ Central | PCZ Lateral | PCZ Afastado |
| Ba | 7,99 | 8,10 | N/A |
| Mi | 7,89 | 6,52 | N/A |
| Sl | 5,52 | 5,89 | N/A |
| SP | N/A | 6,05 | 6,29 |
| Ponto 02 | | | |
| Camada | PCZ Central | PCZ Lateral | PCZ Afastado |
| Ba | 7,77 | 8,08 | N/A |
| Mi | 7,36 | 6,24 | N/A |
| Sl | 6,09 | 6,10 | N/A |
| SP | N/A | 5,80 | 5,35 |
| Ponto 03 | | | |
| Camada | PCZ Central | PCZ Lateral | PCZ Afastado |
| Ba | 8,25 | 8,17 | N/A |
| Mi | 7,11 | 8,09 | N/A |
| Sl | 6,14 | 6,09 | N/A |
| SP | N/A | 4,02 | 5,05 |

b) Análise granulométrica

Assim como no item 4.12.1 foram determinadas as curvas granulométricas das amostras coletadas na seção transversal. A Figura 4.22 apresenta as curvas granulométricas do Ponto 01 sem o uso do defloculante determinadas para os furos central (C), lateral (L) e afastado (A).

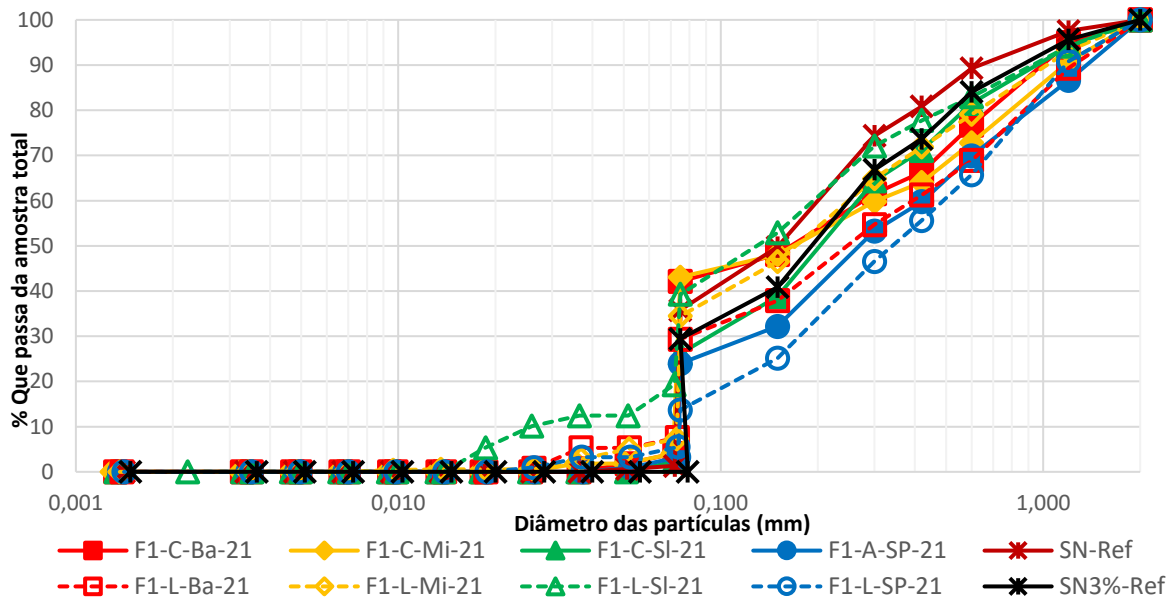


Figura 4.22 – Curvas granulométricas do Ponto 01 sem o uso do defloculante.

Em relação a fração fina observa-se em destaque a maior presença de material siltoso nas laterais do que no centro indicando uma possível aglutinação da fração fina mais eficaz no centro do pavimento. Na fração grossa da camada de base verifica-se que a aglutinação das partículas foi maior no centro do que na lateral.

A Tabela 4.19 apresenta a variação granulométrica ao longo da seção transversal do Ponto 01 sem o uso do defloculante transcrevendo-se numericamente as curvas granulométricas apresentadas na Figura 4.22. Esta análise também tem por foco avaliar a variação granulométrica ao longo da profundidade e, conseqüentemente se é identificável a influência da cal nas demais camadas do solo. Três fatores impactam nos resultados tornando difícil concluir sobre a influência da cal na alteração granulométrica do solo tanto transversalmente como na vertical: a variabilidade do solo; a variação do impacto da cal segundo o solo; a influência das condições de drenagem na migração de elementos e compostos químicos da cal intervenientes na granulometria.

Tabela 4.19 – Variação granulométrica transversal sem o uso do defloculante – Ponto 01

| Base | | | | Migração | | |
|--------------|----------------------|--------------------|--|----------------------|--------------------|--|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 23,27 | 31,09 | -7,81 | 27,15 | 20,88 | 6,27 |
| AM | 24,13 | 25,42 | -1,29 | 20,84 | 26,45 | -5,62 |
| AF | 49,83 | 37,34 | 12,49 | 49,19 | 46,72 | 2,46 |
| St | 2,77 | 6,15 | -3,38 | 2,83 | 5,94 | -3,12 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 2,77 | 6,15 | -3,38 | 2,83 | 5,94 | -3,12 |

| Subleito | | | | Subleito Profundo | | |
|-----------------|----------------------|--------------------|--|--------------------------|----------------------|--|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Lat.(1) (%) | Afast.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 18,44 | 16,98 | 1,46 | 34,23 | 30,04 | 4,19 |
| AM | 34,23 | 23,72 | 10,51 | 33,48 | 30,73 | 2,75 |
| AF | 46,35 | 44,03 | 2,32 | 28,23 | 37,48 | -9,25 |
| St | 0,98 | 15,27 | -14,28 | 4,06 | 1,75 | 2,31 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 0,98 | 15,27 | -14,28 | 4,06 | 1,75 | 2,31 |

Em relação às mudanças da camada de base para a de migração e tendo como referência o furo central foi observado uma certa homogeneidade no centro da camada, pois a variação granulométrica não foi significativa. Ela se tornou praticamente estável na fração areia fina (49,83% na base e 49,19% na migração), um pequeno aumento na fração areia média na camada de base (24,13%) contra 24,84% na camada de migração, mas em relação a fração areia grossa a camada de base apresentou 24,13% em comparação aos 27,15% da fração areia fina.

Analisando e comparando a camada de migração do furo central com a prospecção lateral, verificou-se que o furo central houve um aumento de 6,27% na fração de areia grossa.

Em relação ao subleito a ação de aglutinação ocorreu de maneira mais efetiva no centro do pavimento, pois houve um aumento de 1,46% na fração areia grossa, 10,51% na fração areia média e 2,32% na fração areia fina.

Mesmo estando a 3m distância da lateral da estrutura do pavimento o subleito profundo afastado apresentou um comportamento semelhante ao solo contido na lateral do pavimento, pois a fração areia grossa ficou 4,19% menor, assim como a fração areia média ficou 2,75% menor, que a prospecção lateral.

Analisando a variação granulométrica da camada de migração para o subleito e no subleito profundo identificou-se uma redução da fração de areia grossa na camada de migração de 27,15% para 18,44% no subleito, mas uma elevação para 34,23%. Tal comportamento foi

identificado também no pH do solo em que o pH decaiu da migração para o subleito, mas aumentou do subleito para o subleito profundo.

Cabe ressaltar que em nenhuma das amostras ensaiadas em 2021 no Ponto 01 sem o uso do defloculante identificou-se frações dos solos com diâmetros equivalentes a argila, demonstrando que o solo apresenta flocos bem aglutinados.

Analisando a variação granulométrica sem o uso do defloculante por meio das curvas de sedimentação do Ponto 02 (Figura 4.23) observa-se também que a fração argila não foi identificada em nenhum furo e em nenhuma camada e que a fração grossa da camada de base, assim como no Ponto 01, foi mais aglutinada no centro do pavimento do que na lateral.

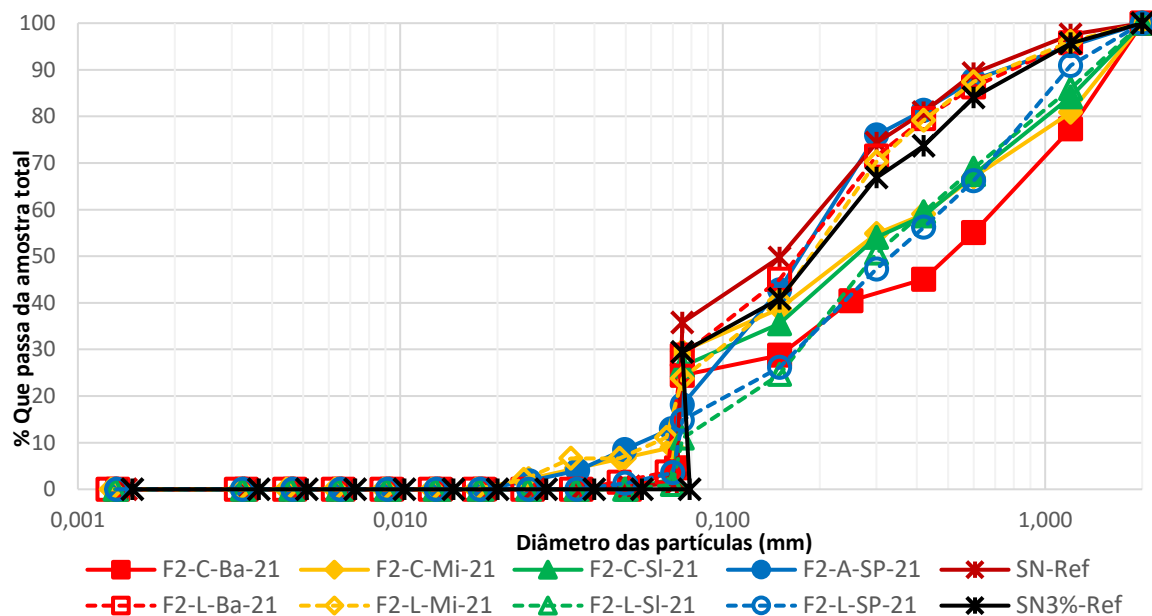


Figura 4.23 – Curvas granulométricas do Ponto 02 sem o uso do defloculante

Transcrevendo os dados das curvas granulométricas da Figura 4.23 em faixas estabelecidas por tipologia de solo, na Tabela 4.20 é possível verificar o poder aglutinador da cal na camada de base foi mais acentuado que na lateral, pois ao comparar o material do centro do pavimento com a lateral houve um aumento de 31,26% na fração da areia grossa, o que faz com que o centro da camada de base representasse 44,92% deste material.

Comparando também a variação da fração areia grossa em relação as camadas e adotando como referência o furo central observou-se comportamento semelhante ao Ponto 01. A camada de base apresenta 44,92%, que reduz para 33,00% na camada de migração, reduz

levemente para 32,48% no subleito e tem uma leve elevação para 33,78% no subleito profundo.

Tabela 4.20 – Variação granulométrica transversal sem o uso do defloculante – Ponto 02

| Term. | Base | | | Migração | | |
|---------|---------------|-------------|------------------------|---------------|-------------|------------------------|
| | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| G | 44,92 | 13,66 | 31,26 | 33,00 | 12,57 | 20,43 |
| AM | 20,48 | 32,51 | -12,03 | 22,90 | 37,07 | -14,17 |
| AF | 32,69 | 50,93 | -18,24 | 36,17 | 40,87 | -4,70 |
| St | 1,91 | 2,90 | -0,99 | 7,93 | 9,49 | -1,56 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 1,91 | 2,90 | -0,99 | 7,93 | 9,49 | -1,57 |

| Term. | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
|---------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Lat.(1) (%) | Afast.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 32,48 | 31,12 | 1,36 | 33,78 | 12,15 | 21,63 |
| AM | 25,82 | 35,56 | -9,75 | 33,04 | 33,99 | -0,95 |
| AF | 40,62 | 32,81 | 7,82 | 30,75 | 42,99 | -12,24 |
| St | 1,08 | 0,51 | 0,57 | 2,43 | 10,87 | -8,44 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 1,08 | 0,51 | 0,57 | 2,43 | 10,87 | -8,44 |

Em relação à camada de migração a cal também teve uma ação mais aglutinadora no centro. A presença de 33,00% da fração de areia grossa no centro do pavimento, face aos 12,57% da fração de areia grossa encontrada na lateral do pavimento justifica este pensamento.

Já a camada de subleito apresentou uma agregação maior na lateral. Apesar da fração areia grossa da ter ficado próximas tanto no centro (32,48%) quanto na lateral (31,12%) a fração areia média da lateral (35,56%) ficou mais representativa que no centro (25,82%).

Ao analisar as curvas granulométricas do Ponto 03 sem o uso do defloculante (Figura 4.24) percebe-se visualmente, assim como nos Pontos 01 e 02 a não presença da fração argila.

A Tabela 4.21 apresenta a variação granulométrica das camadas constituintes do Ponto 03 sem o uso do defloculante.

Na camada de base identificou-se que a fração areia grossa do furo central (23,02%) é maior que o furo lateral (15,07%). Tal comportamento é identificado também na camada de migração com 34,42% no furo central e 19,56% no furo lateral e no subleito profundo (32,55% na camada central e 23,84% na lateral).

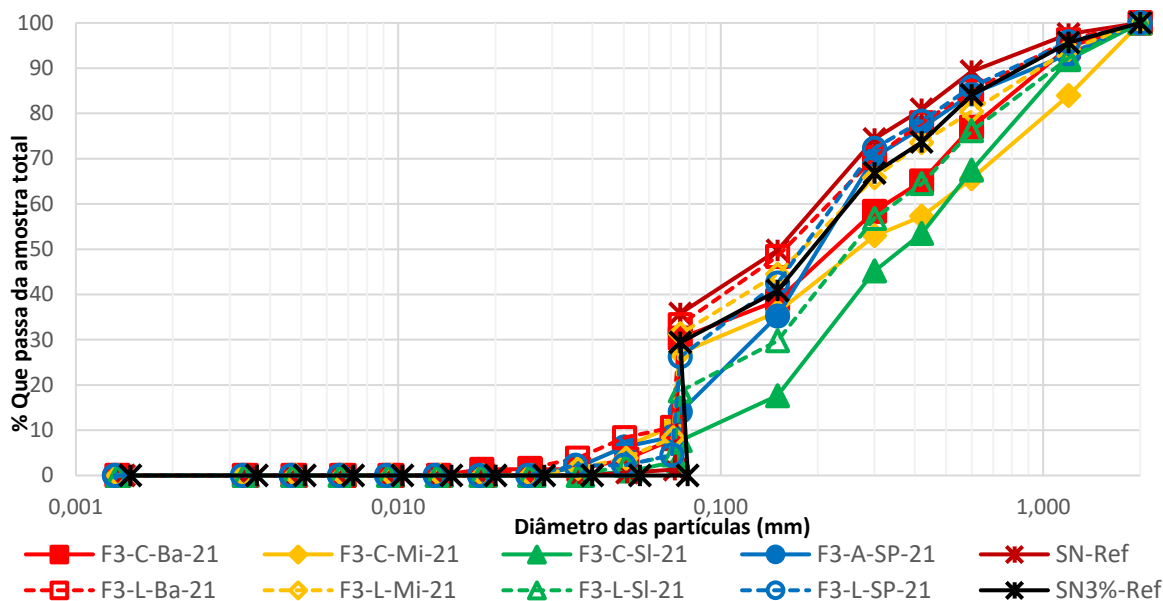


Figura 4.24 – Curvas granulométricas do Ponto 03 sem o uso do defloculante

Tabela 4.21 – Variação granulométrica transversal sem o uso do defloculante – Ponto 03

| | Base | | | Migração | | |
|---------|---------------|-------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta(1)-(2)$ (%) | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta(1)-(2)$ (%) |
| AG | 23,02 | 15,07 | 7,95 | 34,42 | 19,56 | 14,86 |
| AM | 31,76 | 29,25 | 2,51 | 23,83 | 28,84 | -5,01 |
| AF | 39,63 | 46,26 | -6,63 | 33,25 | 45,74 | -12,50 |
| St | 5,59 | 9,42 | -3,83 | 8,50 | 5,86 | 2,64 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 5,59 | 9,42 | -3,83 | 8,50 | 5,86 | 2,64 |
| | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta(1)-(2)$ (%) | Lat.(1) (%) | Afast.(2) (%) | $\Delta(1)-(2)$ (%) |
| AG | 32,55 | 23,84 | 8,71 | 14,13 | 15,67 | -1,54 |
| AM | 40,64 | 37,39 | 3,25 | 33,44 | 37,38 | -3,94 |
| AF | 25,04 | 35,48 | -10,45 | 49,09 | 39,57 | 9,52 |
| St | 1,77 | 3,29 | -1,52 | 3,34 | 7,38 | -4,04 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| St + Ar | 1,77 | 3,29 | -1,52 | 3,34 | 7,38 | -4,04 |

Analisando a variação da granulometria ao longo das camadas do Ponto 03 e com foco na fração de areia grossa verificou-se que no furo central o material permanece mais aglutinado. Na camada de base, comparando com o furo lateral a proporção no centro é de 23,02% contra 15,07% na lateral, assim como na camada de migração apresenta 34,42% contra 19,56% na lateral e no subleito o centro tem 32,55% da fração areia grossa contra 23,84% no furo lateral.

Este mesmo comportamento é identificado nos Pontos 01 e 02 o que pode afirmar que a aglutinação do material constante no centro do pavimento é maior que na sua lateral.

Na Figura 4.25 estão representadas as curvas granulométricas do Ponto 01 com o uso do defloculante e pode ser observado que todas as curvas apresentam o mesmo padrão comportamental, principalmente analisando a fração grossa (diâmetros maiores que 0,074 mm). Tal semelhança indica que os solos apresentam certa estabilidade estrutural em campo.

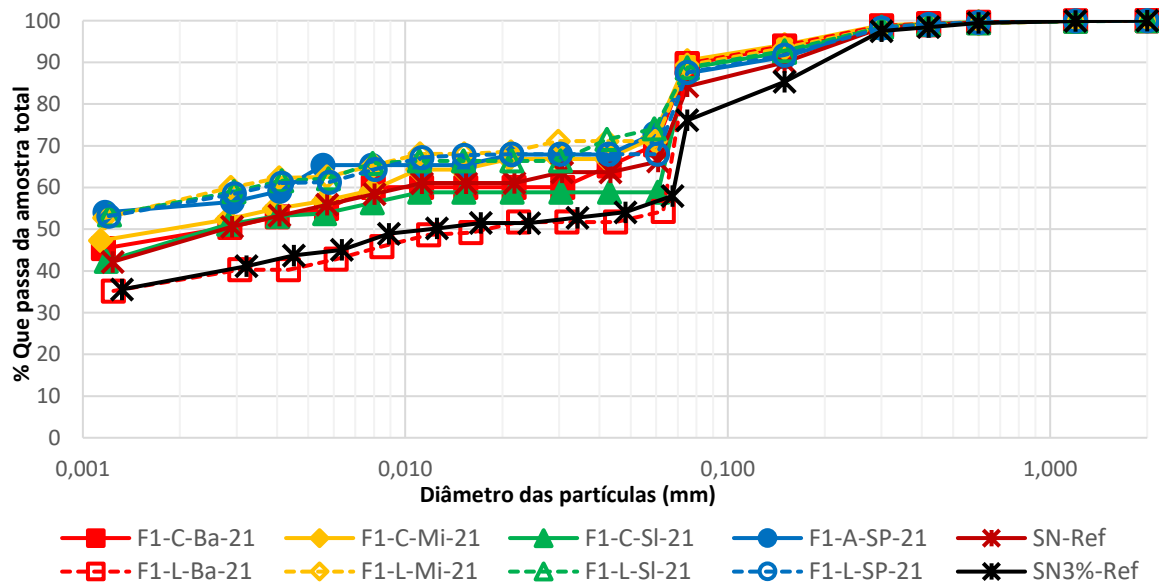


Figura 4.25 – Curvas granulométricas do Ponto 01 com o uso do defloculante

Os dados obtidos do ensaio de sedimentação com o uso de defloculante pode ser notado na Tabela 4.22, no qual foi observada a variação por faixas granulométricas.

Comparando a camada de base das prospecções central e lateral as faixas granulométrica ficaram bem próximas, destacando-se o 16,92% a mais na prospecção lateral da fração areia fina, comparando com o furo central.

Observado a variação granulométrica ao longo da profundidade e utilizando como referência o furo central foi identificado, mesmo que de maneira discreta o mesmo comportamento do solo que foi obtido no pH. A fração areia grossa da base representa 0,43% do solo, reduz para 0,32% na camada de migração, para 0,29% no subleito e aumenta para 0,43% no subleito profundo.

Na camada de migração o comportamento das frações granulométricas da prospecção lateral e da central foram praticamente idênticos. Entre eles houve variações de 0,33% na fração

de areia grossa, 0,38% na fração de areia média, 1,32% na fração areia fina e 2,03% na fração silte+argila.

Tabela 4.22 – Variação granulométrica transversal com o uso do defloculante – Ponto 01

| Base | | | | Migração | | |
|--------------|----------------------|--------------------|--|----------------------|--------------------|--|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 0,43 | 0,38 | 0,04 | 0,32 | 0,65 | -0,33 |
| AM | 4,24 | 4,03 | 0,21 | 3,88 | 4,27 | -0,38 |
| AF | 24,80 | 41,72 | -16,92 | 22,30 | 23,62 | -1,32 |
| St | 22,60 | 15,67 | 6,93 | 23,80 | 15,00 | 8,80 |
| Ar | 47,93 | 38,19 | 9,74 | 49,70 | 56,47 | -6,77 |
| St + Ar | 63,69 | 64,51 | -0,82 | 73,50 | 71,47 | 2,03 |

| Subleito | | | | Subleito Profundo | | |
|-----------------|----------------------|--------------------|--|--------------------------|----------------------|--|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Lat.(1) (%) | Afast.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 0,29 | 0,49 | -0,19 | 0,43 | 0,40 | 0,03 |
| AM | 5,22 | 4,83 | 0,39 | 5,66 | 5,98 | -0,32 |
| AF | 35,60 | 19,87 | 15,73 | 25,90 | 20,16 | 5,74 |
| St | 12,07 | 18,34 | -6,26 | 11,97 | 18,09 | -6,12 |
| Ar | 46,81 | 56,48 | -9,66 | 56,04 | 55,37 | 0,67 |
| St + Ar | 58,88 | 74,81 | -15,93 | 68,02 | 73,46 | -5,44 |

Analisando o subleito percebeu-se que a fração areia fina no centro do pavimento é 15,73% maior que na lateral do mesmo, assim como que no subleito profundo a há 5,74% a mais de areia fina que no solo mais afastado.

Observando a variação granulométrica com o uso do defloculante por meio das curvas de sedimentação (Figura 4.26) observa-se que o comportamento das curvas granulométricas está similar ao observado no Ponto 01.

A Tabela 4.23 apresenta os valores das curvas granulométricas obtidas do ensaio de sedimentação com o uso do defloculante do Ponto 02.

Assim como observado no Ponto 01 o ganho de aglutinação causado pela cal na camada central do pavimento foi levemente maior no que observado no furo lateral. Houve um aumento da fração de areia grossa de 0,10%, uma redução de 0,78% da fração silte+argila.

A camada de migração apresentou valores próximos tanto lateral quanto no centro do pavimento, sendo que no centro os valores apresentam uma melhor aglutinação, pois no centro encontrou-se 2,79% a menos de fração argila e um aumento de 3,14% na fração silte, além de uma diferença de 0,21% a mais da fração de areia grossa.

Verificando a alteração da fração fina ao longo da profundidade identificou-se uma

redução gradativa da fração argila. Analisando da camada mais profunda e mais longe da camada melhorada com cal verificou-se que no subleito profundo a fração argila correspondia a 47,34%. No subleito este valor elevou-se para 54,14%, mas na camada de migração reduziu-se novamente para 51,75% e na camada de base apresentou com 44,99%.

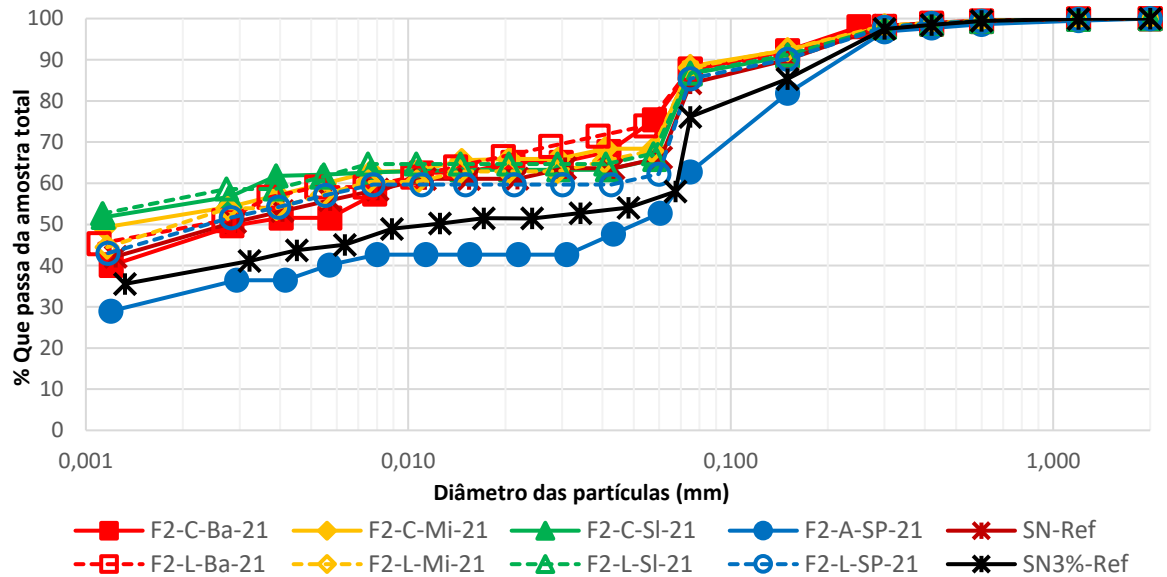


Figura 4.26 – Curvas granulométricas do Ponto 02 com o uso do defloculante

Tabela 4.23 – Variação granulométrica transversal com o uso do defloculante – Ponto 02

| Term. | Base | | | Migração | | |
|---------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 0,66 | 0,56 | 0,10 | 0,73 | 0,52 | 0,21 |
| AM | 4,23 | 5,81 | -1,58 | 4,98 | 5,06 | -0,08 |
| AF | 18,22 | 15,96 | 2,26 | 23,35 | 23,13 | 0,22 |
| St | 31,90 | 29,90 | 2,00 | 19,19 | 22,33 | -3,14 |
| Ar | 44,99 | 47,77 | -2,78 | 51,75 | 48,96 | 2,79 |
| St + Ar | 76,89 | 77,67 | -0,78 | 70,94 | 71,30 | -0,36 |
| Term. | Subleito | | | Subleito Profundo | | |
| | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Lat.(1) (%) | Afast.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) |
| AG | 0,69 | 0,65 | 0,04 | 0,66 | 1,38 | -0,71 |
| AM | 6,05 | 5,92 | 0,13 | 6,60 | 11,76 | -5,16 |
| AF | 25,20 | 23,51 | 1,69 | 30,23 | 34,28 | -4,05 |
| St | 13,91 | 14,54 | -0,62 | 15,17 | 19,56 | -4,39 |
| Ar | 54,14 | 55,38 | -1,24 | 47,34 | 33,02 | 14,32 |
| St + Ar | 68,05 | 69,91 | -1,86 | 62,50 | 52,58 | 9,93 |

Também no subleito houve pouca variação entre o observado no centro do pavimento e

na lateral. Comparando entre eles, no centro do pavimento houve um aumento de 0,04% na areia grossa, 0,13% na areia média e 1,69% na areia fina, e consequentemente, a redução da fração silte+argila em 1,86%.

No subleito afastado, comparando com a prospecção lateral, houve uma redução de 14,32% da fração argila, aumentando consequentemente todas as outras frações.

A Figura 4.27 apresenta as curvas granulométricas com o uso do defloculante do Ponto 03. Visualmente pode ser observado que as amostras do subleito profundo lateral e afastado se destacam das demais curvas indicando uma possível mudança do comportamento granulométrico do material que apresenta reduzida fração de finos (argila e silte),

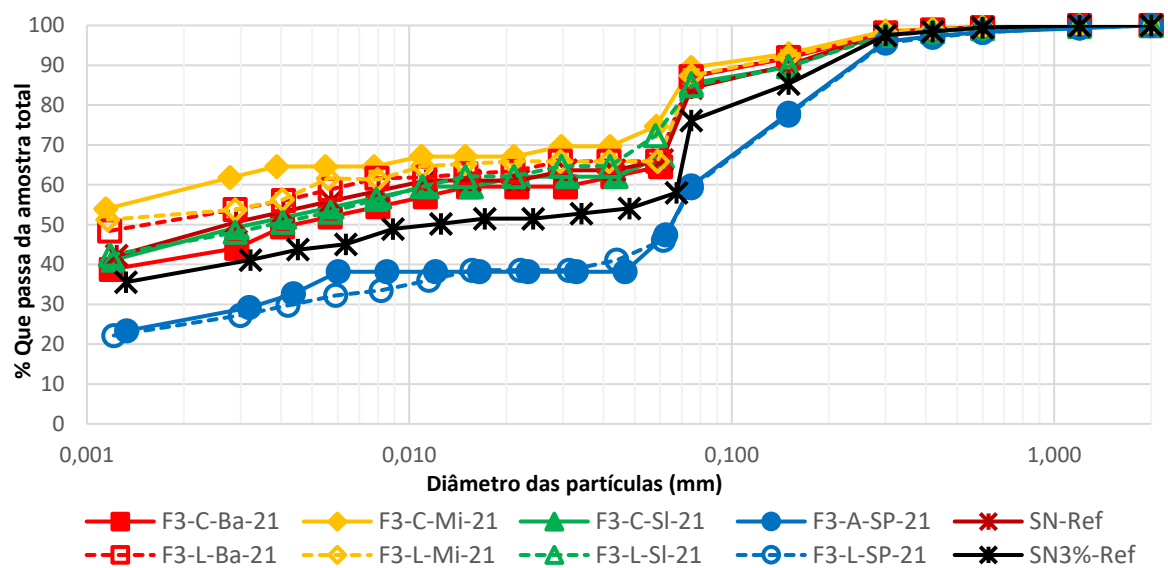


Figura 4.27 – Curvas granulométricas do Ponto 03 com o uso do defloculante

Analisando os dados da Tabela 4.24, que consta a variação granulométrica transversal com o uso do defloculante do Ponto 03, observa-se que lateralmente as prospecções realizadas no furo lateral apresentam frações de areia grossa maiores que no furo central, fato observado também no Ponto 01.

Tanto a camada de base do furo central quanto a do furo lateral apresentaram valores muito próximos indicando uma homogeneidade no material.

Já na camada de migração os valores encontrados apontam uma maior efetividade de aglutinação na camada lateral, pois comparando com o furo central a redução da fração silte+argila do furo lateral foi de 8,76%.

Não foi identificado um padrão migratório com o uso do defloculante, pois os valores

variaram pouco entre as camadas.

Tabela 4.24 – Variação granulométrica transversal com o uso do defloculante – Ponto 03

| Base | | | | Migração | | | |
|---------|---------------|-------------|------------------------|---------------|-------------|------------------------|--|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | |
| AG | 0,53 | 0,64 | 0,07 | 0,41 | 0,53 | -0,11 | |
| AM | 5,54 | 5,38 | 0,29 | 4,76 | 5,28 | -0,52 | |
| AF | 29,35 | 26,62 | 5,01 | 18,69 | 26,82 | -8,13 | |
| St | 22,97 | 16,16 | 3,76 | 18,45 | 14,86 | 3,59 | |
| Ar | 41,60 | 51,20 | -9,14 | 57,69 | 52,52 | 5,17 | |
| St + Ar | 64,58 | 67,36 | -5,38 | 76,14 | 67,38 | 8,76 | |

| Subleito | | | | Subleito Profundo | | | |
|----------|---------------|-------------|------------------------|-------------------|---------------|------------------------|--|
| Term. | Centr.(1) (%) | Lat.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | Lat.(1) (%) | Afast.(2) (%) | $\Delta_{(1)-(2)}$ (%) | |
| AG | 0,56 | 0,78 | -0,22 | 1,74 | 1,67 | 0,06 | |
| AM | 7,03 | 6,92 | 0,11 | 14,72 | 14,35 | 0,37 | |
| AF | 25,54 | 18,47 | 7,07 | 37,81 | 37,95 | -0,14 | |
| St | 21,33 | 28,50 | -7,17 | 20,73 | 18,92 | 1,82 | |
| Ar | 45,54 | 45,33 | 0,21 | 24,99 | 27,10 | -2,11 | |
| St + Ar | 66,87 | 73,83 | -6,96 | 45,72 | 46,02 | -0,29 | |

c) Resumo do estudo de transversal

Apresenta-se a seguir, de maneira resumida, os principais fatos identificados em relação à análise espacial:

- Foi identificado nos pontos estudados uma redução gradativa do pH quando se aprofundava as camadas, exceto no subleito profundo que foi identificado um aumento dos valores de pH encontrados;
- No Ponto 01 as ligações químicas resistentes ao uso do defloculante não foram identificadas substancialmente no subleito profundo afastado;
- Nas curvas de sedimentação sem o uso do defloculante não foi observada fração de argila nas amostras.
- Sem o uso do defloculante é verificado ganhos significativos na granulometria do material, apresentando grandes crescimentos na fração de areia, destacando-se o aumento do percentual da fração de areia grossa;
- Nos pontos ao se analisar a variação granulométrica sem o uso do defloculante identificou-se um decréscimo proporcional da fração areia grossa à medida que se afastava da camada melhorada com cal, indicando a influência direta da cal na

aglutinação do solo;

- Com o uso de defloculante o furo central e o lateral apresentam curvas granulométricas semelhantes. No entanto, observa-se reduções das frações silte + argila e creditando esta mudança à reação química da cal com o solo.

4.12.3 Caracterização química em laboratório

A caracterização química foi elaborada nas amostras do Ponto 01, na qual foram extraídos os teores dos íons Cálcio, Magnésio, Potássio, Sódio e Alumínio em mE/100mL a CTC e a Saturação das bases. A análise também foi dividida em variação temporal (2020 x 2021), variação espacial e do solo natural extraído da caixa de empréstimo.

a) Análise temporal

A Tabela 4.25 apresenta os resultados encontrados para os íons cálcio, magnésio potássio e sódio nas amostras laterais coletadas nos anos de 2020 e 2021.

Não foi identificada a presença de cátions alumínio em nenhuma amostra. A presença destes cátions tem como objetivo identificar o potencial de trocas de cátions do solo estabilizado quimicamente, sendo dada mais ênfase a presença dos íons cálcio e magnésio.

A predominância dos íons cálcio e magnésio face aos íons potássio e sódio indicam segundo Prado (2016 atualizado 2022), que o solo apresenta íons que tendem mais a aglutinar o solo do que dispersar, corroborando o pensamento apresentado sobre a possível aglutinação do solo pela cal.

Também foi identificado que, ao se acrescentar a cal no solo os teores de íons de cálcio e magnésio se mantiveram altos após passados 4 anos da execução da obra sendo identificada a presença destes íons em todas as camadas, reforçando o entendimento que há uma migração química da camada melhorada com cal para as camadas subjacentes.

Assim como houve um aumento do pH da camada de subleito profundo, conforme Figura 4.12 (a) e Figura 4.13 (a) também houve um aumento dos íons de cálcio e magnésio. Cabe destacar que se considerou como valor de referência os resultados obtidos para o material coletado na jazida, motivo pelo qual ele se repete ao longo do perfil.

A Tabela 4.26 apresenta a capacidade de troca catiônica do solo, que é a soma dos cátions trocáveis, e a porcentagem de saturação do solo.

Tabela 4.25 – Íons de Cálcio, Magnésio, Potássio, Sódio e Alumínio (mE/100mL) – Ponto 01, em 2020 e 2021

| Camada | Ref. Ca₍₁₎ | Ca 2020₍₂₎ | Ca 2021₍₃₎ | ΔCa₍₁₎₋₍₂₎ | ΔCa₍₁₎₋₍₃₎ | ΔCa₍₂₎₋₍₃₎ |
|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Ba | 1,4 | 3,8 | 4,1 | -2,4 | -2,7 | 0,3 |
| Mi | 1,4 | 2,3 | 2,3 | -0,9 | -0,9 | 0,0 |
| Sl | 1,4 | 4,1 | 1,7 | -2,7 | -0,3 | -2,4 |
| SP | 1,4 | 1,8 | 2,2 | -0,4 | -0,8 | 0,4 |
| Camada | Ref. Mg₍₁₎ | Mg 2020₍₃₎ | Mg 2021₍₄₎ | ΔMg₍₁₎₋₍₂₎ | ΔMg₍₁₎₋₍₃₎ | ΔMg₍₂₎₋₍₃₎ |
| Ba | 0,4 | 0,7 | 0,7 | -0,3 | -0,3 | 0,0 |
| Mi | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,0 | -0,2 | 0,2 |
| Sl | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| SP | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,1 | 0,0 | 0,1 |
| Camada | Ref. K₍₁₎ | K 2020₍₂₎ | K 2021₍₃₎ | ΔK₍₁₎₋₍₂₎ | ΔK₍₁₎₋₍₃₎ | ΔK₍₂₎₋₍₃₎ |
| Ba | 0,05 | 0,12 | 0,14 | -0,07 | -0,09 | 0,02 |
| Mi | 0,05 | 0,07 | 0,08 | -0,02 | -0,03 | 0,01 |
| Sl | 0,05 | 0,09 | 0,03 | -0,04 | 0,02 | -0,06 |
| SP | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| Camada | Ref. Na₍₁₎ | Na 2020₍₇₎ | Na 2021₍₈₎ | ΔNa₍₁₎₋₍₂₎ | ΔNa₍₁₎₋₍₃₎ | ΔNa₍₂₎₋₍₃₎ |
| Ba | 0,03 | 0,06 | 0,06 | -0,03 | -0,03 | 0,00 |
| Mi | 0,03 | 0,04 | 0,05 | -0,01 | -0,02 | 0,01 |
| Sl | 0,03 | 0,06 | 0,03 | -0,03 | 0,00 | -0,03 |
| SP | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

(*) Não foi identificado íons de alumínio nas amostras

Tabela 4.26 – CTC (cmol_c/dm³) e Saturação por bases (%) – Ponto 01- Laboratório, em 2020 e 2021

| Camada | Ref. CTC₍₁₎ | CTC 2020₍₂₎ | CTC 2021₍₃₎ | ΔCTC₍₁₎₋₍₂₎ | ΔCTC₍₁₎₋₍₃₎ | ΔCTC₍₂₎₋₍₃₎ |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Ba | 3,6 | 6,0 | 6,4 | -2,4 | -2,8 | 0,4 |
| Mi | 3,6 | 5,0 | 4,9 | -1,4 | -1,3 | -0,1 |
| Sl | 3,6 | 6,0 | 4,3 | -2,4 | -0,7 | -1,7 |
| SP | 3,6 | 4,1 | 4,7 | -0,5 | -1,1 | 0,6 |
| Camada | Ref. Sat.₍₁₎ | Sat. 2020₍₂₎ | Sat. 2021₍₃₎ | ΔSat₍₁₎₋₍₂₎ | ΔSat₍₁₎₋₍₃₎ | ΔSat₍₂₎₋₍₃₎ |
| Ba | 44 | 78 | 78 | -34 | -34 | 0 |
| Mi | 44 | 76 | 62 | -32 | -18 | -14,0 |
| Sl | 44 | 56 | 48 | -12 | -4 | -8 |
| SP | 44 | 53 | 57 | -9 | -13 | 4 |

A capacidade de troca de cátions inferiores a 17 cmol_c/dm³ ratifica que se trata de um latossolo intemperizado e a porcentagem elevada de saturação por bases na camada de base indica a alta influência da cal na camada.

Assim como observado no subleito profundo há uma relação direta da CTC e da porcentagem de saturação de base com o aumento do seu pH.

b) Estudo da composição química transversal

Após a análise da variação dos dados comparando o ano de 2020 com o ano de 2021 será dado prosseguimento analisando-se a distribuição dos dados ao longo da seção transversal considerando-se os resultados obtidos para amostras coletadas no centro, na lateral e em ponto afastado da estrutura de pavimento.

A Tabela 4.27 apresenta os valores em mE/100 mL dos íons cálcio, magnésio, potássio e sódio distribuídos ao longo da seção transversal da via. Nesta tabela “N/A” significa não aplicável.

Tabela 4.27 – Furos central, lateral e afastado – Íons de Cálcio, Magnésio, Potássio e Sódio– Ponto 01- Laboratório

| Cálcio (mE/100 mL) | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---|
| Camada | Ref. Ca(1) | Central (1) | Lateral (2) | Afastado (3) | Δ (1)-(2) ou (2)-(3) |
| Ba | 1,4 | 3,7 | 4,1 | N/A | -0,4 |
| Mi | 1,4 | 3,7 | 2,3 | N/A | 1,4 |
| Sl | 1,4 | 1,4 | 1,7 | N/A | -0,3 |
| SP | 1,4 | N/A | 2,2 | 1,9 | 0,3 |
| Magnésio (mE/100 mL) | | | | | |
| Camada | Ref. Mg(1) | Central (1) | Lateral (2) | Afastado (3) | Δ (1)-(2) ou (2)-(3) |
| Ba | 0,4 | 1 | 0,7 | N/A | 0,3 |
| Mi | 0,4 | 0,6 | 0,6 | N/A | 0 |
| Sl | 0,4 | 0,3 | 0,3 | N/A | 0 |
| SP | 0,4 | N/A | 0,4 | 0,3 | 0,1 |
| Potássio (mE/100 mL) | | | | | |
| Camada | Ref. K(1) | Central (1) | Lateral (2) | Afastado (3) | Δ (1)-(2) ou (2)-(3) |
| Ba | 0,05 | 0,2 | 0,1 | N/A | 0,1 |
| Mi | 0,05 | 0,2 | 0,1 | N/A | 0,1 |
| Sl | 0,05 | 0 | 0 | N/A | 0 |
| SP | 0,05 | N/A | 0 | 0,1 | -0,1 |
| Sódio (mE/100 mL) | | | | | |
| Camada | Ref. Na(1) | Central (1) | Lateral (2) | Afastado (3) | Δ (1)-(2) ou (2)-(3) |
| Ba | 0,03 | 0,08 | 0,06 | N/A | 0,02 |
| Mi | 0,03 | 0,07 | 0,05 | N/A | 0,02 |
| Sl | 0,03 | 0,03 | 0,03 | N/A | 0 |
| SP | 0,03 | N/A | 0,03 | 0,04 | -0,01 |

Analisando os íons cálcio e magnésio foi identificado um decréscimo dos valores da base até o subleito profundo, indicando um fluxo migratório e um acúmulo no subleito profundo da camada lateral. Todos os valores encontrados foram superiores ou iguais ao solo de

referência.

Também pode ser observado nas quantificações do cálcio e magnésio resultados superiores aos valores obtidos para o potássio e o sódio o que confirma que o solo apresenta um comportamento predominantemente aglutinador.

O subleito profundo do furo afastado da via também apresentou uma influência da cal indicada pelos íons de cálcio em teor superior ao valor de referência.

Por fim, na Tabela 4.28 estão os valores obtidos para a CTC e saturação por bases do Ponto 01. Ao analisar a CTC do solo ao longo das camadas percebe-se um decréscimo dos valores conforme as camadas são aprofundadas, sendo observada CTC diretamente proporcional aos valores de pH em H₂O encontrados nas camadas e contidos na Tabela 4.16.

Tabela 4.28 – Furos central, lateral e afastado – CTC e Saturação por bases – Ponto 01- Laboratório

| CTC (cmol/dm³) | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--|
| Camada | Ref. CTC₍₁₎ | Central (1) | Lateral (2) | Afastado (3) | Δ₍₁₎₋₍₂₎ ou ₍₂₎₋₍₃₎ |
| Ba | 3,6 | 6,3 | 6,4 | N/A | -0,1 |
| Mi | 3,6 | 5,9 | 4,9 | N/A | 1 |
| Sl | 3,6 | 3,8 | 4,3 | N/A | -0,5 |
| SP | 3,6 | N/A | 4,7 | 4,3 | 0,4 |
| Saturação por bases (%) | | | | | |
| Camada | Ref. Sat.₍₁₎ | Central (1) | Lateral (2) | Afastado (3) | Δ₍₁₎₋₍₂₎ ou ₍₂₎₋₍₃₎ |
| Ba | 44 | 79 | 78 | N/A | 1 |
| Mi | 44 | 77 | 62 | N/A | 15 |
| Sl | 44 | 46 | 48 | N/A | -2 |
| SP | 44 | N/A | 57 | 54 | 3 |

Em relação a saturação por bases este mesmo comportamento migratório é identificado, ocorrendo também um aumento da saturação de bases na camada de subleito profundo do furo lateral, indicando que migração do hidróxido de cálcio na base impactou nas camadas subjacentes.

Também foi identificado que nenhuma camada apresentou valores inferiores aos valores de referência.

4.13 SUGESTÃO DE VERIFICAÇÃO DO TEOR DE CAL EM CAMPO POR MEIO DO pH

Ao se elaborar a curva “pH x teor de cal” é possível verificar em campo, o teor de cal

aplicado na melhoria ou na estabilização química com os resultados de pH lidos.

Diversos aparelhos de medição de pH são portáteis com autonomia de bateria que duram horas. O equipamento utilizado na pesquisa, Lucadema 210-P, apresenta mala para transporte, autonomia de operação de 8h de funcionamento e com baterias recarregáveis. A Figura 4.28 apresenta o pHmetro portátil usado para obter os resultados apresentados nesta pesquisa.



Figura 4.28 – Medidor de pH portátil

Também é possível ser adquirido no mercado pHmetros portáteis de bolso, diminuindo ainda mais o volume do equipamento a ser transportado.

Foi verificado no tópico 4.9 que as curvas de teor ótimo de cal em H₂O na umidade ótima e do material seco ao ar ficaram similares e na Figura 4.29 é possível averiguar tal proximidade. Assim, a obtenção de leituras de pH de materiais que se encontram na umidade ótima de campo é viável e permite o controle durante e após a execução da obra.

Portanto, com base na curva do teor de cal, e obtendo o pH do solo é possível identificar a porcentagem de cal efetivamente usada no trecho. A coleta deve ser realizada após a homogeneização do solo no trecho preferencialmente antes da compactação.

O DNIT, por meio das normas nº 420 – Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Base – Especificação de Serviço (2019c) e nº 421 – Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para Estabilização de camada de Sub-base – Especificação de Serviço (2019d) especificam, além do método executivo, os critérios para o controle da

execução, com base na quantidade de cal adicionada por peso ou volume. Incluir neste critério a obtenção do pH estabelecido em projeto corrobora para que se verifique a quantidade de cal efetivamente adotada durante a execução da obra.

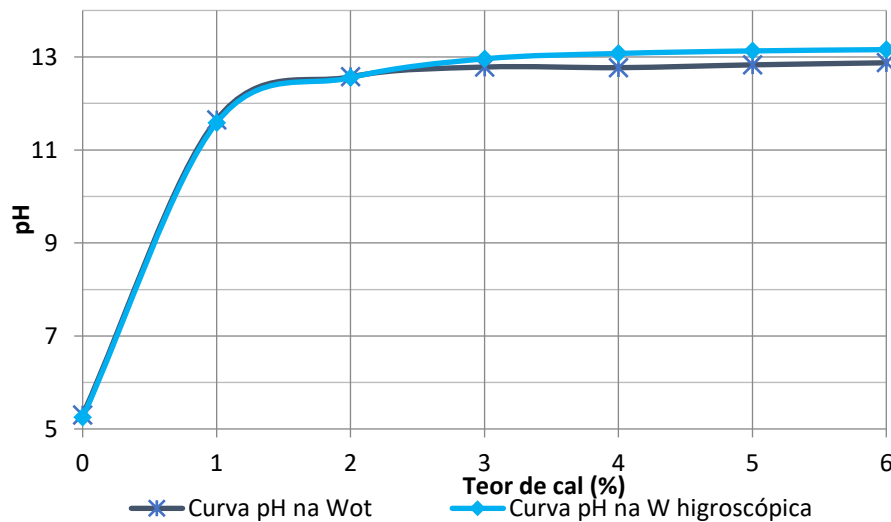


Figura 4.29 – Curva do teor de cal do pH em H₂O na umidade ótima e higroscópica

Pode ser ensaiado o material na umidade de campo, conforme apresentado na Figura 4.29 ao se considerar a umidade ótima. Caso o material apresente a formação de grumos a amostra poderá ser passada na peneira de 2,00 mm sem prejuízo das leituras, conforme os dados apresentados na Figura 4.10.

Em cada obra a frequência dos ensaios para a realização do ensaio de pH pode ser a mesma especificada na alínea “c)” do item 7.2.1, de ambas as normas citadas anteriormente, que especifica a determinação do teor de umidade da mistura a cada 50 m. A preparação das amostras pode respeitar os critérios estabelecidos no item 7 da norma DNIT n.º 419 (2019b), que é a colocação de 25 g de solo seco em 100 mL de água destilada e agitar por 30 s a cada 10 min durante 1 h.

Esta conferência trará mais segurança à equipe técnica para iniciar a compactação do trecho, pois o principal controle de qualidade da resistência adotado atualmente por esta norma, o ISC, apresenta resultados em pelo menos 4 dias após o término da execução do trecho e a aferição é realizada em um espaçamento maior.

Por fim, esta proposição deve ser acatada após um estudo mais aprofundado, correlacionando diversos tipos de solo com os resultados obtidos em campo e em laboratório.

5. CONCLUSÃO

Após a elaboração dos estudos que visaram um melhor entendimento do processo migratório da cal, utilizada como aditivo químico numa camada do pavimento, para as camadas subjacentes chegou-se aos entendimentos que serão apresentados nos quatro próximos tópicos, assim como a sugestão de pesquisas futuras no quinto e último tópico.

5.1 ESTUDOS DE CAMPO

Em camadas de solos melhorados ou estabilizados quimicamente com cal e compactadas mecanicamente, este estudo mostrou ser possível identificar a migração ou não dos componentes químicos constituintes da cal por meio de determinações dos valores de pH e das composições químicas dos solos que compõem as camadas subjacentes.

A expectativa inicial de se identificar numa maior intensidade, as ações migratórias em até 5cm abaixo da camada de base foi subestimada, tendo em vista que a identificação da migração química da cal foi observada na profundidade máxima coletada que foi de 70cm, ou seja, 55cm abaixo da camada melhorada com cal, podendo ter atingido profundidades maiores não avaliadas no estudo.

5.2 ESTUDOS LABORATORIAIS PRELIMINARES

O solo natural foi classificado de acordo com a nomenclatura MCT, como laterítico argiloso, sendo que o índice de laterização (e') apresentou valores próximos a linha divisora entre laterítico e não laterítico o que segundo a classificação MCT-M, proposta por Vertamatti (1988) corresponde a um comportamento transicional argiloso laterítico, indicando que o solo ainda não sofreu o processo de intemperização plena.

No ensaio de DRX realizado sobre o solo proveniente da camada de base foi identificada a presença de calcita, um dos minerais presentes na cal, como um dos 8 minerais mais presentes no solo, fato não observado nas amostras provenientes das demais camadas. Foi identificada a presença de gibbsita e caulinita, minerais que podem reagir com o hidróxido de cálcio, gerando cimentações.

Foi verificado que o solo natural, em um sistema controlado de temperatura e umidade reduz o seu pH com o tempo. A redução em 200 dias de observação do pH em H₂O foi de 0,33 sendo observada a maior redução nos primeiros 14 dias. Esta observação leva a conclusão de que ao se analisar variações do pH após longo tempo faz-se necessário levar em consideração

este decréscimo do pH, no entanto, comparando-se os resultados obtidos para o solo com a base com incorporação de 3% de cal após 2 e 3 anos de sua compactação *in situ*, as diferenças registradas para o mesmo solo com 3% de cal em laboratório colocam como uma das possibilidades muito prováveis a ocorrência de migração química da cal para as camadas inferiores e laterais da estrutura de pavimento.

Assim como observado por Collins *et al.* (1970), o solo laterítico estudado teve o seu valor de pH em H₂O reduzido quando o material foi seco em estufa. Foi verificado também que, para este tipo de solo, os valores de pH em H₂O do material passando na peneira de abertura de 2,00mm na umidade ótima, na abertura de 0,42mm na umidade ótima ou na abertura de 0,42mm na umidade higroscópica (seco ao ar) ficaram bem próximos.

As análises realizadas apontam para a necessidade de aprofundar os estudos sobre a migração química que ocorre em campo e sobre a evolução de parâmetros químicos como o pH. No presente caso os valores de pH em água obtidos para as amostras coletadas em campo após 2 e 3 anos da construção da via indicaram valores inferiores ao que se obteria para o solo com o teor de cal definido em projeto no momento da construção. Outro ponto importante é que por sua simplicidade, baixo custo e rapidez o ensaio de pH pode ser adotado no controle de execução de obras em que o solo seja melhorado ou estabilizado com cal.

5.3 MIGRAÇÃO QUÍMICA

Analisando as amostras coletadas nos anos de 2020 e 2021 comparativamente com o que seria o solo no ano da execução do pavimento (2018) em três pontos distintos, foi identificado, por meio do pH em H₂O e em KCl, um fluxo migratório descendente dos componentes químicos da cal para as camadas suporte do subleito, sendo observado alterações do pH nas amostras coletadas até 70cm de profundidade (camadas de migração, subleito e subleito profundo), profundidade limite adotada no estudo. Foi observado também, nos Pontos 01 e 03, um aumento do pH na camada de subleito profundo, indicando um possível acúmulo deste material no solo a 70cm de profundidade causada pela presença, em camadas mais profundas de cambissolo, material que dificulta o fluxo descendente.

Em relação a variação granulométrica, nos anos 2021 e 2022 verificou-se, tanto no ensaio sem defloculante, quanto no ensaio com defloculante a redução gradual da fração de silte e de argila das amostras. Foi observado também que, na camada de base sem o uso do defloculante, o solo praticamente ficou formado por partículas com diâmetros equivalentes a

areia.

Foi verificado também que, no ensaio de sedimentação sem o uso do defloculante nas amostras de 2021 a fração argila, não é mais observada, corroborando com o entendimento que o solo sofreu agregação, não podendo ser descartada a hipótese de também ter ocorrido lixiviação da fração argila conforme identificado por Lima (2003).

Ao analisar a distribuição do pH no centro, na lateral e mais afastado da camada melhorada com cal identificou-se uma homogeneidade na camada de base. Também foi percebido, nos Pontos 01 e 03, que o pH em H₂O das amostras laterais do subleito ficaram maiores que no centro apontando para a influência da sucção como condicionante do fluxo e migração dos elementos e compostos químicos. No subleito profundo do furo afastado do pavimento, ou seja, a 3 m de distância e a 70 cm de profundidade foi percebida a variação do pH tanto em H₂O, quanto em KCl do solo natural, indicando uma influência do solo melhorado quimicamente a uma distância significativa o que amplia a importância do estudo desse tipo de migração.

Analisando a distribuição granulométrica identificou-se uma variação granulométrica ao longo da profundidade, indicando que os elementos químicos da cal, ao migrarem para as camadas subjacentes, propiciam, em alguns solos estudados no ano de 2020 uma desagregação, como indicado por Ayala (2020), e em 2021 este fato não foi observado, ou seja, observou-se uma aglutinação do solo.

Os ensaios de análise química identificaram a presença de íons de cálcio e magnésio em proporções maiores que os íons de potássio e sódio, indicando que o solo tende a aglutinar mais do que a dispersar com a presença da cal utilizada. O aumento dos íons de cálcio e magnésio nas camadas inferiores à camada de base indicam também o fluxo migratório dos compostos químicos.

Também foi observado, comparando com o solo de referência, o aumento da CTC do solo e da saturação de bases, indicando que a cal influencia nas camadas subjacentes ao material melhorado quimicamente.

Assim como houve aumento do pH no subleito profundo do Ponto 01 também foi observado o aumento nesta camada dos íons de cálcio e magnésio, CTC e da porcentagem de saturação de bases.

5.4 SUGESTÃO DE VERIFICAÇÃO DO TEOR DE CAL EM CAMPO POR MEIO DO pH

Por fim, verificou-se no solo ensaiado que a curva “*teor de cal x pH*” para o solo que se encontra na umidade ótima ou na umidade higroscópica são semelhantes. Tal verossimilhança pode auxiliar na verificação do teor de cal aplicado em campo, por meio da utilização de pHmetros portáteis, garantindo, assim, maior confiabilidade na realização do controle tecnológico de camadas de pavimento melhoradas ou estabilizadas quimicamente com o uso da cal.

5.5 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

São apresentadas a seguir sugestões para pesquisas futuras acerca do tema tratado nesta Dissertação.

- Elaborar estudos mineralógicos quantitativos de DRX e FRX ao longo do tempo e das camadas;
- Estender o estudo da variação do pH com o tempo de um solo com temperatura e umidade controlada para períodos superiores a 200 dias e prever a porcentagem de cal em cada camada do solo;
- Realizar estudo de campo para verificar a alteração dos parâmetros de resistência das amostras ao longo do tempo;
- Verificar se no processo migratório também ocorre lixiviação do solo por meio da variação do índice de vazios;
- Realizar estudo comparativo entre campo e laboratório de diversos solos para a obtenção do teor de cal em campo com base nas curvas de “*teor de cal x pH*”;
- Modelagem numérica para identificar o teor migratório de cal para as diversas camadas de solo e previsibilidade futura;
- Estudo da influência da leitura do pH com diversos teores de umidade em solos não saturados e a sua correlação com as curvas de retenção matricial e osmótica.
- Refazer o estudo para outras obras assim como para obras melhoradas ou estabilizadas com cimento Portland.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

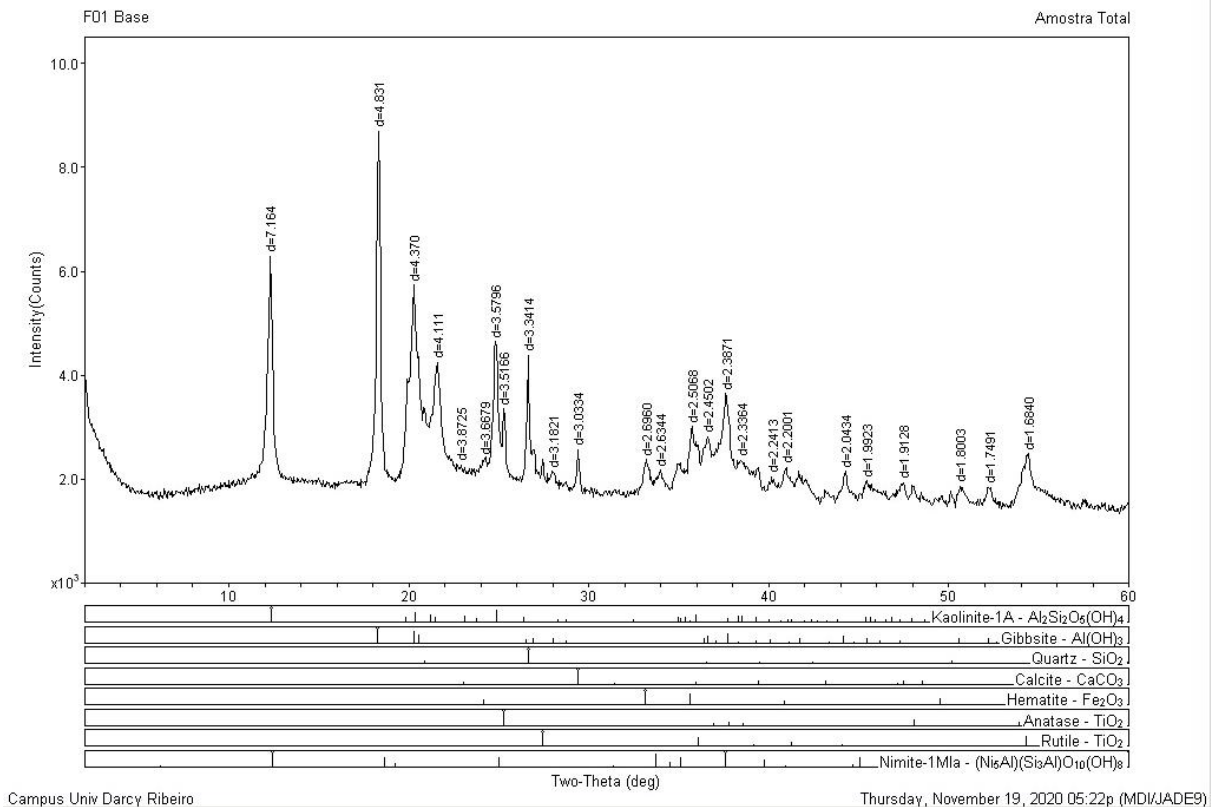
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502: Rochas e solos.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.
- AMADI, A. A.; OKEIYI. (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. *International Journal of Geo-Engineering*. 13 p.
- AYALA, R. J. L.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; HERNÁNDEZ, A. L. M. (2018). Análise de Misturas de Solo – Cal a Curto Prazo. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano - COBRAMSEG, Salvador, BA, 9 p.
- AYALA, R. J. L. (2020). Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola. Tese de doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 300p.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2006) Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, RJ: Petrobrás, ABEDA, 504 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.; *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico (2015). Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS. São Paulo, SP, 759 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks* Volume 44, N. 3. 25p.
- CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central brasileiro. Tese de Doutorado, G.TD-009A/2002, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 407 p.
- CASTRO, F. J. C. O. (1995). Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquioxídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização). Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 344 p.
- CASTRO, R. C. (2015). Phosphorus migration analysis using synchrotron radiation in soil treated with Brazilian granular fertilizers. *Applied Radiation and Isotopes* v. 105. 5 p.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte (2019). Anuário CNT do Transporte: Estatísticas consolidadas. Brasília, DF, 242 p.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte (2020). Anuário CNT do Transporte: Estatísticas consolidadas, principais dados. Brasília, DF, 27 p.
- COLLINS, J. B.; WHITESIDE, E. P.; CRESS, C. E. (1970). Seasonal Variability of pH and Lime Requirements in Several Southern Michigan Soils When Measured in Different Ways. *Soil Science Society of America*. Michigan. EUA. 6 p.
- DER/DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2020). Sistema Rodoviário do Distrito Federal. Brasília, DF, 160 p.
- DER/DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2022). Licitações Disponível em <[https:// https://www.der.df.gov.br/licitacoes/](https://www.der.df.gov.br/licitacoes/)>. Acesso em 12 de abril de 2022.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994a). 093: Solos – determinação da densidade real – Método de ensaio.

- DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994b). 051: Solos – análise granulométrica – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994c). 123: Solos – determinação do teor de umidade – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994d). 256: Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994e). 258: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994f). 093: Solos – determinação da densidade real – Método de ensaio.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2006). Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p (IPR. Publ., 719).
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2016). 172: Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhada – Método de ensaio.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). Evolução do perfil da rede rodoviária federal pavimentada. Disponível em <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/Condio.PNG>>. Acesso em 01 de julho de 2022.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2019a). 418: Pavimentação – Solo-Cal – Cal Virgem e Cal Hidratada – Especificação de material.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2019b). 419: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2019c). 420: Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para estabilização de camada de base – Especificação de Serviço.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2019d). 421: Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para estabilização de camada de sub-base – Especificação de Serviço.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2021a). MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos. Versão 1.1.5. DNIT. Disponível em <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.5>>. Acesso em 25 de junho de 2021.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2021b). 247: Estudos para a Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa – Instrução de Serviço.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2004). Mapa pedológico digital – SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Brasília, DF. 31 p.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 3ª Ed. Rio de Janeiro, RJ. 574 p.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5ª Ed. Brasília, DF. 356 p.

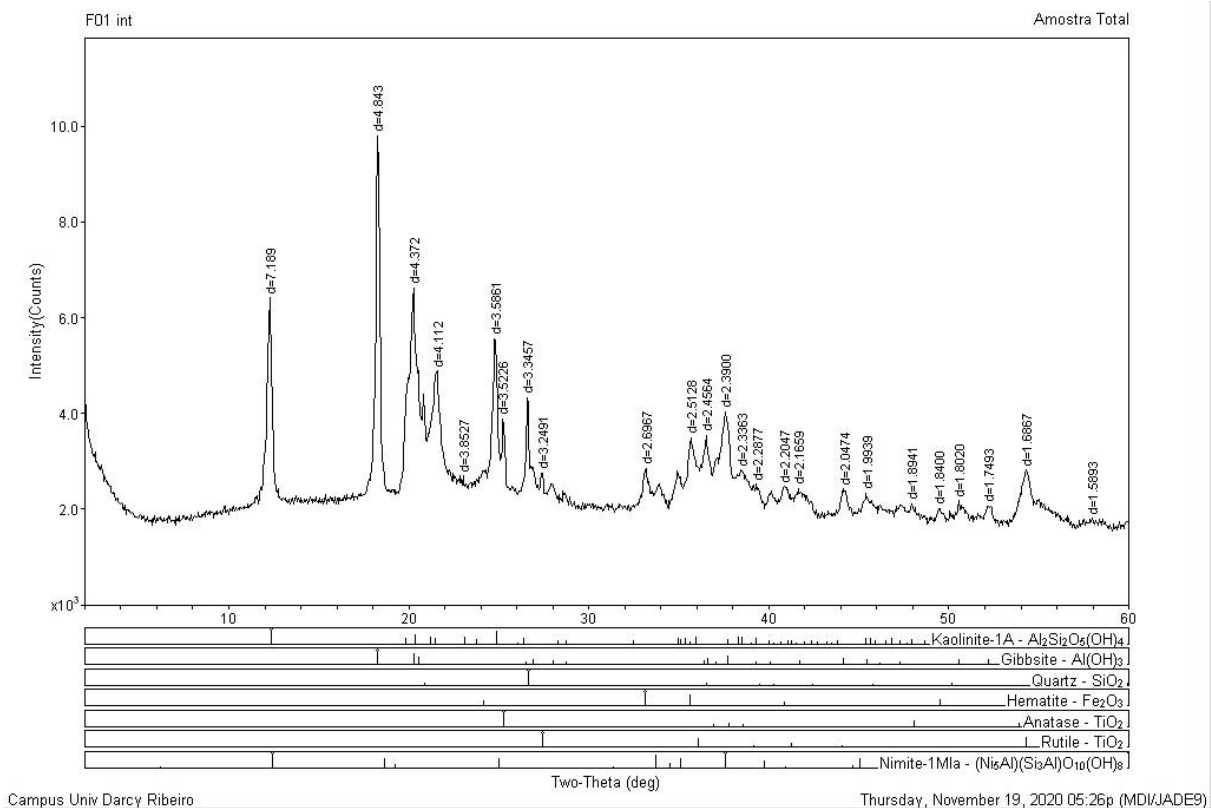
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. A Wiley-Interscience Publication. 567 p.
- Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-332/2019, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.
- GEOPORTAL, Portal Georreferenciado do DF (2020). Disponível em <<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/>>. Acesso em 30 de outubro de 2020.
- GOOGLE EARTH (2021). Disponível em <<http://earth.google.com>>. Acesso em 18 de abril de 2021.
- GRIM, R. E. (1962). Applied Clay Mineralogy. McGraw-Hill, Califórnia, EUA. 422 p.
- GUIMARÃES, R.C., CAMAPUM DE CARVALHO, J., & FARIAS, M.M. (1997). Contribuição ao estudo da utilização de solos finos em pavimentação. In Anais do I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego - I SIMBRATA (Vol. 1, pp. 469-478). Rio de Janeiro, Brasil.
- HERRIN, M. & MITCHELL, H. (1961). Soil lime mixtures. Highway Research Board, 99: 138 p.
- IBRAM, Instituto Brasília Ambiental (2021): Informação Técnica nº 435.000.057/2015. Brasília, 24 p.
- IMBROSI, D. B. T.; MARINO, D. M., DE PAULA, G. F., CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2019). Estudo da estabilização química de um solo tropical do Distrito Federal com adição de cal. 21º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Brasília, DF. 9 p.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2020). Calculadora Geográfica. Disponível em <[https:// http://www.dpi.inpe.br/calcula/](https://http://www.dpi.inpe.br/calcula/)>. Acesso em 7 de novembro de 2020.
- JOAQUIM, A. G. (2017). Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas. Dissertação de Mestrado. Campinas, SP, 161 p.
- KENG, J.C.W.; UEHARA, G. (1974). Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. Proceedings of Soil Crop Science Society of Florida, v. 33, p.119-126.
- LIMA, D. C. (1981). Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP. 171 p.
- LIMA, M.C. (2003). Degradação Físico-Química e Mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-17A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336 p.
- LIMPRASERT, T. (1995). Behaviour of soil, soil-cement and soil-cement-fiber under multiaxial test. Tese de doutorado. Faculty of the Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, 112p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1980). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. 12 p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. 240 p.
- PÉREZ, A. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C. (2018); Influência de insumos agrícolas em propriedades físicas de solos tropicais. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 10 p.
- PÉREZ, A. C. (2022); Análise da influência de insumos minerais no comportamento de um perfil de solo tropical. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138 p.
- PRADO, H. do. Pedologia Fácil (2022). 6ª Ed. Editora do autor. 271p.
- RESTREPO, J. S. (2010). Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical.

- Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM – 188/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 134p.
- REZENDE, L. R. de (2003). Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-014A/03. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 372p.
- ROSENO, J.L., CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2007). Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser. In: III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Cuiabá. Wilson Conciani, CEFET/MT. 136-147.
- SCORZA JÚNIOR, R. P.; RIGITANO, R. L. O. (2012). Sorção, degradação e lixiviação do inseticida tiametoxam em dois solos de Mato Grosso do Sul. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola /Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 9 p.
- SENAHA, S.C. F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-332/2019, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.
- SILVA, M. T. M. G. (2009). Metodologia para determinação de parâmetros para solos não saturados utilizando ensaios com umidade conhecida. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 109 p.
- SILVA, M. F. da (2016). Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico. Universidade de São Carlos, São Carlos, SP. 118 p.
- VERTAMATTI, E. (1988). Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente. Tese de doutorado. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 300 p.
- VIEIRA, J. P. (2010). Interação cimento-superplastificante. Avaliação da estabilidade do comportamento. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal. 138 p.
- VILLIBOR, D. F.; Alves, D. M. L.(2019). Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: projeto e construção: novas considerações. 1ª Edição. Florianópolis, SC. 544 p.
- VOLK, V.V.; JACKSON, M.L. (1963) Inorganic pH Dependent Cation Exchange Charge of Soils. Clays Clay Minerals 12. 15 p.
- WANDERLEY NETO, R. V. (2020). Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 344/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.
- YOKOZAWA, S. Y.; FERNANDES, P. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. OLIVEIRA, R. B. (2017). Comportamento de dois Cascalhos Lateríticos Após Compactações Sucessivas. Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste – GEOCENTRO. Goiânia, GO, 6p.

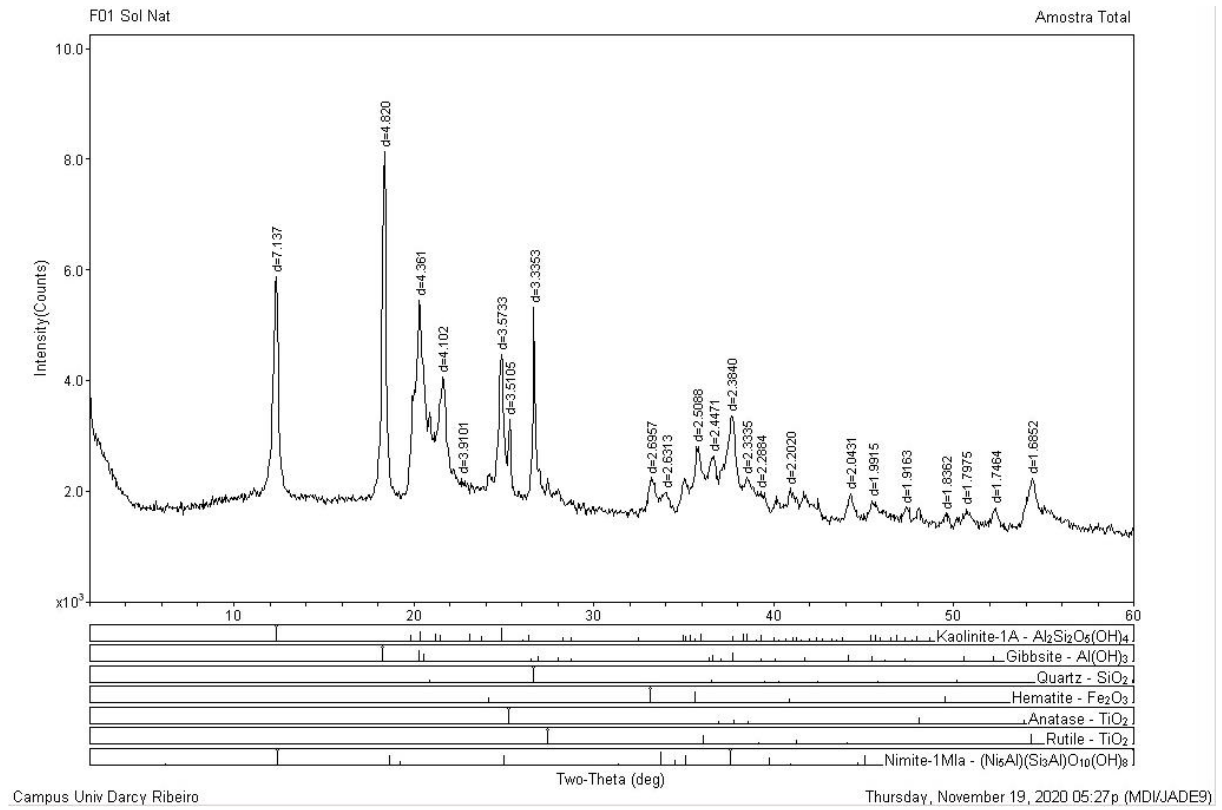
APÊNCICE A - DRX DAS AMOSTRAS



(a)

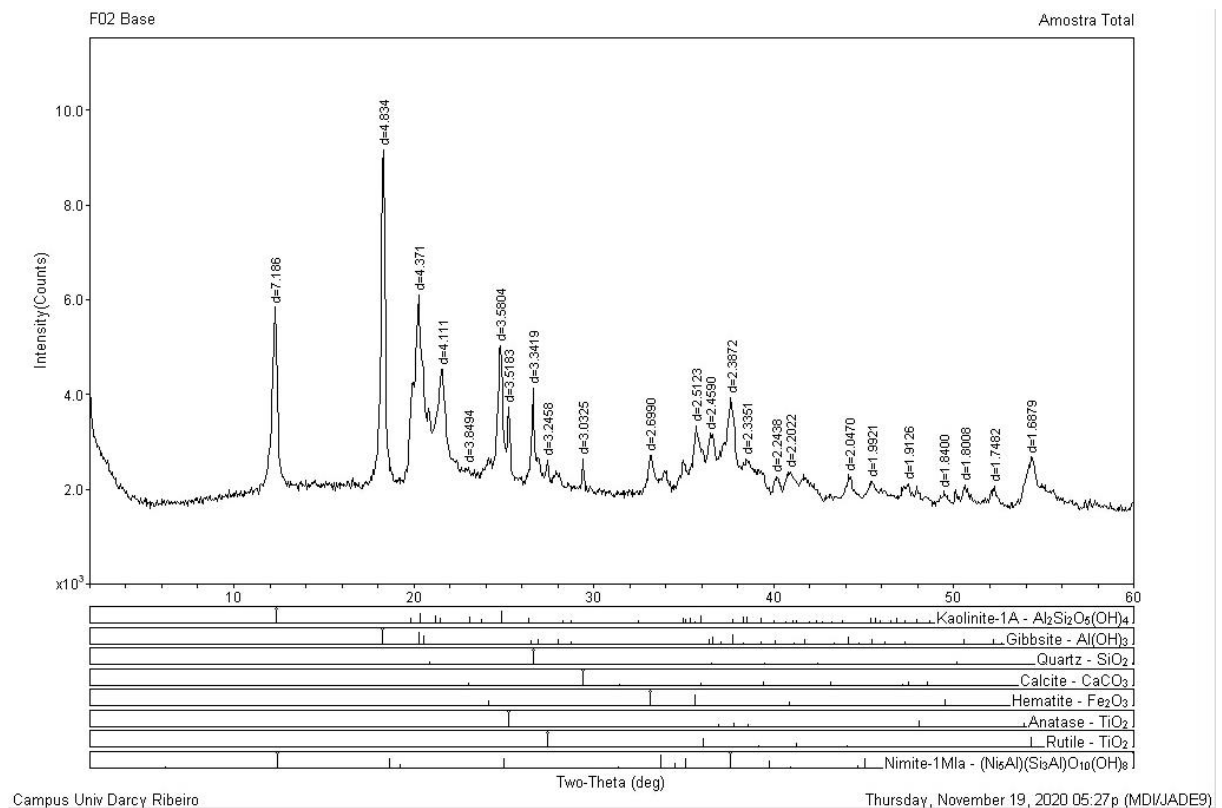


(b)



(c)

Figura A.1 – DRX do Ponto 01: (a) Base; (b) Migração; (c) Subleito



(a)

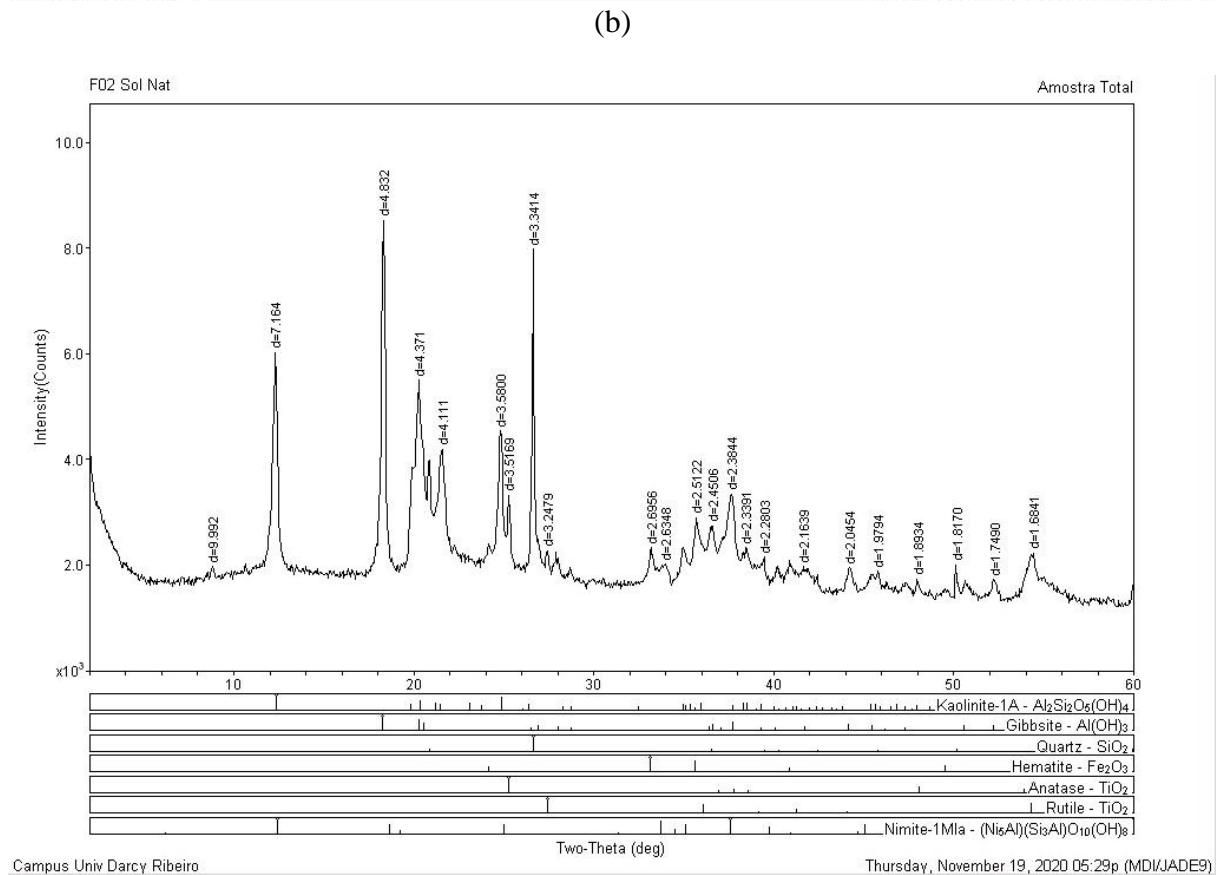
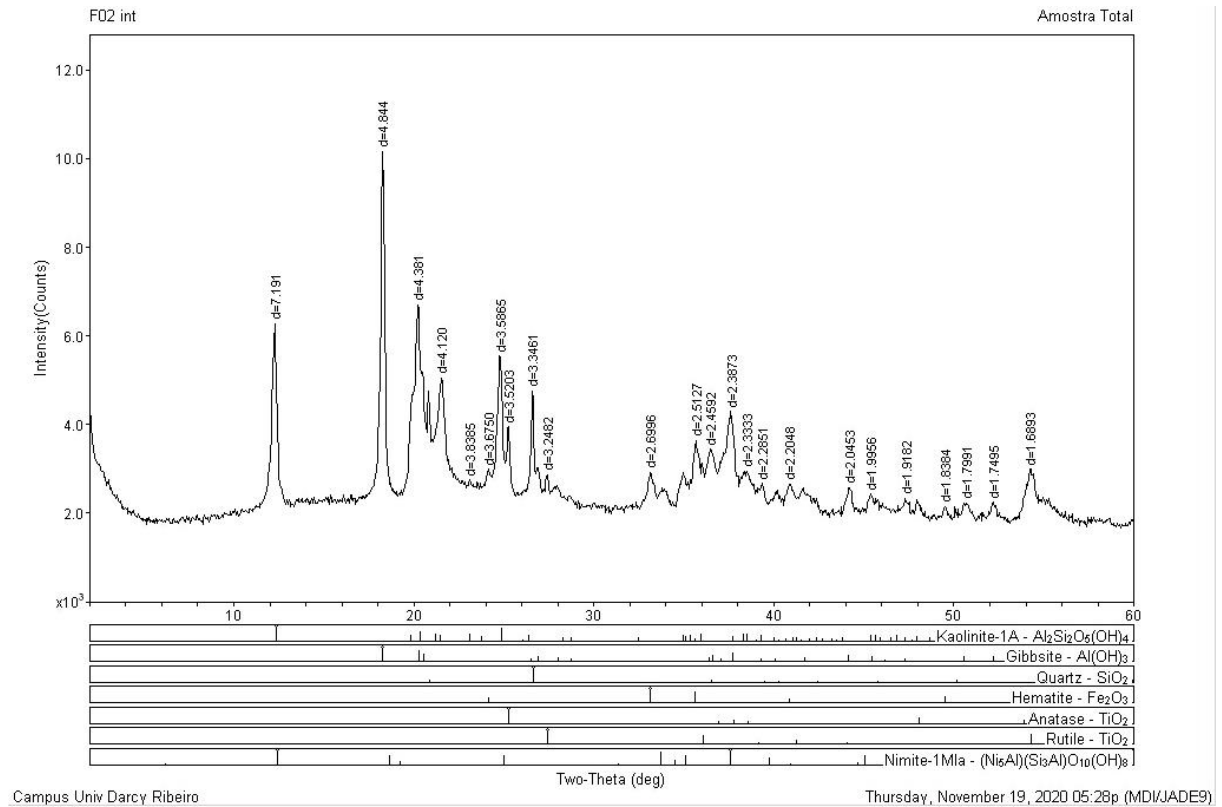
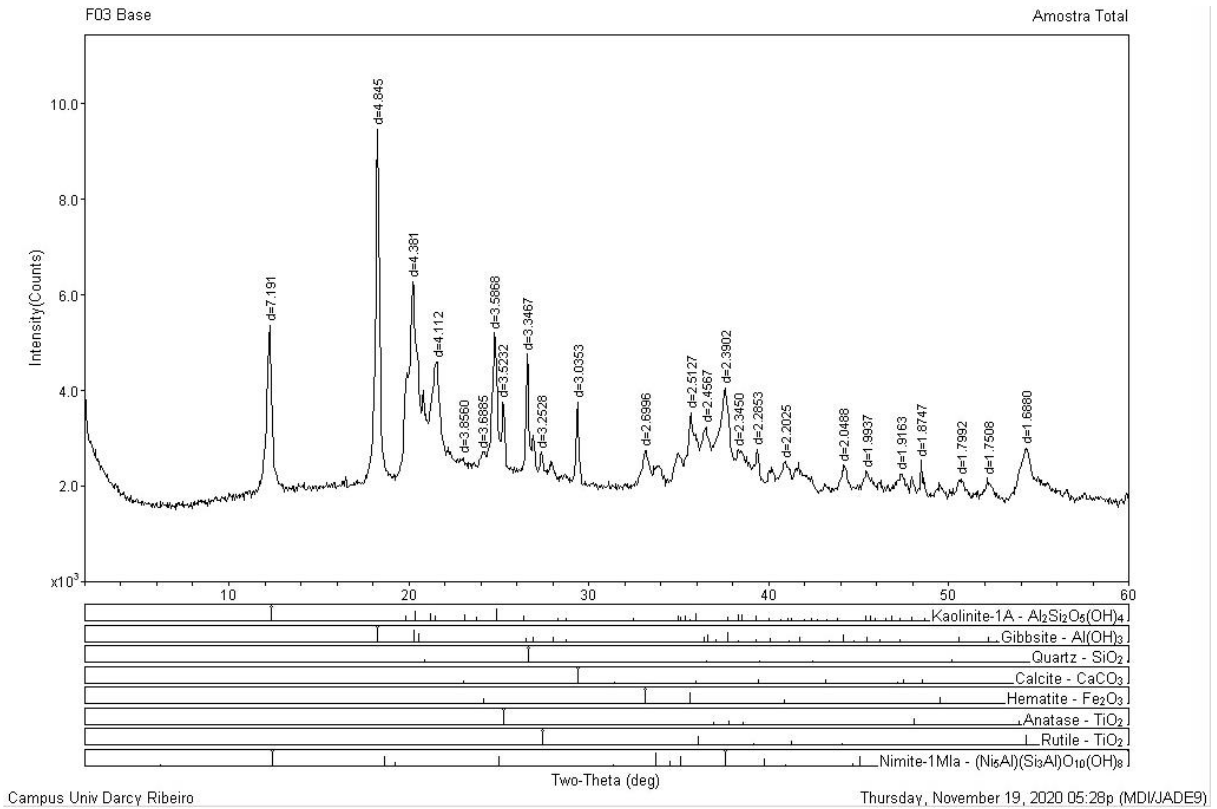
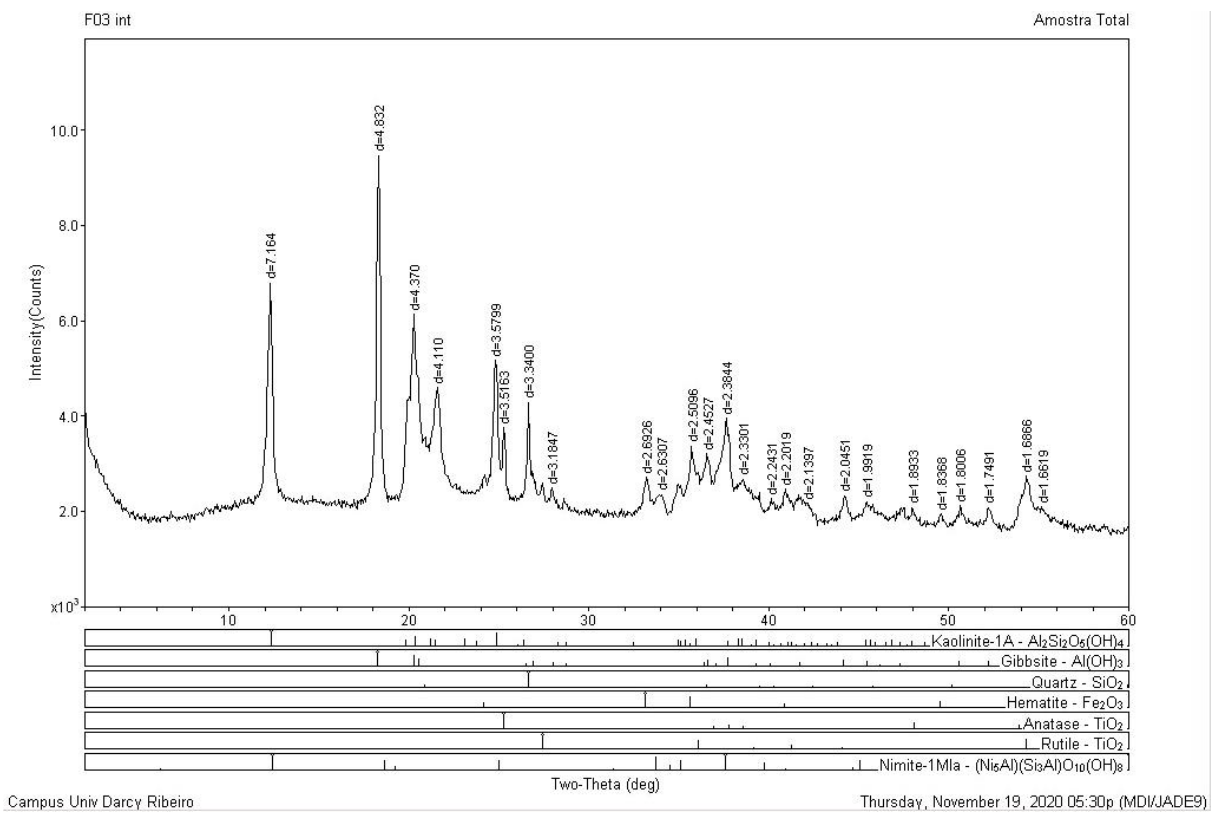


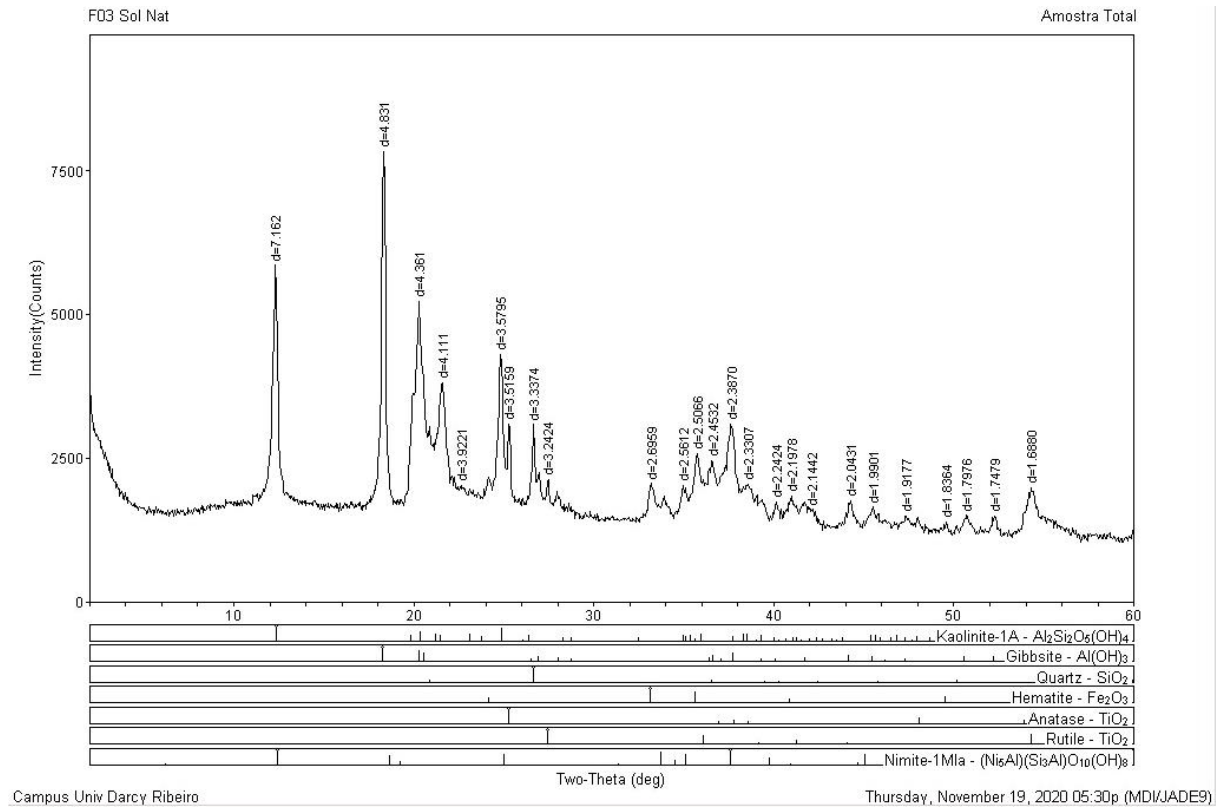
Figura A.2 – DRX do Ponto 02: (a) Base; (b) Migração; (c) Subleito



(a)



(b)



(c)

Figura A.3 – DRX do Ponto 03: (a) Base; (b) Migração; (c) Subleito

APÊNCICE B - CORREÇÃO DA LEITURA DO DENSÍMETRO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

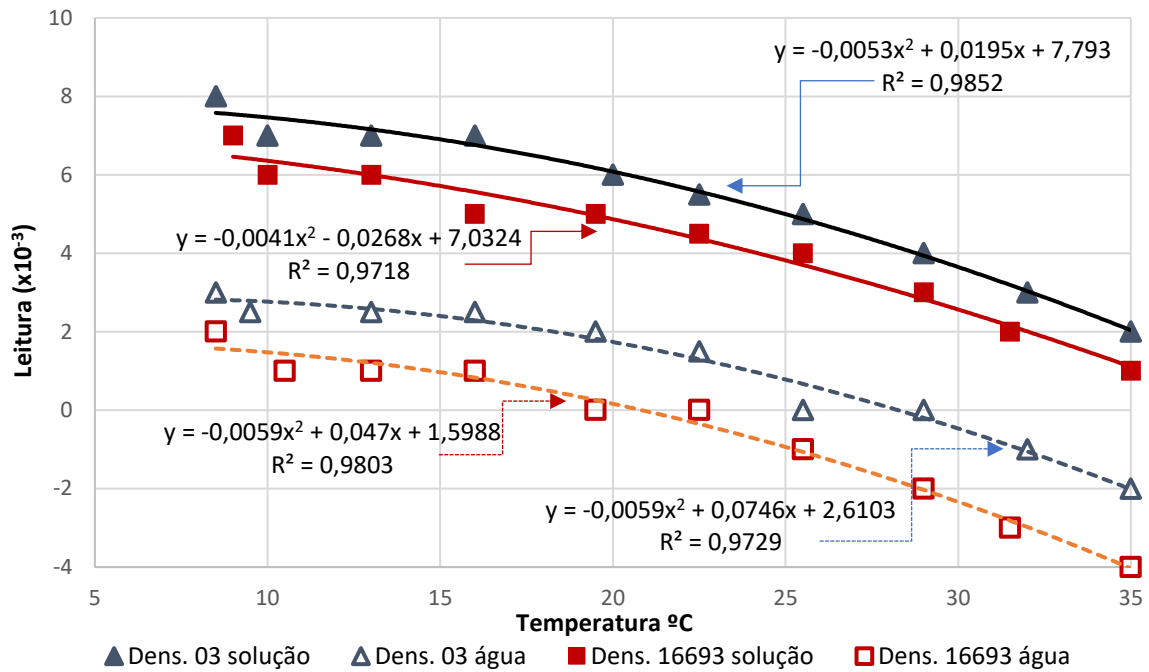


Figura B.1 – Curvas de correção das leituras dos densímetros