

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

**ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA NO CONTEXTO DAS  
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SOLOS  
TROPICAIS**

**DAN IMBROISI BRANT TEIXEIRA**

**Orientador: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.DM – 369/2022**

**BRASÍLIA – DF, 22 JUNHO DE 2022**

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

**ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA NO CONTEXTO DAS  
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SOLOS  
TROPICAIS**

**DAN IMBROISI BRANT TEIXEIRA**

**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)**

\_\_\_\_\_  
**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

\_\_\_\_\_  
**LILIAN RIBEIRO DE REZENDE, DSc. (UFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 22 DE JUNHO DE 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

TEIXEIRA, DAN IMBROISI BRANT;

**Estabilização química no contexto das propriedades físico-químicas dos solos tropicais** (Distrito Federal) 2022.

xiii, - 130p., 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. Cal

2. *Cimento*

3. *pH*

4. *Plasticidade*

4. *CTC*

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TEIXEIRA, D.I.B. (2022). **Estabilização química no contexto das propriedades físico-químicas dos solos tropicais**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-369/2022 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 130p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: DAN IMBROISI BRANT TEIXEIRA.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Estabilização química no contexto das propriedades físico-químicas dos solos tropicais**

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.

---

Dan Imbroisi Brant Teixeira

Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12

CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

[dibt@hotmail.com](mailto:dibt@hotmail.com)

*“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas.”*

Claude Lévi-Strauss

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo em todos os meus passos.

Aos meus pais, José Brant Teixeira (*in memoriam*) e Dionéia Imbroisi Brant Teixeira, pelos ensinamentos dados.

Aos meus filhos, Mariana e Dan Filho, que mesmo agora distantes, buscando seus próprios caminhos, estarão no meu coração, em meus pensamentos e nas minhas orações.

Aos meus primos, que se mostraram como irmãos nos meus momentos de dificuldade, em especial ao Dogginho, Uirá, Gustavo e André.

Aos meus amigos e colegas que participaram, de alguma forma, desta minha caminhada, em especial, à minha amiga Fernanda Macheone Rosa.

Ao Elcy Osorio, pelo incentivo dado para que eu ingressasse no mestrado.

Ao professor José Camapum de Carvalho que ao longo destes anos incentivou, orientou e se dedicou a este trabalho.

## RESUMO

Esta dissertação, construída em tempos de pandemia, nos quais ficou difícil, se não impossível, a realização de estudos de laboratório, teve por objetivo maior explorar resultados já disponibilizados na literatura nacional e internacional concernentes à estabilização química de solos com olhares específicos voltados para a variação das características físico-químicas dos solos e das misturas. O estudo, nesse contexto, voltou-se para a busca de entendimento das propriedades e comportamento dos solos tropicais quando estabilizados quimicamente com cal ou com cimento, fazendo-se uma releitura dos resultados de ensaios apresentados. Para cumprir esse objetivo, buscaram-se teses de doutorado, dissertações de mestrado e artigos publicados que tratassem de solos tropicais aditivados quimicamente com a cal e/ou cimento e, ao mesmo tempo, apresentassem o máximo de informações sobre as propriedades físico-químicas e os comportamentos obtidos. Dessa forma, cada trabalho foi brevemente descrito, bem como a localização dos solos e suas classificações pedológicas. Posteriormente, para os solos analisados, realizou-se a releitura dos dados, buscando-se entender as alterações químicas introduzidas e seus impactos na textura, na plasticidade e no comportamento mecânico. As alterações de ordem química e seus impactos nas propriedades e comportamento dos solos foram avaliadas por meio do pH em água, do pH em KCl e dos cálculos de  $\Delta\text{pH}$  e PCZ (Ponto de Carga Zero). O índice de atividade de Skempton foi utilizado nas análises fazendo-se a junção entre a plasticidade e a textura. Embora se tenha avaliado o impacto da saturação no comportamento mecânico obtido pelos autores, não foram avaliados os impactos da sucção matricial e osmótica no comportamento mecânico dos solos estabilizados com cal e com cimento, sendo este um aspecto relevante a ser considerado em estudos futuros. As análises realizadas mostram a relevância das propriedades físico-químicas para o entendimento do comportamento mecânico dos solos tropicais estabilizados quimicamente, no qual o pH em água e em KCl demonstraram ser parâmetros importantes.

## ABSTRACT

This dissertation, built in times of a pandemic, in which it was difficult, if not impossible, to carry out laboratory studies, had the main objective of exploring results already available in the national and international literature concerning the chemical stabilization of soils with specific perspectives focused on the variation of physicochemical characteristics of soils and mixtures. The study, in this context, turned to the search for understanding the properties and behavior of tropical soils when chemically stabilized with lime or cement, making a re-reading of the results of tests presented. In order to fulfill this objective, doctoral theses, master's dissertations and published articles were sought that dealt with tropical soils chemically enriched with lime and/or cement and, at the same time, presented as much information as possible about the physicochemical and the behaviors obtained. Thus, each work was briefly described, as well as the location of the soils and their pedological classifications. Subsequently, for the analyzed soils, the data was reread, seeking to understand the chemical changes introduced and their impacts on texture, plasticity and mechanical behavior. Chemical changes and their impacts on soil properties and behavior were evaluated using pH in water, pH in KCl and calculations of  $\Delta\text{pH}$  and PCZ (Zero Load Point). The Skempton activity index was used in the analyses, making the junction between plasticity and texture. Although the impact of saturation on the mechanical behavior obtained by the authors was evaluated, the impacts of matrix and osmotic suction on the mechanical behavior of soils stabilized with lime and cement were not evaluated, which is a relevant aspect to be considered in future studies. The analyzes carried out show the relevance of the physicochemical properties for the understanding of the mechanical behavior of chemically stabilized tropical soils, in which the pH in water and in KCl proved to be important parameters.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vi
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1    Motivação.....	4
1.2    Hipótese.....	4
1.3    Objetivos Gerais.....	5
1.4    Objetivos específicos.....	5
1.5    Estrutura da dissertação.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1    Os solos.....	7
2.2    Solos lateríticos.....	10
2.3    Estabilização química.....	17
2.4    Solo Cal.....	25
2.4.1    A cal.....	25
2.4.2    Mistura solo cal.....	26
2.5    Solo cimento.....	30
2.5.1    O cimento.....	30
2.5.2    Mistura solo cimento.....	32
3 METODOLOGIA.....	36
3.1    Estudos de solos aditivados com cal.....	37
3.1.1    A influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil.....	38

3.1.2	A influência da cal nas propriedades de engenharia de solos lateríticos ....	40
3.1.3	Influência da área específica na atividade pozolânica do sistema solo laterítico-cal.....	41
3.1.4	Parâmetros-chave para o controle de resistência de solos estabilizados com cal	45
3.1.5	Modificação com cal de uma laterita problemática .....	45
3.1.6	Efeito da cal virgem nas propriedades físico-químicas do solo argiloso ....	46
3.1.7	Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária.....	47
3.2	Estudos de solos aditivados com cimento .....	51
3.2.1	Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo cimento	52
3.2.2	Estabilização mecânica – laterita com cimento para uso como material de pavimento.....	53
3.2.3	Análise do desenvolvimento de resistência em argilas siltosa estabilizada com cimento a partir de considerações microestruturais .....	54
3.2.4	Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica	55
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	57
4.1	Caracterização Física dos Solos .....	57
4.2	Análise Mineralógica e Química dos Solos .....	69
4.3	Estabilização Químicas dos Solos com a Cal.....	81
4.4	Estabilização Químicas dos Solos com Cimento .....	105
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	115
5.1	Conclusões .....	115
5.2	Sugestões paras pesquisas futuras .....	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
	ANEXO.....	124
	ANEXO 1.....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Ocorrência dos solos lateríticos (Delgado, 2007, citando Villibor <i>et al.</i> , 2000).....	2
Figura 2.1– Triângulo textural (Molina Junior, 2017 citando Whiting <i>et al.</i> , 2011 e USDA, 2011).....	12
Figura 2.2 – Curvas granulométricas (Marino <i>et al.</i> , 2022).....	22
Figura 4.1 – (a) $w_n(\%) \times \gamma_s$ , (b) $w_n(\%) \times e$ , (c) $w_n(\%) \times S_r$ (%). ....	59
Figura 4.2 – Índice de Plasticidade dos solos in natura. ....	61
Figura 4.3 – Limites de liquidez e plasticidade, solos in natura - (a) $w_L$ , $\rho_s$ ; (b) $w_P$ , $\rho_s$ . ....	62
Figura 4.4 – Carta de plasticidade dos solos in natura. ....	63
Figura 4.5 – Mudança de classificação na carta de plasticidade. ....	64
Figura 4.6- Composição Granulométrica – (a) Horizonte B, (b) Zona Mosqueada, (c) Saprólito Fino.....	65
Figura 4.7 – Análise textural dos solos. ....	67
Figura 4.8 – Relações potenciométricas – (a) $pH_{H_2O} \times \% \text{ argila}$ , (b) $\Delta pH \times \% \text{ argila}$ , (c) $pH_{H_2O} \times PCZ$ . ....	71
Figura 4.9 – Relações do pH em água com: (a) MO, (b) CTC. ....	73
Figura 4.10– Coeficientes de intemperismo $k_i$ e $k_{rem}$ função do pH em água – ....	74
Figura 4.11 – a) relação $k_r \times \rho_s$ ; (b) relação $k_i \times \rho_s$ . ....	79
Figura 4.12 – (a) $k_r \times IA$ ; (b) $k_i \times IA$ ....	80
Figura 4.13 – $pH \times (\% \text{ argila}/\rho_s)$ .....	80
Figura 4.14 – MEAS x SR (%). ....	81
Figura 4.15 – Variação do pH em função do teor de cal – (a) pH em H <sub>2</sub> O, (b) pH em KCL.....	83
Figura 4.16 – Variação do PCZ com o teor de cal. ....	86
Figura 4.17 – Variação do índice de plasticidade em função do teor de cal adicionado. ....	86
Figura 4.18 – Variação do índice de atividade em função do teor de cal adicionado. ....	87
Figura 4.19 – (a) Variação da massa específica aparente seca, (b) variação no índice de vazios conforme Lanque Ayala (2018), (c) variação no índice de vazios conforme Aguiar (2014), todos em função do teor de cal adicionado. ....	89
Figura 4.20– Variação do limite de liquidez em função do teor de cal adicionado. ....	91
Figura 4.21– Variação do limite de plasticidade em função do teor de cal adicionado. ....	92
Figura 4.22 – Relação entre a densidade dos grãos e: (a) $w_p$ ; (b) $w_l$ ; (c) IP; (d) IA .....	96

Figura 4.23 – Variação do $\Delta pH$ em função do teor de cal no solo – (a) HB7-Delgado, (b) HB9 -Delgado, (c) HB10-Delgado, (d) HB11-Delgado, (e) HB12-Delgado, (f) HBR1-Delgado, (g) HBR2-Delgado, (h) ZM3-Delgado, (i) ZM6-Delgado, (j) SF2-Delgado, (k) SF4-Delgado, (l)SF8-Delgado, (m) SF13-Delgado. ....	97
Figura 4.24 – Resistência à compressão simples em função do teor de cal. ....	99
Figura 4.25– Resistência à compressão simples em função do PCZ. ....	101
Figura 4.26 – Variação de resistência com o tempo, solos com 6% de cal.....	103
Figura 4.27 – Variação do CBR com teor de cal – solo saturado. ....	104
Figura 4.28– Variação do CBR com teor de cal – solo não saturado. ....	104
Figura 4.29 – Perda de CBR devido à saturação.....	105
Figura 4.30-Variação dos limites de Atterberg em função do teor de cimento. ....	106
Figura 4.31 – Variação $w_l / (1 - \% \text{ areia})$ em função do teor de cimento. ....	107
Figura 4.32 – Variação do limite de plasticidade em função do teor de cimento. ....	107
Figura 4.33 – Variação $w_p / (1 - \% \text{ areia})$ em função do teor de cimento. ....	108
Figura 4.34– Variação do índice de plasticidade em função do teor de cimento.....	109
Figura 4.35 – Variação $IP / (1 - \% \text{ areia})$ em função do teor de cimento.....	109
Figura 4.36 –Variação da MEAS em função do teor de cimento e energia de compactação. ....	111
Figura 4.37 – RCS, não saturado, Solo – Joel (Joel, 2011).....	111
Figura 4.38 – RCS, saturado, Solo – Joel (Joel, 2011). ....	112
Figura 4.39 – Redução da RCS devido à saturação, Solo – Joel.....	113
Figura 4.40– Redução da CBR devido à saturação, Solo – Joel. ....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros para análise de comportamento. ....	23
Tabela 2.2 – Cargas elétricas de minerais (Adaptado - Alleoni, 2002 citado por Prado, 2016).....	24
Tabela 2.3 – Valores médios da composição química das cales (Modificado – Guimarães, 2002). ....	25
Tabela 2.4 – Característica físico-químicas das cales (DNIT 418/2019-EM). ....	26
Tabela 2.5 – Componentes para cada tipo de cimento Portland (DNER-EM 036/95). .	30
Tabela 2.6– Componentes básicos do cimento Portland (Metha e Monteiro, 1994 citado por Portelinha, 2018).....	32
Tabela 3.1 – Solos estabilizados com cal.....	38
Tabela 3.2 – Solos estabilizados com cimento.....	51
Tabela 4.1 – classificação textural dos solos in natura. ....	68
Tabela 4.2 – Comparação de classificação dos solos in natura (modificado-Delgado, 2007).....	69
Tabela 4.3 – Classificação dos solos quanto ao grau de intemperismo por meio dos coeficientes $k_i$ , $k_r$ e MCT. (Modificado - Delgado, 2007- Ferro, 1976 - Aflitos, 1981 - Neves, 1989 - Rodrigues, 1992 –Horpibulsuk <i>et al.</i> , 2010). ....	75
Tabela 4.4– Composição mineralógica dos solos (Modificado - Delgado, 2007- Ferro, 1976 - Aflitos, 1981 - Neves, 1989 - Rodrigues, 1992 - Osula, 1991). ....	77
Tabela 4.5– Mudanças observações pelo $\Delta pH$ .....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CTA	Capacidade de Troca Aniônica
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DCTC	Diferença da Capacidade de Troca Catiônica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura em Transporte
$I_p$	Índice de Plasticidade
KCL	Cloreto de Potássio
LFP	<i>Lime Fixation Point</i>
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
NBR	Norma Brasileira Registrada
PCZ	Ponto de Carga Zero
pH	Potencial Hidrogeniônico
$w_L$	Limite de Liquidez
$w_P$	Limite de Plasticidade
RCS	Resistência à Compressão Simples
PM	Proctor Modificado
PN	Proctor Normal
SUCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
WAS	<i>West African Standard</i>
$\Delta pH$	Diferença do pH em KCl com pH em água

# CAPÍTULO I

---

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de clima tropical e por consequência da ação do clima ao longo da evolução geológica, ocorreram as alterações do solo, pelos diversos processos de intemperismo atuantes (químicos, físicos, biológicos), transformando as rochas de origem, em certos casos, solos sedimentares e coluvionares, na forma de solos existentes hoje. Dentre todos os solos formados, encontra-se o solo laterítico, o qual possui características geotécnicas, em grande parte distintas dos solos formados em climas temperado e frio. Os métodos para avaliação e classificação de solos desenvolvidos em países de clima temperado e frio, no estado em que se encontram, não são, muitas vezes, compatíveis com as propriedades e os comportamentos de muitos dos solos desenvolvidos em regiões tropicais, havendo distinções entre as propriedades físicas, químico-mineralógicas e entre comportamentos hidráulicos e mecânicos estabelecidos a partir dos estudos e o real desempenho do solo *in situ*. Mesmo sistemas de classificação desenvolvidos para os solos tropicais requerem, em muitas situações, um olhar mais amplo para compreensão do seu comportamento (Nogami e Villibor, 1981), por exemplo, a secagem prévia do solo, mesmo que ao ar possa propiciar classificações destoantes do que se obteria para as condições de campo.

Nanda e Krishnamachari, 1958; Arulanandan e Tunbridge, 1969, citado por Gidigas (1976), afirmam que os solos lateríticos não são adequados para serem utilizados como base em estruturas de pavimento, podendo ser adequados para sub-base.

Balduzzi e Mayor (1981) definem solo tropical como solos vermelhos cujo processo de formação principal é a degradação química, ocorrendo o acúmulo de óxidos de ferro e alumínio e a lixiviação de sílicas e álcalis, cabendo aqui um alerta no que diz respeito à estabilização química desses solos: a elevação ou redução do pH a determinados níveis provocada pelo aditivo químico incorporado ao solo, objetivando a melhoria do seu comportamento mecânico pode, ao contrário, ao gerar a solubilização de compostos químicos cimentantes, ter consequências adversas.

Com o entendimento de que o comportamento de um solo tropical se fazia diferente daquele de um solo de clima temperado (Nogami e Villibor, 1981), desenvolveram, com fundamento nos estudos realizados por Parsons (1976, 1978), citados por Balduzzi e Mayor (1981), a metodologia MCT para melhor classificar os solos que compõem os

perfis de intemperismo presentes no Brasil. Nessa metodologia, os solos foram divididos em duas classes: os solos de comportamento laterítico e os solos não lateríticos. Essa contribuição, voltada para os solos finos com textura inferior a 2 mm, possibilitou a classificação dos solos estabelecendo uma maior coerência com o comportamento hidráulico e mecânico dos solos em obras geotécnicas, principalmente, em obras de pavimentação.

Segundo Villibor e Alves (2019), é estimado que, à vista de considerações pedológicas e geológicas, os solos lateríticos ocupam cerca de 65% do território brasileiro. A Figura 1.1 apresenta as ocorrências dos solos lateríticos.



Figura 1.1– Ocorrência dos solos lateríticos (Delgado, 2007, citando Villibor *et al.*, 2000).

Olhando pelo ângulo pedológico, segundo Lepsch (2010), os latossolos são solos muito intemperizados e possuem pequenas diferenciações de horizonte, e em grande parte não apresentam macroagregados no horizonte B. Cabe aqui mais um alerta no que tange ao uso desses solos em obras rodoviárias, em especial aquelas envolvendo a estabilização química: esses solos, apesar da aparente similaridade entre os horizontes, podem ser dotados de significativas variações ao longo do perfil no que tange, em especial, às propriedades químico-mineralógicas, mas que geralmente alcançam propriedades físicas como a massa específica dos sólidos.

Deve-se considerar que um solo classificado pedologicamente como latossolo pode não ter um bom comportamento geotécnico, conforme observado por Nogami e Villibor (1981), no qual o conhecimento da metodologia MCT ajuda a distinguir um solo tropical com um bom comportamento para fins rodoviários (solos de comportamento laterítico), de um solo com um comportamento não tão adequado (solos saprolíticos).

Balduzzi e Mayor (1981) afirmam que ao se conhecer o valor de condição de umidade de um solo (Moisture Condition Value - MCV), é possível saber o teor de umidade, a energia necessária para atingir a densidade máxima e sua resistência quando compactado. O ensaio MCV tem como objetivo a determinação do teor de umidade para uma energia de compactação, visando à eficiência dos equipamentos de terraplenagem (Nogami e Villibor, 1980 citado por Marson, 2004). Faz-se aqui oportuno o destaque: os métodos voltados para a compactação dos solos objetivam maximizar a redução da porosidade interveniente no comportamento, fazendo-se, no entanto, necessária atenção para aspectos como os estruturais e similaridade entre as técnicas adotadas em campo e laboratório, vislumbrando resguardar o comportamento previsto em laboratório (Camapum de Carvalho *et al.* 1987)

Embora o conhecimento do comportamento dos solos tropicais, *in natura*, tenha passado por avanços, algumas obras geotécnicas podem necessitar de um solo com um desempenho distinto do solo encontrado no local ou próximo ao local. Obras geotécnicas tais como aterros, barragens, cortes, estruturas de pavimentos e mesmo taludes naturais em recomposição, podem necessitar de um solo com comportamento mecânico e/ou hidráulico melhores que os apresentados pelo solo em condições naturais. É nesse momento que entram as estabilizações que podem ser de ordem física, química ou a junção de ambas, físico-químicas.

Diante de um solo disponível localmente, que não atenda tecnicamente às necessidades de um dado projeto, a estabilização química surge como alternativa de melhoria do comportamento, de modo a torná-lo compatível com as necessidades do projeto e buscando eliminar custos adicionais. Todavia se faz necessário apresentar aqui dois alertas: 1) é indispensável que se contextualize as condições de cura de laboratório em relação ao campo, pois no modo como ela é geralmente feita, os fluxos hídricos oriundos dos acréscimos e reduções de umidade e temperatura não atuam no solo durante o período de cura; 2) é preciso atentar para os efeitos da sucção matricial e osmótica sobre o comportamento do solo que se busca melhorar em termos de comportamento mecânico.

Em busca desse melhor comportamento mecânico, vários estudos já foram realizados e alguns aditivos químicos, apesar de ainda amplamente desconhecidos em termos de seus reais impactos nas propriedades físico-químicas e no próprio comportamento, já são comumente utilizados, tais como a cal, o cimento e o betume. Existem também outros estabilizantes que estão sendo estudados, como o uso de gesso reciclado, fosfogesso, cinza volante, resíduos de mineração, Reciclados da Construção e Demolição (RCD), fibras orgânicas e sintéticas, dentre outras.

Os estudos voltados para a melhoria e estabilização química dos solos são numerosos no Brasil, mas dada a grande extensão territorial e diversidade de propriedades e comportamento dos solos do país, faz-se oportuna uma análise ampla buscando-se integrar os resultados já disponibilizados e delinear aspectos relevantes a serem considerados quando se estuda a estabilização química de um solo tropical. Assim, esse estudo visa analisar dados apresentados na literatura, objetivando o entendimento do comportamento mecânico por meio de elos com as propriedades físicas e composições químico-mineralógicas dos solos, assim como com as propriedades dos estabilizantes químicos usados. Cabe destacar que um fator de suma importância, mas não tratado no âmbito dessa dissertação, diz respeito à influência da sucção no comportamento dos solos estabilizados. Esse tema foi tratado em dissertações de mestrado (Rezende 1999, Pessoa 2004, Bento 2006, Fuji 2012, Freitas 2018) e em teses de doutorado (Rezende 2003, Delgado 2007, Pessoa 2012, Aguiar 2014).

## **1.1 Motivação**

Esta dissertação teve por motivação a necessidade de maior entendimento sobre a influência das propriedades físico-químicas dos solos nos resultados das estabilizações químicas oriundas da incorporação de cal e cimento ao solo, buscando-se fazer uma análise integrada de resultados disponibilizados em monografias, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos técnicos.

## **1.2 Hipótese**

Estabeleceu-se como hipótese que a junção dos resultados concernentes às propriedades físicas e químicas dos solos constitui-se em ferramenta auxiliar importante quando se busca a melhoria do comportamento mecânico dos solos tropicais por meio da incorporação de cal e de cimento.

### 1.3 Objetivos Gerais

A presente Dissertação teve como objetivo principal a releitura de onze estudos já realizados e disponibilizados na literatura sobre estabilização química de solos tropicais. Nas análises, consideraram-se as propriedades físico-químicas e mineralógicas dos solos, de modo a se chegar a um entendimento mais amplo sobre o comportamento dos solos estabilizados quimicamente. Nessas análises, buscou-se observar, também, as composições químicas dos estabilizantes, sendo o estudo restrito à cal e ao cimento Portland.

### 1.4 Objetivos específicos

Com interesse em alcançar o objetivo geral da pesquisa, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- fazer uma busca na literatura por estudos sobre estabilização química de solos com cal e cimento Portland (monografias, dissertações, teses, artigos) que sejam o mais completos possível, em termos das propriedades físicas e químicas e contemplem solos tropicais com diferentes particularidades;
- buscar informações sobre mudanças das curvas granulométricas, devido à adição dos aditivos químicos;
- buscar estudos que mostrem como a variação do pH, pode interferir na textura e comportamento mecânico de um solo tropical;
- analisar as variações dos limites de Atterberg devido às estabilizações químicas;
- avaliar com auxílio de estudos publicados na literatura, a relação do pH do solo e o seu respectivo ponto de carga zero (PCZ), como indicativo de agregação/floculação ou desagregação/defloculação de um solo tropical;
- avaliação da variação do teor de umidade ótima e do grau de saturação devido à estabilização química considerando-se a porosidade e as eventuais variações de peso específico dos grãos;
- avaliação da variação da massa específica dos grãos devido à estabilização química;
- buscar estabelecer relações gerais entre as propriedades físico-químicas e mineralógicas dos solos tropicais e o desempenho das estabilizações químicas.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

Buscando auxiliar no entendimento sobre os temas discutidos nos capítulos, é descrito, neste tópico, a forma como este documento foi organizado

Capítulo I: introdução ao tema e objeto da pesquisa, apresentando o objetivo geral e os objetivos específicos.

Capítulo II: apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, no qual se busca definir e enfatizar os solos tropicais, de maneira a mostrar particularidades presentes nestes solos, as quais não existem em solos de países de clima temperado. São apresentadas, também as metodologias disponíveis para estabilização química dos solos, nas quais suas principais reações físico-químicas são descritas, com conceitos a serem ponderados quando em uso nos solos tropicais.

Capítulo III: apresenta o resultado da busca por publicações que tratam do tema, apresentando algumas limitações encontradas. É apresentado, também, uma breve descrição do trabalho de cada autor, com a descrição dos solos estudados por cada um deles.

Capítulo IV: agrupa os solos apresentados no Capítulo 3, tratando em separado os solos estabilizados com cal e com cimento. Buscando o entendimento das propriedades de comportamento dos solos estabilizados quimicamente, é feita a análise das propriedades físicas e químicas dos solos considerados no estudo. As análises realizadas contribuem para o melhor entendimento da estabilização química dos solos tropicais.

Capítulo V: apresenta a conclusão do trabalho, dando ênfase às novas análises adicionadas ao mesmo tempo em que chama a atenção para a necessidade de se ampliar as análises tradicionais indo além da simples determinação do comportamento mecânico em condições de laboratório. Ao final, são apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

# CAPÍTULO II

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica, na qual se pretende reunir, em um primeiro momento, os conceitos que definem um solo tropical, estudos que apresentam aspectos químico-mineralógicos dos solos tropicais pouco e profundamente intemperizados e trabalhos que apresentam solos que foram estudados com estabilizantes químicos.

O foco principal será apresentar e buscar o entendimento do processo de formação dos solos tropicais, em especial no que concerne ao fenômeno de agregação/floculação e desagregação/dispersão do solo em estado natural, buscando correlacioná-lo com o seu pH e o PCZ. Em um próximo passo, durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado, serão pesquisadas bibliografias nas quais foram utilizados estabilizantes químicos, em especial, o tradicional cimento Portland e a cal. Sempre que cabível, serão analisadas referências bibliográficas dispondo sobre a utilização de outros estabilizantes químicos.

Lembrando que estabilizantes químicos não tradicionais podem ser considerados de grande importância, devido a alguns deles serem resíduos de obras e rejeitos de indústrias, tal como o gesso (Pu *et al.*, 2021) ou o fosfogesso, (Rezende *et al.*, 2017; Mascarenha *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019). O uso dos resíduos químicos como estabilizantes dos solos deve ser visto sob duas óticas, a tecnológica e a ambiental, lembrando que a solução do passivo ambiental deve ser vista como um fator econômico relevante.

### 2.1 Os solos

Os solos podem ser conceituados sob três óticas: a genética, a da engenharia civil e sobre os aspectos pedológicos.

Dessa forma, a consideração e o entendimento dessas três óticas propiciarão um bom agrupamento de tipos de solo, no qual se buscará uma melhor avaliação do comportamento mecânico e hidráulico do solo, como também de sua composição química, sendo esta última, a que poderá indicar como o solo irá se comportar com a adição de determinado aditivo químico.

Os solos no âmbito do entendimento genético compreendem a origem e os processos de formação. Observando-se o aspecto da genética dos solos, o estudo dos horizontes se torna mais organizado e, com certa segurança, podem-se extrapolar as suas propriedades entre os pontos de amostragem. Sob o ponto de vista geológico, e devido aos processos de intemperismo, obtêm-se duas classificações principais para os solos: os solos residuais, que são os solos formados no local de origem da rocha;- os solos transportados, os quais foram erodidos do seu local de formação e se depositaram em outro local (Vaz e Gurgueira 2018). Cabe destacar que, nesse caso, o processo de intemperização pode ter atuado antes do solo ser transportado, após o transporte ou ao longo desses dois estágios.

Vaz e Gurgueira (2018) apresentam que para determinação e caracterização do tipo de solo sob o ponto de vista genético deve-se verificar se o solo *in situ* é homogêneo (solo eluvial) ou heterogêneo (solo de alteração). Se for um solo transportado, verifica-se a origem se é fluvial (aluvião ou terraço fluvial), marinho (sedimentos), eólicos, gravitacionais (coluvião ou tálus).

Fortes e Ferreira (2018) afirmam que para um enfoque da engenharia civil o solo é estudado quanto ao seu comportamento hidráulico e/ou mecânico para uma dada obra geotécnica. Geralmente o estudo do comportamento hidromecânico dos solos é precedido por análises de suas propriedades como: granulometria, limites de Atterberg, massa específica, umidade, índice de vazios e grau de saturação. Quanto ao comportamento propriamente dito os estudos estão ligados aos seus objetivos situando-se geralmente nos campos da resistência, deformabilidade e fluxo.

As principais classificações dos solos adotadas na engenharia civil são:

- Sistema Unificado de Classificação de Solos — SUCS;
- Transportation Highway Research Board — TRB.

Estas classificações foram desenvolvidas em países de clima temperado, requerendo, muitas vezes, ajustes quando utilizadas em solos que foram formados em climas tropicais, como no Brasil. Embora estas classificações possam não representar bem os solos tropicais, cabe ao engenheiro geotécnico entender que existe a necessidade de ajustes e que estudos complementares devem ser feitos para adequar estas classificações à melhores estimativas dos comportamentos dos solos tropicais (Fortes e Ferreira, 2018).

Como exemplo, ao se obter o teor de umidade de um solo laterítico, que possui devido ao processo de formação, agregações e/ou microagregações, se está a determinar

a umidade que se encontra no interior dessas agregações e umidade a que se encontra entre elas e entre partículas independentes. Essa umidade no interior do agregado, no entanto, pode não estar influenciando diretamente no comportamento do solo, situação em que esta deve ser desconsiderada. Essa diferença pode interferir na própria classificação de um solo quando se busca classificá-lo, como por exemplo, pela carta de plasticidade (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021). Esse fenômeno é descrito por Balduzzi e Mayor (1981), em termos de limite de plasticidade, no qual o autor afirma que o valor pode ser elevado dependendo da forma de preparação da amostra.

Balduzzi e Mayor (1981) descrevem que um solo tropical se comporta melhor que um solo de clima temperado, possuindo maior ângulo de atrito, maior permeabilidade e menor compressibilidade. O autor associou a diferença de comportamento devido aos grãos finos de argila estarem aglomerados em estado poroso e firmemente cimentadas, proporcionando um baixo índice de plasticidade e propriedades geotécnicas de solos com granulação maior. Esse autor também aponta que para um mesmo valor de limite de plasticidade, solos tropicais se comportam melhor do que solos de zonas temperadas.

Assim com vistas ao melhor comportamento dos solos tropicais e buscando uma nova classificação para esses solos, Nogami e Villibor (1981) propuseram uma nova classificação para os solos tropicais, inicialmente visando à utilização em pavimentos rodoviários. Essa metodologia ficou conhecida como metodologia MCT, que diferencia o comportamento do solo em comportamento laterítico e comportamento não laterítico. Posteriormente Vertamatti (1988) propôs que nos ábacos apresentados por Nogami e Villibor fossem incluídos solos em processo de evolução, denominando-os de solos transicionais, pois ainda se encontrariam em processo de evolução, porque é uma classe de solo condizente com os solos sedimentares. Paula *et al.* (2020) fizeram a reclassificação de 37 amostras de solos do Distrito Federal, onde boa parte das amostras foi classificada como solo de comportamento laterítico, conforme a metodologia MCT. Com a reclassificação utilizando as premissas propostas por Vertamatti, os solos, antes classificados como de comportamento laterítico, passaram a ter um caráter transicional, ou seja, o solo ainda está em um processo de evolução genética, possuindo características de comportamento de um solo laterítico bem como características de comportamento de um solo não laterítico.

Posteriormente Villibor e Alves (2019) propuseram uma nova classificação para os solos tropicais incluindo solos de granulação grossa.

*Sobre a ótica da pedologia Birkeland (1974) citados por Oliveira & Monticeli (2018), define o solo como “material natural constituído de camadas ou horizontes de compostos*

*minerais e/ou orgânicos com variadas espessuras, diferindo do material original por propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas e por características biológicas. Os horizontes são inconsolidados, mas alguns contêm suficiente porções de sílica, carbonatos e óxidos de ferro para cimentá-los”, conferindo-lhes muitas vezes características de pseudo pré-adensamento”.*

Diante dessas três óticas de entendimento e classificação dos solos, observa-se a importância da classificação pedológica, que mostra atributos químicos, biológicos e mineralógicos, os quais permitem inferir diretamente o potencial de estabilização química de um solo. Somando esse conhecimento aos aspectos geológicos, os resultados poderão ser agrupados considerando a distância entre as sondagens e possibilitando uma melhor classificação quanto aos aspectos de engenharia.

O processo de intemperização dos solos tropicais é marcado pela alternância entre períodos de seca e períodos chuvosos e temperaturas mais elevadas. Como mostrado por Villibor e Alves (2019), os solos lateríticos, que são solos profundamente intemperizados, ocupam uma grande área no território brasileiro. Devido a esta grande ocupação, é necessária a busca do conhecimento de sua formação, de sua composição, do seu comportamento e sua possível utilização, seja na forma como encontrado na natureza, ou com adição de aditivos químicos, ou outras técnicas de estabilização.

## **2.2 Solos lateríticos**

Dutra 2014 define o solo laterítico como aquele que apresenta óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio resultantes do processo de intemperização. Já o processo de intemperização, que resulta na laterização ou latossolização, é processo de formação de um solo exposto por muito tempo em climas quentes e úmidos, onde ocorreu a remoção de íons básicos e da sílica, resultando em um solo rico em óxi-hidróxido de ferro e alumínio, no qual, provavelmente, ocorreu o fenômeno de bioturbação que atuou na pedolização, refletindo no material, geralmente, caracterizado por cores avermelhadas, pequenas diferenciações dos horizontes e baixa saturação por bases e presença de minerais do tipo caulinita e gibbsita (Lepsch, 2011). Cabe destacar que esses solos podem ainda apresentar cores amareladas em função de uma maior presença de alumínio e do hidróxido de ferro goethita.

Gidigasu (1976) afirma que existem estudos indicando que os solos lateríticos possuem características químicas, texturais e genéticas que indicam a possibilidade da estabilização química e mecânica. Os estudos têm tido como foco as características

genéticas, composição química, mineralógica e granulométrica do solo e o modo de preparação, dentre outros. Cabe destacar que, no Brasil, a grande maioria dos estudos voltados para a estabilização química dos solos tropicais se limita a analisar o comportamento mecânico do solo em laboratório, sem que se atente para as citadas características, assim como para a interação do solo estabilizado com o meio em que ele é inserido.

Villibor e Alves (2019) definem solos lateríticos como solos maduros, no qual a parte fina é enriquecida por óxi-hidróxidos de ferro e/ou alumínio com a presença do argilomineral caulinita.

Espindula *et al.* (2008) mostram que no campo da ciência do solo o termo “Latossolo” é utilizado para os solos profundos ou mantos espessos bem desenvolvidos.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBICS) apresenta a seguinte definição de latossolo:

São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Os solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo e têm capacidade de troca de cátions da fração argila baixa, inferior a  $17 \text{ cmolc kg}^{-1}$  de argila sem correção para carbono, comportando variações desde solos predominantemente caulíníticos, com valores de  $K_i$  mais altos, em torno de 2,0, admitindo o máximo de 2,2, até solos oxidicos de  $K_i$  extremamente baixos. Variam de fortemente a bem drenados, embora ocorram solos que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenada, o que é indicativo de formação em condições atuais ou pretéritas com um certo grau de gleização.

São normalmente muito profundos, sendo a espessura do solum raramente inferior a 1 m. Têm sequência de horizontes A, B, C com pouca diferenciação de sub-horizontes e transições usualmente difusas ou graduais.

São, em geral, solos fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou alumínicos. Ocorrem, todavia, solos com saturação por bases média e até mesmo alta. Esses últimos são encontrados geralmente em zonas (semiáridas ou não) que apresentam estação seca pronunciada, ou ainda que apresentam influência de rochas básicas ou calcárias.

Esses solos são típicos das regiões equatoriais e tropicais, ocorrendo também em zonas subtropicais, distribuídos, sobretudo, por amplas e antigas superfícies de erosão, pedimentos ou terraços fluviais antigos, normalmente em relevo plano e suave ondulado, embora possam ocorrer em áreas mais acidentadas, inclusive em relevo montanhoso. São originados a partir das mais diversas espécies de rochas e sedimentos sob condições de clima e tipos de vegetação os mais diversos.

Considerando a estabilização química, a classificação pedológica auxilia no agrupamento de solos com características pedologicamente semelhantes que exigirão, em princípio, a mesma quantidade de um determinado estabilizante. Assim, após os estudos pedológicos de um certo estabilizador para um determinado tipo de solo, poderá se ter, apenas, a identificação do tipo de solo somado com um mínimo de ensaios comprobatórios, podendo assim, reduzir os custos de ensaios (Gidigasú, 1976). Esse entendimento não prescinde evidentemente de estudos complementares específicos voltados para a definição mais completa do comportamento hidráulico e/ou mecânico do solo, conforme o caso.

SIBCS (2018) conceitua o latossolo como um solo em avançado estágio de intemperização. Com esta definição, pode-se utilizar para solos de textura franco-arenosa ou mais fina, a avaliação descrita para avaliar o estágio de intemperismo de solos de regiões tropicais, em função da relação silte/argila, para maior parte de solos no horizonte B. Assim, os solos mais intemperizados tenderão à relação silte/argila, a qual será menor que 0,7 para solos que apresentarem textura média ou menor que 0,6 na presença de solos que tenham a textura argilosa ou muito argilosa.

Portanto, para uma primeira análise dos solos, de uma forma mais simplificada, o triângulo textural pode ser utilizado para verificar em qual classe textural o solo se encontra e, posteriormente, se o solo for, conforme descrito anteriormente, de textura franco-arenosa ou mais fina, a relação silte/argila poderá ser um indicativo de estágio de intemperismo do solo. A Figura 2.1 nos mostra um triângulo textural, utilizado para esta primeira indicação da classe textural.

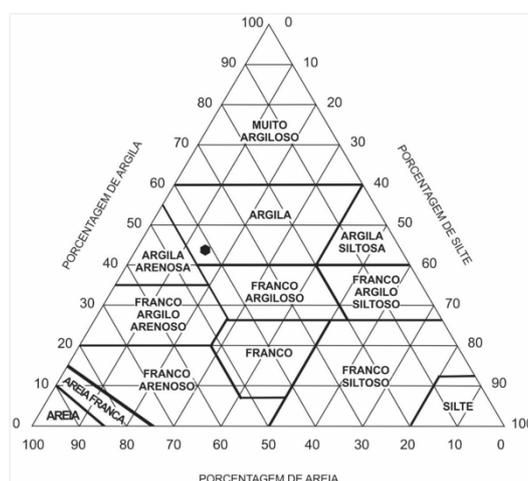


Figura 2.1– Triângulo textural (Molina Junior, 2017 citando Whiting *et al.*, 2011 e USDA, 2011).

O estudo da química, juntamente com o pH e o PCZ dos solos, pode auxiliar na compreensão dos fenômenos que ocasionam agregações/floculações e desagregações/dispersões em solos naturais e estabilizados, tais como mostram os estudos realizados por Rezende (2003).

Kiehl (1979), citado por Lima (2003), descreve a diferença do pH em KCl e o pH em água conforme a Equação 1. Os valores obtidos para  $\Delta\text{pH}$ , quando positivo, indicará a tendência mineralógica do predomínio de óxido de ferro e de alumínio bem como uma baixa quantidade de alumínio trocável. Entretanto, quando esse valor for negativo, indicará a tendência mineralógica de predomínio de argilas silicatadas e a presença de uma alta quantidade de alumínio trocável.

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

Alleoni *et al.* (2019) descrevem que quanto maior o grau de intemperização de um solo, mais o valor do ponto de carga zero, PCZ, se aproxima do pH medido em água ou em solução salina como o KCL. Esse autor também afirma que a forte microagregação é devido à ação cimentante dos óxidos de ferro nas argilas silicatadas formando os microagregados. Essa aglutinação faz com que a textura do solo se assemelhe à textura de uma areia, permitindo, assim, uma alta movimentação de água entre as camadas do solo. O fenômeno das agregações, praticamente, elimina as partículas de argila dispersa na água. Esse fenômeno se dá em consequência do balanço de cargas elétricas, devido à mineralogia oxidica do solo. A proximidade dos valores de pH e PCZ indicam que a soma das cargas das argilas dispersas em água é próxima a zero, e que poderá apresentar uma redução na carga superficial líquida, devido à diminuição na repulsão da dupla camada elétrica, provocando a floculação dos colóides. A carga superficial líquida é negativa, na maioria dos casos, podendo ocorrer a dispersão de maneira simétrica tanto no lado ácido como no lado alcalino.

Camapum de Carvalho *et al.* (2015) descrevem que a espessura da dupla camada difusa é responsável pelas forças de atração e repulsão e quando tem a contração da dupla camada difusa, ocorre a diminuição da força de repulsão, ocasionando a aproximação das partículas. Da mesma forma, ocorre o inverso, com a expansão da dupla camada, dando lugar ao afastamento das partículas.

Prado (2016) descreve, citando Parks & Bruyn (1962), que o PCZ é o valor de pH que proporciona carga superficial zero, quando se trata de um sistema reversível para dupla camada e que a argila poderá apresentar a máxima floculação no PCZ. O mesmo autor descreve que o teor de matéria orgânica pode diminuir o valor do PCZ do solo e afirma, também, que no horizonte B, o valor do PCZ pode aumentar os óxidos de ferro e alumínio por possuir níveis mais baixos de matéria orgânica. Este mesmo autor afirma que os cátions presentes em uma solução do solo serão atraídos pelas argilas silicatadas e o húmus presente no solo. Quando o  $\Delta\text{pH}$  é positivo, as argilas oxídicas que possuem cargas positivas, irão atrair os ânions, e estas mesmas argilas oxídicas estarão relacionadas com pH em KCl mais elevado.

De acordo com Arthur *et al.* (2013) *apud* Camapum de Carvalho *et al.* (2015), a adsorção de contaminantes é governada pela superfície específica e a agregação do solo, sendo que quanto menor a partícula, maior será sua área específica.

Alleoni *et al.* (2019) descrevem que devido às características mineralógicas dos solos altamente intemperizados, que têm como constituição os óxidos e caulinita, as cargas variam com o pH e com a solução iônica. Para um dado pH, a carga pode ser menor em uma solução mais diluída, do que em uma solução mais concentrada, fato que provavelmente pode ser atribuído às cargas encontradas na superfície dos óxidos de ferro e de alumínio bem como nas arestas da caulinita. O ponto e efeito salino nulo tendem a aumentar com a profundidade pelo fato de ocorrer a diminuição na concentração de matéria orgânica, fazendo com que a participação das cargas dos óxidos de ferro e alumínio seja maior. Em solos altamente intemperizados, quando  $k_i$  é próximo ao valor unitário, o ponto de efeito salino nulo tem uma boa correlação com o pH medido em solução de KCl 1 molL<sup>-1</sup>. Termodinamicamente, as reações no solo tendem a atingir equilíbrio, ou seja, o pH do solo, com o aumento do grau de intemperização, se dirige ao ponto de efeito salino nulo, no qual a carga líquida do solo é nula.

Em solos tropicais muito intemperizados, compostos por minerais de cargas variáveis o ponto de efeito salino nulo é muito próximo ao ponto de carga zero (Uehara e Gilman, 1980 citado por Camapum de Carvalho *et al.*, 2015). Uma estimativa do ponto de carga zero pode ser obtida pela Equação 2 (Keng e Uehara, 1974 citado por Camapum de Carvalho *et al.*, 2015):

$$PCZ = 2 \cdot \text{pH}_{KCL} - \text{pH}_{H_2O} \quad (2)$$

Prado (2016) afirma que quando o solo se encontra no PCZ, ou próximo a esse ponto, a floculação tenderá a ser máxima. Quando o pH do solo estiver mais alcalino ou mais ácido em relação ao PCZ, ocorrerá dispersão das partículas de argilas, devido à repulsão de cargas elétricas de mesmo sinal.

A norma DNER-ME 030/94 do Departamento Nacional de Infraestrutura do Transporte (DNIT), aponta os procedimentos para determinação da relação sílica-alumina ( $k_i$ ) e sílica-sesquióxidos ( $k_r$ ) em solo. Esses coeficientes são utilizados para descrição de classes de solos, bem como para diferenciar famílias de solos cauliniticos ( $k_r > 0,75$ ) e oxídicos ( $k_r \leq 0,75$ ), sendo que a relação sílica-alumina aponta os Argissolos ( $1 < k_i < 3,3$ ), os Cambissolos ( $k_i > 2,2$ ) e os Latossolos ( $k_i < 2,2$ ) (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Prado (2016) descreve que o coeficiente  $k_i$  é responsável por estimar estágios de intemperismo, nos quais a remoção da sílica do mineral da argila traduzirá a valores de  $k_i$  menores. O mesmo autor estabelece que para  $k_i > 2,0$ , tem-se baixa dessilicatização, associando a solos pouco intemperizados com presença de montmorilonita, illita e vermiculita que são argilas do tipo 2:1. Da mesma forma, o autor descreve que quando o  $k_i < 2,0$ , os solos são mais intemperizados e cauliniticos, devido à grande remoção do silício dos minerais de argila.

Para a obtenção do coeficiente  $k_i$ , devemos proceder conforme descrito na norma DNER-ME 030/94 do DNIT e, matematicamente, realizar o seguinte cálculo dado pela Equação 3:

$$k_i = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3} \times 1,7 \quad (3)$$

Da mesma forma para o coeficiente  $k_r$ , esta mesma norma estabelece o seguinte critério matemático dado pela Equação 4:

$$k_r = \frac{\%SiO_2/60}{\%Al_2O_3/102 + \%Fe_2O_3/160} \quad (4)$$

O pH do solo altamente intemperizado tende a se aproximar do ponto de efeito salino nulo, no qual ocorre a redução da carga superficial líquida, causando a diminuição da repulsão entre as duplas camadas elétricas das partículas de argila, que passam a

interagir livremente, ocorrendo assim a flocculação devido à atração por forças de van der Waals (Raiji, 1971 citado por Alleoni *et al.* (2019).

Segundo Mota *et al.* (2019) os solos ácidos contendo argila 2:1 têm como principal componente da acidez o  $Al^{3+}$ , diferente dos solos caulíníticos ácidos que têm como principal componente o hidrogênio como carga elétrica, dependente de pH. Os solos tropicais brasileiros têm a ação combinada de minerais silicatados e óxidos de ferro e alumínio, na qual a acidez se origina mais comumente pela presença do  $Al^{3+}$ . Quando ocorre o predomínio de óxidos de ferro e de alumínio ( $k_r > 0,75$ ), as cargas dependentes do pH têm como principal componente o hidrogênio. Nos solos ácidos, com exceção dos horizontes subsuperficiais, o pH em KCL é menor que o pH em água.

Collins *et al.* (1970), citado por Mota *et al.* (2019), mostram que o pH varia conforme as estações do ano mudam, e que este parâmetro tende a diminuir no verão. Foi constatado, também, que a variação do processo de secagem pode induzir uma variação no pH das amostras, chegando-se à conclusão de que o pH na umidade de campo é maior que o do solo seco ao ar, e este superior ao da amostra seca em estufa.

Em relação às variações sazonais de pH faz-se necessário atrelar certa importância no comportamento dos solos estabilizados quimicamente, devido às variações de pH da água proveniente das precipitações pluviométricas que se infiltram no solo. Coelho *et al.* (2016) mostram que a qualidade da água intervém nos resultados da compactação dos solos tropicais apontando para a possibilidade de ela intervir, igualmente, na compactação de solos quimicamente aditivados.

Bohn *et al.* (1979), citado por Mota *et al.* (2019), relaciona o progresso da evolução da acidez com o grau de intemperismo dos horizontes subsuperficiais dos solos tropicais e subtropicais. Os autores afirmam que em um processo de evolução incipiente os horizontes B e C são neutros a levemente alcalinos. Com intemperismo moderado, o horizonte B se torna levemente ácido, e o horizonte C é neutro a levemente alcalino. Já para o grau de intemperismo entre moderado e intenso, o horizonte B é fortemente ácido e o horizonte C é ácido. Com o grau intenso para o intemperismo, o horizonte B vai de neutro a levemente ácido, e o horizonte C é fortemente ácido. Já no último patamar apresentado pelos autores, com o grau de intemperismo muito intenso os horizontes B e C se apresentam levemente ácidos.

Segundo Mota *et al.* (2019), o ponto de carga zero é mais elevado devido ao aumento do grau de intemperismo, no qual as cargas dependentes do pH nos óxidos de ferro e alumínio serão dissociadas acima do qual o  $Al^{3+}$  já estaria hidrolisado. O poder

de tamponamento é menor em solos com elevado grau de intemperismo, o que indica um menor consumo de aditivo para alteração do valor do pH.

Sobre o ponto de vista do equilíbrio químico, a gibbsita é cerca de 42 vezes menos ativa que o alumínio amorfo e menos ativa que minerais silicatados. A gibbsita tem mais participação em baixas concentrações de Al, sendo adsorvido apenas em solos com altíssimo grau de intemperismo (Lindsay, 1979, citado por Mota *et al.*, 2019).

O parâmetro de capacidade de troca catiônica (CTC) e capacidade de troca aniônica (CTA) indicam, respectivamente, a máxima capacidade de adsorção de cátions e a máxima capacidade de adsorção de ânions de um solo. Os parâmetros CTC, CTA, juntamente com o ponto de carga zero (PCZ), podem indicar a maneira como o solo poderá se comportar (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Portelinha (2008), na conclusão do seu estudo, afirma que aumentos na CTC, durante a estabilização química, promovem a modificação de parâmetros do índice de plasticidade, granulometria, peso específico máximo e o pH dos solos estudados.

### **2.3 Estabilização química**

Por vários anos, a procura por estabilização do solo vem sendo estudada e seus mecanismo de estabilização vem sendo estudados e compreendidos. A estabilização química é uma técnica bastante utilizada há vários anos por, muitas vezes, não se encontrar um material *in natura* tecnicamente adequado para utilização, no qual os custos de transporte de insumos mais nobres tornariam, economicamente, inviáveis à realização dos serviços desejados. Soma-se a esses fatores descritos uma visão mais contemporânea, que é o custo ambiental de exploração de jazidas. Essas novas jazidas, muitas vezes, já se encontram engolidas por centros urbanos, bem como já podem fazer parte de áreas destinadas à reservas ambientais, que têm, agora, como principal objetivo, a preservação da nossa fauna, flora e recursos hídricos.

Assim, o conhecimento do solo e de seus processos de formação, bem como o entendimento da forma de atuação de aditivos químicos, quando utilizados nesses solos, são de suma importância na busca de uma economia, tanto financeira quanto ambiental, promovendo uma preservação de áreas que ainda não foram exploradas.

Esse trabalho terá como foco a estabilização química com a cal e o cimento, e mesmo com o curto espaço de tempo para ser desenvolvido, é muito importante que outros aditivos sejam citados e tenham o seu comportamento descrito.

A modificação e melhoria do comportamento do solo são bastante utilizadas há vários séculos, mesmo milênios, e têm como principal objetivo adequar essa matéria prima à obra de engenharia a qual se está executando. Essa modificação pode compreender alterações: nas características mecânicas, na qual se emprega uma determinada energia com a finalidade de densificar o solo, reduzindo sua porosidade e ampliando o contato físico entre as partículas do solo; nas características físicas, adicionando-se outros materiais, em menor ou maior quantidade, proporcionando uma melhor distribuição granulométrica em relação ao solo original e alterando, no caso dos solos contendo as frações silte e argila, sua classificação geotécnica; ainda na alteração das propriedades físicas ela pode se dar por meio da incorporação de fibras, objetivando o aumento da resistência à tração; nas características químicas, nas quais é adicionado algum aditivo químico que modifica, de alguma forma, as propriedades e o comportamento deste solo. Cabe destacar a possibilidade de inserção conjunta de mais de uma dessas alterações de características de modo a compatibilizar o comportamento do material melhorado com as necessidades de utilização.

Na presente pesquisa, será dada ênfase aos estudos realizados sobre estabilização química, com olhos nas análises voltadas para a utilização da cal e do cimento, buscando-se, ainda, apresentar uma pequena descrição dos materiais alternativos que hoje estão em estudo no Brasil.

Assim, Bezerra (1976) agrupou em seu estudo alguns aditivos químicos que podem ser utilizados em solos, relacionando-os com o efeito esperado na sua utilização. O autor então descreveu:

- Melhoradores de trabalhabilidade atuam na melhoria da trabalhabilidade, aumentando a densidade ou diminuindo a umidade ótima, reduzindo também a contração. Os principais aditivos são:
  - Cloreto de cálcio – substitui parte do cimento, reduzindo a contração em solos argilosos, com a desvantagem da perda de resistência;
  - Cinza Volante – melhor desempenho em solos granulares, perdendo sua efetividade com o aumento do teor de argila no solo;
  - Lignina sulfonada – atua na redução de água para compactação, reduzindo a contração e não afetando a resistência à compressão;
  - Cal – atua decrescendo o peso específico e aumentando o teor de umidade ótima. Ajuda na redução da contração, devido ao fenômeno de floculação e, geralmente, obtendo ganhos à resistência à compressão.

- Agentes Expansivos atuam na expansão da estrutura do solo, contrabalanceando os efeitos da contração de um solo. Os principais aditivos são:
  - Sulfato de cálcio – atua expandindo o solo durante o período de cura, reduzindo, assim, as contrações, devido à secagem ao ar. Sua utilização em determinados teores pode ocasionar a redução da resistência a compressão;
  - Sulfato de sódio – atua melhorando a contração e tem efeito benéfico no ganho de resistência, principalmente, em siltes e areias orgânicas;
  - Sulfato de magnésio – efetivo no controle da contração, não alterando a resistência à compressão.
- Retentor de umidade é utilizado para evitar a perda de umidade de moldagem do solo cimento. O Cloreto de sódio atua nessa função, porém reduz a resistência à compressão do solo cimento.

O conhecimento químico dos solos antes e durante a estabilização é de suma importância devido a fatores como reações químicas que irão ocorrer, tipos de solo, teor de estabilizante, teor de umidade e o tempo e tipo de cura (Rocha, 2016).

Gidigas (1976) afirma que a principal busca na estabilização química é melhorar a resistência do solo. Nesse contexto, esse autor apresenta, citando Yoder (1959), alguns aditivos estabilizadores indicando o comportamento esperado em função do tipo de estabilizante utilizado. Esse autor apresenta que os aditivos podem agir como agentes cimentantes, modificadores, agentes impermeabilizantes, agentes de retenção da água e agentes retardadores. As misturas com a ação cimentante são utilizadas em uma quantidade relativamente alta em relação ao peso e poderão ter como agentes os seguintes aditivos:

- cimento Portland, que terá como principal mecanismo de estabilização, sua hidratação e alguma modificação de minerais argilosos, podendo ser utilizado em solos arenosos e argilas;
- cal, como mecanismo terá a floculação e a mudança na película de água, sendo utilizado em materiais granulares e argilas;
- cal e cinza volante terão como princípio as ações pozolânicas na cal e sílica e algumas modificações nos minerais de argila, podendo ser utilizadas em materiais granulares e argilas;

- silicato de sódio terá como principal mecanismo a solidificação por gel, podendo ser utilizados em areias.

As misturas com ação modificadoras utilizam uma quantidade relativamente menor de produto estabilizante e poderão ter como agentes os seguintes aditivos:

- cimento Portland, agindo na modificação de argilas e na mudança na película de água, podendo ser utilizadas em melhorias de solos compondo estruturas de pavimento em rodovias existentes bem como em solos de jazidas, como as argilas;
- cal, agindo como modificador em minerais argilosos e alterando a película de água;
- betume, retardando a absorção de água, podendo ser utilizados em melhorias de rodovias existentes.

Utilizando como agentes impermeabilizantes, temos:

- betume, agindo no revestimento dos grãos do solo impedindo a entrada de água, podendo ser utilizados em solos arenosos e solos de baixa qualidades e argilas, cabendo destacar que o betume auxilia na mitigação de processos erosivos;
- membranas, prevenindo a movimentação da água e vapores de água, podendo ser utilizadas em solos que podem ser melhorados pela compactação. O autor também descreve que agentes para retenção de água, como o cloreto de cálcio e o cloreto de sódio, agentes retardadores que são compostos orgânicos catiônicos que alteram os minerais de argila, tornando-os hidrofóbicos e cita, também, outros agentes químicos que podem ser utilizados.

Os fenômenos químicos que ocorrem no solo para o entendimento do ganho de resistência nos solos são apresentados por Ingle (1961-1967), citado por Gidigas (1976). Os autores afirmam que a troca catiônica propicia uma maior resistência ao cisalhamento e age na diminuição da expansão. A flocculação gerada pelo aditivo químico confere resistência à dispersão ou ao cisalhamento devido à agregação de partículas formando grãos maiores e/ou mais fortes. Embora, muitas vezes, presentes nas concreções naturais, o fenômeno de carbonatação consiste em reações que podem ser eliminadas, intervindo pouco na resistência da mistura. A cimentação de sílica ocorre devido à presença de silicatos proveniente da degradação de minerais de argila em ambientes muito ácidos ou

alcalinos, sendo um processo geralmente lento. A cimentação ferruginosa ou aluminosa apresenta a presença de novas fases de aluminossilicatos.

Com a estabilização do solo com a cal, as trocas catiônicas que ocorrem de forma rápida podem alterar a granulometria do solo devido ao processo de agregação/floculação ou desagregação/defloculação, bem como modificar os limites de Atterberg, diminuir a variação volumétrica em um solo expansivo, reduzir a massa específica seca e aumentar o teor de umidade. Já o processo esperado, em longo prazo, é a formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratado, devido a reações pozolânicas. Essas reações, em longo prazo, são dependentes do pH do ambiente, reatividade do solo e de seus minerais constituintes (Brito *et al.*, 2017).

Na estabilização do solo com cimento, os silicatos de cálcio hidratados são os responsáveis pela resistência, na qual a alita fornece a resistência inicial e a belita, a resistência em longo prazo. A reação da portlandita, com materiais disponíveis no solo, poderá produzir silicatos amorfos cimentantes, contribuindo para o aumento da resistência e diminuindo os vazios. Em solos finos, poderá ocorrer o processo de agregação/floculação ou defloculação/desagregação em torno dos grãos de cimento onde serão ligados por cimentação (Lima *et al.*, 1993; Makusa, 2013; Mehta *et al.*, 1994, citado por Brito *et al.*, 2017).

Em um primeiro momento, ao se pensar na utilização de um aditivo químico, não seria errado esperar que as reações químicas ocorressem de forma rápida ou em um curto intervalo de tempo. Dependendo do tipo de solo e aditivo utilizado, essa afirmação de reação rápida pode até ter um certo sentido. Além das conhecidas reações pozolânicas que podem ocorrer, tem um sistema solo-cal ou solo cimento. Alguns estudos apresentam que a adição de um aditivo pode mudar as características de um solo, ao longo do tempo, devido à possibilidade de que, os elementos químicos deste aditivo, migrem ao interior de um agregado.

Essa afirmação é descrita por Camapum *et al.* (2021), que em seu estudo, descrevem que os solos tropicais profundamente intemperizados possuem agregados e microagregados, e que os produtos químicos utilizados para a estabilização química, seja a cal ou o cimento, não interagem imediatamente com o interior desses agregados. Com o tempo, parte do aditivo químico utilizado pode começar a interagir com os minerais presentes no interior dos agregados, nos quais as trocas iônicas, combinadas com a solubilização dos minerais constituintes do solo, podem alterar sua textura. Os mesmos autores descrevem também que a técnica adequada para estabilização química, é



fácil obtenção em laboratórios de solos. A Tabela 2.1 apresenta estes parâmetros com uma breve descrição incluindo a sua importância para a análise do comportamento do solo.

Tabela 2.1 – Parâmetros para análise de comportamento.

Parâmetro	Descrição
Granulometria	A análise granulométrica é uma importante forma de visualização da mudança da textura do solo. Muitos solos tropicais, em estado natural, podem conter agregações que podem ser quebradas com o uso do defloculante durante o ensaio. A utilização do aditivo químico, seja a cal ou o cimento, embora possa eventualmente contribuir para a destruição de agregados existentes no solo, tende a formar novas agregações facilmente visualizadas com a realização da curva granulométrica. A destruição dos agregados existentes, também poderá ser visualizada, caso ocorra.
pH	É um indicador de acidez no solo, fornecendo parâmetros de solubilidade e precipitação de minerais, bem como indicando um ambiente favorável para que ocorram as reações pozolânicas no solo. O pH pode ser obtido misturando o solo em água ou o solo com uma solução de KCl.
PCZ	Representa o valor de pH no qual a carga elétrica líquida é nula (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (2015)).
$\Delta$ pH	É um indicador de grau de intemperismo do solo, apontando para a predominância de argilas silicatadas ou predominância de óxido de ferro e alumínio no solo (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (2015)).
CTC	Representa a quantidade de cátions trocáveis que um solo pode adsorver (Teixeira <i>et al.</i> (2017). Pode ser medida em um meio alcalino (pH=10) e em um meio neutro (pH=7) (Delgado (2007)).
Limites de Atterberg	Com a adição da cal ou do cimento, é esperada a modificação do seu estado de plasticidade (Delgado (2007)).
DCTC	É a diferença do CTC medido em um meio alcalino e um CTC medido em um meio neutro. Tem alta relação com o critério de Thompson (1966) (Delgado (2007)).
Teor de Matéria Orgânica	O excesso de matéria orgânica poderá consumir o aditivo químico sem gerar as melhorias desejadas no solo.
Curva Característica	É caracterizada pela quantidade de água que um solo pode perder ou ganhar em função da sucção atuante (Delgado (2007)).
Saturação por bases	É um indicativo de grau de intemperização do solo (Delgado (2007)).
Relação sílica/sesquióxido e relação sílica/alumina	São coeficientes indicadores do grau de intemperismo de um solo tropical.

O TRB (1987) descreve que o pH do solo é uma das principais propriedades e características que influenciam a reatividade da cal em um solo sobre o aspecto da capacidade de produção de material cimentício. Outras propriedades e características descritas são: presença de carbono orgânico, carbonatos, sulfatos, ferro extraível, sódio em excesso, mineralogia do solo, grau de intemperismo, relação sílica sesquióxido e relação sílica alumina. Descreve também que a presença de sulfatos irá reagir com o cálcio e o carbonato, formando a etringita e taumasita, que além de serem materiais

expansivos prejudicariam a formação de reações cimentícias por diminuir o pH da mistura em que se encontram.

Portelinha (2008) concluiu que o aumento do pH nos solos estudados, devido à mistura do solo com a cal e de solo com o cimento, proporcionou a dissolução dos minerais da sílica e alumina presente no solo, levando, assim, à formação de produtos amorfos e cristalinos, produtos estes, oriundos de reações pozolânicas e reações cimentícias.

Segundo Cardoso (2002), citado por Delgado (2007), os limites de Atterberg, o grau de agregação e densidade dos grãos, dentre outros índices físicos, podem ser afetados teor de matéria orgânica presente no solo. Esses mesmos autores ao descreverem os critérios de avaliação de um solo, propostos por Catani *et al.* (1995), nos quais solos que proporcionem  $CTC < 4,62 \text{ cmol}_c/\text{kg}$  poderão ser considerados como solos de baixa capacidade de troca catiônica e que solos que apresentem CTC variando de 4,62 a 11,3  $\text{cmol}_c/\text{kg}$  poderão ser definidos como solos de média capacidade de troca catiônica.

A Tabela 2.2 apresenta as cargas elétricas de alguns minerais que possam estar presentes na fração argila do solo.

Tabela 2.2 – Cargas elétricas de minerais (Adaptado - Alleoni, 2002 citado por Prado, 2016).

Minerais	CTC permanente ( $\text{cmol}_c/\text{kg}$ )	CTC variável ( $\text{cmol}_c/\text{kg}$ )	CTC total ( $\text{cmol}_c/\text{kg}$ )	CTA ( $\text{cmol}_c/\text{kg}$ )
Montmorilonita	112	6	118	1
Vermiculita	85	0	85	0
Ilita	11	3	14	3
Caulinita	1	3	4	2
Gibbsita	0	5	5	5
Goethita	0	4	4	4

O pH tem é um fator muito importante na análise da estabilização química de um solo tropical, tendo em vista que na adição, seja da cal ou do cimento, ocorre um aumento do pH dessa mistura, proporcionando a solubilização de minerais presentes no solo. Essa solubilização, conforme descrito por Camapum *et al.* (2021), poderá fragilizar os agregados dos solos profundamente intemperizados que contenham gibbsita. Alleoni *et al.* (2019) afirmam que devido ao aumento do pH da solução do solo ocorre a elevação de cargas negativas do solo devido à presença de minerais de carga variável (hematita, goethita, gibbsita e caulinita).

## 2.4 Solo Cal

### 2.4.1 A cal

Guimarães (2002) afirma que a decomposição térmica (calcinação) de matérias primas com altos teores de carbonato de cálcio e/ou magnésio (calcários, dolomitos, conchas calcárias), produz a cal e o dióxido de carbono. O mesmo autor apresenta, em seu trabalho, os tipos de cales e os valores médios de suas propriedades. Esses dados com tipos de cales e composição média, são mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores médios da composição química das cales (Modificado – Guimarães, 2002).

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de não volátil (%)	MgO não hidratado (%)
Cal hidratada cálcica	70 - 74	0,1 - 1,4	0,5 - 2,5	0,2 - 0,8	23 - 27	1,5 - 3,5	0,1 - 0,0	96,0 - 98,5	0,5 - 1,8
Cal hidratada dolomítica	39 - 61	15 - 30	0,5 - 18,2	0,2 - 1,5	19 - 27	3,0 - 6,0	0,02 - 0,2	76 - 99	5 - 25

Balbo (2007) corroborando com Guimarães (2002) define a cal, como matéria prima rica em carbonato de cálcio, que quando submetido ao processo de calcinação produz o óxido de cálcio, conforme mostrado abaixo:



Balbo (2007) descreve também dois tipos de cales, sendo que a cal virgem é obtida de calcários com purezas elevadas, e a cal hidráulica é resultante da queima do calcário com uma pequena quantidade de argila gerando silicatos na forma de  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , e quantidades menores de ferroaluminatos e outros silicatos.

A norma DNIT 418/2019-EM define a cal virgem como produto, granular ou microgranular, resultante da calcinação do calcário, podendo conter naturalmente pequenas quantidades de óxido de magnésio. Essa mesma norma define a cal como produto fino, resultado da hidratação da cal virgem. A tabela 2.4, descrita por essa mesma norma, apresenta as características físico-químicas que as cales deverão atender. A armazenagem tanto da cal virgem ou da cal hidratada, deverá ser feita de forma que se minimize o contato com o ar. Essa norma, de certa forma, exclui a cal dolomítica para o

uso em estabilização, muito provavelmente, devido à diminuição das reações pozolânicas que podem ocorrer em longo prazo devido ao menor teor do íon de cálcio.

Tabela 2.4 – Característica físico-químicas das cales (DNIT 418/2019-EM).

Parâmetros Físico-químicos	Unidade	Cal Virgem	Cal Hidratada	Referência Normativa
Química				
Óxido total (CaO + MgO)t Base nãovolátil	%	≥ 90,0	≥ 90,0	NBR 6473
Óxido de Cálcio disponível (CaOdisp)	%	≥ 80,0	≥ 65,0	NBR 6473
Hidróxido de Cálcio Ca(OH) <sub>2</sub>	%	-	≥ 85,0	NBR 6473
Óxido de Magnésio (MgO)	%	≤ 5,0	≤ 5,0	NBR 6473
CO <sub>2</sub>	%	≤ 4,0	≤ 4,0	NBR 6473
SO <sub>3</sub>	%	≤ 2,0	≤ 2,0	NBR 6473
Umidade	%		≤ 2,0	NBR 6473
Reatividade com elevação da temperatura	minuto	$\Delta T 30^\circ \leq 10$ minutos	-	NBR 10790
Física (granulometria)				
Material passante em peneira 9,6 mm	%	100		NBR-9552 (CV)
Material passante em peneira 4,8 mm	%	100		NBR-9289 (CH)
Material passante em peneira 2 mm	%	≥ 90,0		NBR-9289 (CH)
Material passante em peneira 0,21 mm	%	≥ 70,0	≥ 98,0	NBR-9552 (CV); NBR-9289 (CH)
Material passante em peneira 0,075 mm	%	≥ 50,0	≥ 93,0	NBR-9552 (CV); NBR-9289 (CH)

#### 2.4.2 Mistura solo cal

Bezerra (1976), ao descrever um solo tratado com cal virgem, afirmou que, após a hidratação da cal, ocorre melhoria na trabalhabilidade e o comportamento mecânico de solos problemáticos, nos quais ocorrem duas razões principais no sistema solo-cal: o fenômeno de troca catiônica, o qual promove a floculação e a aglomeração dos solo, melhorando a trabalhabilidade; e as reações pozolânicas que ocorrem em longo prazo, devido aos compostos cimentícios produzidos, contribuindo, assim, para resistência do solo.

Aflitos (1981), citando Townsend *et al.* (1969), mostrou em seu trabalho que a reatividade do solo à cal, pode ser reduzida pela presença dos sesquióxidos. O autor afirma também que a sílica e a alumina presentes no solo são benéficas e promovem as reações de estabilização.

Ainda no estudo de Aflitos (1981), citando Queiroz de Carvalho (1979), afirmou que para solos lateríticos estudados no Nordeste, durante a estabilização com a cal, que não foi possível estabelecer estatisticamente, a significância da reatividade da cal com os solos estudados, com os limites de Atterberg, com o teor de argila, com a massa específica aparente seca, com os teores de sílica, alumina e óxido de ferro, dentre outros. Porém esse mesmo autor afirmou que foi determinada, para os solos estudados, uma relevante correlação estatística, em termos de reatividade do solo com a cal, com o teor de sílica amorfa (sendo este em maior relevância), com o teor de alumina presente na fração argila (cristalina e amorfa), pH, capacidade de troca catiônica (CTCpH<sub>10</sub> e CTCpH<sub>7</sub>).

Uma das primeiras constatações que se obtém, ao se observar um solo fino quando se adiciona um determinado teor de cal é, de uma forma generalizada, a melhoria trabalhabilidade, no índice de plasticidade e uma redução na variação volumétrica.

TRB (1987) e Dalla Rosa (2013) descrevem as propriedades e as características de solos tratados com cal. Tais propriedades e características são dependentes do tipo do solo, tipo e teor de cal utilizado, condição e tempo de cura, temperatura e umidade.

Bhattacharja *et al.* (2003) descreve que a temperatura é um agente que melhora a reação química, fazendo com que ocorra um melhor desenvolvimento no incremento da resistência do solo estabilizado com cal.

A avaliação da durabilidade de um solo tratado com cal pode ser avaliada por ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e descongelamento, bem como devido a ataques químicos (Bhattacharja *et al.* (2003)). Esse mesmo autor afirma que para solos tratado com cal, não existe ensaios normatizados.

Delgado (2007) afirma que não se pode prever precisamente o quão um determinado solo será reativo, analisando-se apenas um parâmetro. A mesma autora afirma que o tipo de processo predominante no intemperismo influencia no potencial de reatividade do solo com a cal e que para solos de clima tropical e subtropical se faz necessário o aumento no teor da cal, quando comparado a solos de clima temperado.

Osula (1991) afirma que a finalidade da cal é modificar as propriedades do solo, no qual esse solo possa ser utilizado com esta modificação ou, após essa modificação, que possa ser estabilizado com cimento ou até mesmo betume. Descreve também que, quando se adiciona a cal em um solo, com a presença da água ocorre o aumento do pH do solo, devido à dissociação da cal hidratada em íons Ca<sub>2</sub><sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>. Assim, pode ocorrer que o excesso de íons de Ca<sub>2</sub><sup>+</sup> substitua outros cátions presentes no solo ou seja absorvido pelo solo, caso haja ânions disponíveis na superfície das partículas de solo, sendo esses dois processos denominados de troca catiônica. Esse autor, citando O'Flaherty (1974), afirma

que a floculação se faz pela troca catiônica ou devido ao excesso de íons de  $\text{Ca}^{2+}$  nas superfícies das partículas do solo, fazendo com que ocorra a diminuição do potencial zeta. Já a aglomeração é resultado da atração de outras partículas com carga negativa, sendo atraída por essas partículas com excesso de cargas positivas.

Como já descrito anteriormente, ao longo dos anos a cal foi utilizada para melhorar a plasticidade e a trabalhabilidade dos solos, e alguns estudos tiveram como principal objetivo estabelecer metodologias para dosagem do teor de cal ao solo.

Portelinha (2018) afirma que algumas propriedades do solo são alteradas quando se adiciona a cal ao sistema, porém nem todos os solos obtêm ganhos de resistência e durabilidade. A granulometria é modificada pela natureza físico-química das reações, proporcionando a aglomeração e floculação de partículas finas devido às reações catiônicas. Esse mesmo autor relata que a variação da plasticidade é dependente do tipo de solo, quantidade de cal, do tempo e da condição de cura em que a mistura solo cal foi submetida. Citando Hilt e Davison (1960), esse autor descreve que o limite de plasticidade de um solo argiloso aumenta quando se adiciona cal, sendo mais acentuado em solos com presença de montmorilonita e menos acentuados em solos com presença de caulinita. Assim, descreve o ponto de fixação da cal (Lime Fixation Point – LFP), como o ponto no qual se adiciona cal ao solo, ocasionando a melhoria da trabalhabilidade sem gerar incrementos de resistência ao solo. Acima desse ponto, LFP, o solo ganharia resistência sem ter a trabalhabilidade e o índice de plasticidade modificado.

Bessaim *et al.* (2018) ao estudarem adição de cal virgem a um solo argiloso, descrevem que a primeira reação que acontece ao se adicionar uma cal virgem ao solo, é a sua hidratação, sendo essa reação, uma reação que gera calor. Após a hidratação, ocorre a dissociação da cal, promovendo a elevação do pH do sistema solo cal. Outra consequência da dissociação é a elevação na concentração dos íons de cálcio na água dos poros do solo, proporcionando a possibilidade da troca catiônica e possíveis reações pozolânicas. Com a troca catiônica, os autores descrevem que, devido à concentração dos íons de cálcio, ocorre a redução da dupla camada nas partículas de argila, proporcionando, também, a substituição dos cátions trocáveis presentes no argilo mineral, melhorando, assim, os parâmetros obtidos por intermédio dos limites de Atterberg. Além da melhoria desses parâmetros, a distribuição granulométrica também sofre alteração. Com o aumento do pH, ocorre então a dissolução dos aluminossilicatos presentes nos argilominerais, que proporcionará uma reação pozolânicas ao longo do tempo, e essa reação, só ocorrerá se o pH for mantido entre 12,4 e 12,6 ao longo do tempo.

Vários estudos mostram que a adição da cal ao solo promove uma diminuição no peso específico aparente seco e um aumento no teor de umidade (Ferro 1976, Portelinha 2008).

Consoli (2009) afirma que várias metodologias de estabilização foram apresentadas. Essas metodologias buscam determinar a quantidade necessária de cal para que se possa ter uma melhor característica dos solos, bem como resistência e durabilidade para o uso a que se propõe.

As metodologias mais consagradas que serão apresentados a seguir, estabelecem uma quantidade de cal, que apenas satisfaz quimicamente a necessidade do solo, podendo servir de base para uma dosagem inicial, na qual a dosagem final seria estabelecida criteriosamente para cada obra, tendo em vista à resistência a ser requerida e sua durabilidade.

Assim, os métodos mais consagrados são apresentados, com um resumo do principal objetivo a ser atingido por cada método.

- Eades & Grim (1966) apresentaram o “Método do pH”, que consiste em ir adicionando cal ao solo até que o valor de pH medido atinja 12,4;
- Rogers *et al.* (1997) apresentaram o “Método do ICL” (*Initial Consumption of Lime*). Essa metodologia define como teor de cal, a quantidade necessária para proporcionar o valor do pH em um nível máximo e constante. Essa metodologia é decorrente dos estudos de Eades & Grim, citado anteriormente.
- Hilt & Davidson (1960) estudaram e apresentaram o método *Lime Fixation Point*, no qual a trabalhabilidade máxima obtida pela adição da cal é o teor mais adequado. É fundamentado no limite de plasticidade e o teor de cal adicionado não ocasiona grandes ganhos de resistência.
- Thompson (1966) apresentou estudos, definindo o “Método de Thompson”. Esse estudo define a reatividade do solo quando se adiciona a cal, devido ao aumento na resistência, há compressão simples em pelo menos 345 kPa.

No Brasil, para a área de pavimentação, DNIT editou uma norma DNIT 419/2019-ME. Essa norma descreve a metodologia para a determinação do teor mínimo de cal para estabilização química de solo. O conceito utilizado pelo DNIT é exatamente o método proposto por Eades & Grim (1966), no qual se busca o teor de cal para atingir um pH de 12,4, estabilizando este solo físico-quimicamente. Existe uma observação descrita nessa

norma, a qual esclarece que em alguns solos tropicais residuais, a condição de pH no valor de 12,4 poderá não ser atingido, devido a tais solos serem ricos em óxi-hidróxido de ferro e alumínio.

TRB (1987), apresentando os estudos de Harty (1970), mostrou que existem limitações no método proposto por Eades & Grim, afirmando que a metodologia não fornece parâmetro sobre a reação da cal com o solo, não sendo possível avaliar a resistência gerada. Assim sendo, os próprios autores do método do pH, reconheceram que o método é uma referência inicial e que os ganhos de resistência devido às reações pozolânicas, estudos de ganho de resistência deverão ser estudados após a dosagem inicial.

## 2.5 Solo cimento

### 2.5.1 O cimento

Gurjão (1994) apresenta que a utilização do solo cimento se deu originalmente para construção de estradas, e no ano de 1915, nos Estados Unidos, foi apresentado pelo engenheiro Bert Reno e, posteriormente, em 1933, aceito pelos entes governamentais para serem utilizados em todo país.

A norma DNER-EM 036/95 descreve a especificação para a aceitação do cimento Portland para a utilização em obras rodoviárias. A Tabela 2.5 apresenta os principais teores de componentes para cada tipo de cimento Portland.

Tabela 2.5 – Componentes para cada tipo de cimento Portland (DNER-EM 036/95).

Teores dos componentes de cimento Portland					
Siglas	Classes de resistência	Componentes (%)			
		Clínquer + Sulfatos de cálcio	Escória de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP I	25 - 32 -40	100	-	-	-
CP I - S	25 - 32 -40	99 - 95	1 - 5	1 - 5	1 - 5
CP II - E	25 - 32 -40	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10
CP II - Z	25 - 32 -40	94 - 76	-	6 - 14	0 - 10
CP II - F	25 - 32 -40	94 - 90	-	-	6 - 10
CP III	25 - 32 -40	65 - 25	35 - 70	-	0 - 5
CP IV	25 - 32	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5
CP V -ARI	-	100 - 95	-	-	0 - 5

Bhattacharja *et al.* (2003) apresenta que o cimento Portland é fabricado pela moagem do clínquer, sendo um produto composto do silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) e tetra-cálcio aluminoferrita (C4AF). A notação utilizada na química do cimento simplifica a notação de alguns compostos, sendo C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e F= Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Balbo (2007), citando Petrucci (1971), definiu o cimento Portland como um material pulverulento, que tem em sua constituição silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem presença da cal livre, que quando hidratado, adquire elevada resistência, possuindo a cor cinza.

Balbo (2007) e Portelinha (2008), citando Metha e Monterio (1994), descrevem algumas características dos principais componentes presentes no cimento Portland:

- C3S ou alita – (3 CaO.SiO<sub>2</sub>) – é o composto que defini o início da pega e é responsável pelo desenvolvimento da resistência nas idades iniciais, libera grande calor durante a hidratação e é responsável pelo fornecimento de 40% em massa do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>);
- C2S ou belita– (2 CaO.SiO<sub>2</sub>) – é quem fornece ganhos de resistência em idades avançadas, com baixa liberação de calor durante a hidratação e é responsável pelo fornecimento de 18% em massa do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>);
- C3A – (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – reage nos minutos iniciais, tendo a pega quase que instantânea, endurecendo na presença de umidade do ar, promovendo pouco ganho de resistência, gerando um grande aumento no calor de hidratação e apresentando forte retração;
- C4AF ou ferrita – (4 CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – de rápida hidratação e pega rápida, propiciando um lento e pequeno ganho na resistência, possuindo boa resistência ao ataque por sulfatos.

Portelinha (2008), citando Metha e Monteiro (1994), apresentou em seu trabalho faixas dos componentes básicos do cimento Portland. Essa faixa potencial de composição é mostradas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6– Componentes básicos do cimento Portland (Metha e Monteiro, 1994 citado por Portelinha, 2018).

Componente	Proporção (%)
3 CaO.SiO <sub>2</sub>	35 - 65
2 CaO.SiO <sub>2</sub>	10 - 40
3 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 15
4 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 15

### 2.5.2 Mistura solo cimento

Bezerra (1976) disserta que o aumento de resistência é o principal objetivo ao se adicionar cimento ao solo, e que quanto maior a quantidade desse aditivo, maior será sua resistência, tendo maior efetividade a utilização do cimento de alta resistência inicial, quando comparado ao cimento comum. Esse mesmo autor também afirma que, da mesma forma que ocorre com a cal, a adição de cimento ao solo laterítico promove uma redução no limite de liquidez ( $w_L$ ) e um decréscimo no índice de plasticidade ( $I_P$ ). A diminuição no índice de plasticidade ( $I_P$ ) ocorre de maneira mais acentuada em solos lateríticos estabilizados com cal, quando comparado aos mesmos solos lateríticos estabilizados com cimento.

Basso *et al.* (2003) descrevem que na utilização do cimento como aditivo, o pH da mistura tem uma importância muito grande, pois o gel de silicato de cálcio hidratado (C3S2HX) é formado pela hidratação do silicato tricálcico (C3S), em soluções com pH variando de 12,20 a 12,34. O gel de silicato de cálcio hidratado (C3S2HX) também poderá ser formado pela hidratação do silicato bicálcico (C2S), contudo em ambientes cuja solução atinja o pH igual a 11. Entretanto caso ocorra a redução do pH da mistura o gel de silicato de cálcio hidratado (C3S2HX) deixa de ser estável promovendo seu consumo e a consequente formação do silicato de cálcio hidratado (CSH). O autor afirma que o silicato de cálcio hidratado (CSH) é um composto mais fraco que o gel de silicato de cálcio hidratado (C3S2HX).

As principais reações que ocorrem no sistema solo cimento conforme Bezerra (1976), Bhattacharja *et al.* (2003) e Basso *et al.* (2003), estão descritas a seguir:

- Reações de hidratação do silicato tricálcico presentes cimento:
  - $C3S + H_2O = C3S2HX$  (gel hidratado) +  $Ca(OH)_2$
  - $C2S + H_2O = C3S2HX$  (gel hidratado) +  $Ca(OH)_2$
  - $Ca(OH)_2 = Ca^{++} + 2(OH)^-$

- Reações entre a cal gerada na hidratação do cimento com os argilominerais presentes no solo (reações pozolânicas):
  - $\text{Ca}^{++} + 2(\text{OH})^- + \text{SiO}_2$  (sílica do solo) = CSH
  - $\text{Ca}^{++} + 2(\text{OH})^- + \text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina do solo) = CAH
  
- Se ocorrer queda no pH da mistura, a reação caminha no seguinte sentido:
  - $\text{C}_3\text{S}_2\text{HX} = \text{CSH} + \text{cal}$

Bhattacharja *et al.* (2003) afirma que as duas fases do silicato, C3S e C2S, são as mais importantes quando observadas no contexto da floculação e na troca catiônica, por requerer um suprimento de cálcio.

É importante ressaltar, conforme já descrito anteriormente, quando foi apresentada a estabilização química com a cal, que o solo pode ser modificado primeiramente com a cal para posteriormente ser aditivado com cimento (Osula 1991). Essa modificação pode ser entendida como uma forma de se evitar a queda do pH do sistema solo cimento, evitando, assim, a formação de um produto cimentício mais fraco.

Ao se observar as reações químicas geradas no sistema solo cimento, Basso *et al.* (2003), citando Croft (1967), afirmam que é possível verificar que o consumo da cal, gerada pela hidratação do silicato tricálcico presente no cimento e pelos argilominerais presentes no solo, poderá abaixar o valor do pH da solução ocasionando, assim, a formação de um agente cimentante mais fraco e a perda de um agente cimentante mais forte. Esse tipo de reação é mais pronunciado em solos mais reativos e argilosos.

Uma importante constatação, quando se analisa os estudos de Bhattacharja *et al.* (2003) e Basso *et al.* (2003), é que os autores descrevem a reação química quando se adiciona cimento no solo. A hidratação do silicato dicálcico (C2S) e do silicato tricálcico (C3S) resultará na formação do silicato de cálcio hidratado (C3S2HX) que é atribuído ao desenvolvimento da resistência do solo, bem como resultará na formação de um subproduto, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>).

Em um solo argiloso com presença de sílica e alumina, e com condições ideais de pH, ocorrerá a solubilização da sílica (SiO<sub>2</sub>) e a solubilização da alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) presentes no solo. Assim, esse material solubilizado irá reagir com o hidróxido de cálcio

(Ca(OH)<sub>2</sub>) formado, gerando novas reações de cimentação, formando CSH e CAH respectivamente, que por consequência ajudará no ganho de resistência.

Analogamente, pode-se entender que é esse fenômeno que ocorre ao se adicionar a Cal (CaO) ao solo com presença de sílica e alumina. O controle do pH é importantíssimo para que seja promovida as reações pozolânicas, que não são imediatas, que promoverão ganhos de resistência ao sistema solo-cal, ao longo do tempo.

Chadda (1971), citado por Aflitos (1981), Gurjão (1994), Macêdo (2004), Basso *et al* (2015), Sales (2017) desenvolveu um método para a determinação do teor de cimento que atenda às condições físico-químicas do solo. Essa metodologia é um método rápido, no qual ocorre a iteração elétrica entre as partículas de cimento, que possuem o comportamento de partículas carregadas eletricamente, e as partículas argilosas do solo, ocasionando o aumento da condutividade elétrica dessa mistura de solo cimento. Com a iteração dos coloides da argila do solo, com a hidratação do cimento ocorre uma variação volumétrica da mistura suspensa em água, em que a maior variação volumétrica indica o teor de cimento a qual a mistura será mais estável (DNIT 414/2019 – ME).

Basso *et al.* (2003), citando Chou (1977), afirmam que o teor de cimento varia com devido à quantidade do teor de silte e de argila presente no solo, e que para um mesmo solo o aumento do teor de cimento resultará em uma mistura mais durável e resistente. Os mesmos autores afirmam que qualquer solo poderá ser aditivado com cimento, porém o teor poderá ser elevado e não ser a solução mais econômica. Afirma também que solos granulares apresentam maiores resistência quando comparado a solo argiloso, consumindo, inclusive, menores quantidades de cimento.

Da mesma forma que acontece com o sistema solo cal, Bhattacharja *et al.* (2003), descreve que a temperatura é um agente que melhora a reação química, fazendo com que ocorra um melhor desenvolvimento no incremento da resistência do solo estabilizado com cal.

A avaliação da durabilidade de um solo cimento pode ser avaliada por ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e descongelamento, bem como devido a ataques químicos Bhattacharja *et al.* (2003). Para solo cimento, existe uma serie de ensaios, que podem avaliar o quesito durabilidade, no qual o solo cimento será avaliado em ciclos de umedecimento e secagem, ASTM D 559-93, e avaliado em ciclos de congelamento e descongelamento, ASTM D 560-93.

A norma DNER-ME 203/94 editada pelo DNIT descreve a forma para que se possa avaliar a durabilidade da mistura solo cimento por intermédio da determinação da perda por massa de corpos de prova em ciclos de secagem e umedecimento.

Como mostrado anteriormente, durante a hidratação do cimento ocorre a liberação do hidróxido de cálcio, gerado pela reação do C3S e o C2S com a água. Assim o hidróxido de cálcio começa a interagir com as partículas de argila, proporcionando os fenômenos de troca catiônica, carbonatação flocculação e, inclusive, alterando o pH dessa mistura (Portelinha 2008). Esse mesmo autor, citando Ferraz (1994), discorre que essa reação dos produtos de hidratação do cimento com o solo argiloso pode ocasionar a queda do pH da mistura, afetando diretamente a hidratação e o endurecimento do cimento, induzindo, assim, formação do CSH, que é um produto cimentício mais fraco. O autor mostra que a presença do CSH é benéfica ao sistema, quando essa reação ocorre entre a cal e a sílica, ou seja, em ambientes de pH elevado. Assim, o autor conclui que na mistura de solo cimento, quando em um ambiente com o pH adequado, tem-se que a maior parcela que promove a cimentação e a resistência da mistura é fornecida pelas reações de hidratação do cimento. Quanto mais fino o solo e mais reativo, a resistência será de reações pozolânicas entre o solo e a cal em detrimento da cimentação, propriamente dita.

# CAPÍTULO III

---

## 3 METODOLOGIA

O estudo foi fundamentado em revisão bibliográfica buscando-se fazer um elo entre materiais usados, condições de estudo e os resultados apresentados considerando solos tropicais com diferentes especificidades de cunho químico-mineralógico e físico. No levantamento das informações existentes, buscou-se utilizar trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos publicados em eventos e periódicos que tivessem por foco a estabilização química.

Dessa forma, foi realizada uma pesquisa nos repositórios utilizando-se palavras chaves, tais como: cal; solo cal; cimento; solo cimento; estabilização química; solos tropicais. O resultado da busca de cada texto foi analisado com o objetivo de verificar se era adequado para a pesquisa. Buscou-se, também, variar as regiões dos estudos considerados de modo a se ter uma maior diversidade de propriedades dos solos analisados, visando contemplar uma maior contribuição em nível de diferentes tipos de solos tropicais. Da mesma forma, foi realizada a busca por artigos no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), em busca de trabalhos disponíveis relacionados com o tema.

Durante a leitura dos trabalhos, eram observadas as citações neles contidas e, quando um determinado trabalho citado se mostrava adequado para a pesquisa, realizava-se a busca do material no Portal de Periódicos da Capes, com a finalidade de se encontrar mais dados que conduzissem a melhor entendimento.

Pode-se afirmar que se trata de uma busca quase que sem fim, pois cada trabalho lido apresentava citações de interesse, que uma vez lidos reportavam a mais estudos voltadas para a estabilização química e assim por diante. Assim, devido ao curto tempo destinado para a realização desse trabalho, essa busca teve que ser limitada, com o objetivo de se ter uma melhor qualidade de entendimento e análises dos trabalhos que serão apresentados a seguir.

No levantamento das informações existentes sobre os estudos buscou-se encontrar informações sobre:

- a localização do solo objeto do estudo, buscando evidenciar sua origem, formação geológica, geomorfológica e particularidades quanto ao clima;

- as propriedades químico-mineralógicas;
- as propriedades físicas;
- curvas características e quando de suas inexistências se buscou estimá-las a partir da textura;
- as características físicas do solo em estado natural;
- os tratamentos a que se submeteu o solo na fase de preparação de amostras;
- As características do solo compactado e da técnica de compactação utilizada na preparação dos corpos de prova destinados aos diferentes ensaios;
- as condições de cura;
- as características dos corpos de prova quando de suas preparações e quando dos ensaios, em especial índice de vazios e umidade;

Embora esse fosse o nível de informação desejado para esta pesquisa, já se sabia de antemão que dificilmente se conseguiria todos eles sobre um mesmo solo, no entanto, são esperados, a partir da conjunção entre eles, chegar-se a um mais completo entendimento sobre a estabilização química dos solos tropicais.

### **3.1 Estudos de solos aditivados com cal**

A Tabela 3.1 apresenta os trabalhos que foram utilizados, com a finalidade de reanalisar os dados disponíveis sem qualquer demérito dos estudos anteriormente realizados.

Aqui será feita uma breve descrição dos estudos que balizaram essa pesquisa e no próximo capítulo será feita a apresentação dos resultados encontrados, fazendo-se um agrupamento com sua localização, classificação, dados químicos, físicos e mineralógicos dos diversos solos analisados, realizando-se uma releitura dos dados apresentados.

Tabela 3.1 – Solos estabilizados com cal.

Título	Autor	Ano	Tipo	Publicação
A influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil.	Areobaldo Oliveira Aflitos	1981	Dissertação de mestrado	Universidade Federal da Paraíba
A influência da cal nas propriedades de engenharia de solos lateríticos.	Jose Geraldo de Oliveira Ferro	1976	Dissertação de mestrado	Universidade Federal da Paraíba
Influência da área específica na atividade pozolânica do sistema solo laterítico-cal.	Gelmires de Araujo Neves	1989	Dissertação de mestrado	Universidade Federal de Campina Grande
<i>Key parameters for the strength control of lime stabilized soils.</i>	Nilo Cesar Consoli; Luizmar da Silva Lopes Jr.; Karla SalvagniHeineck	2009	Artigo	Journal of Materials in Civil Engineering
<i>Lime modification of problem laterite.</i>	Douglas O.A. Osula	1991	Artigo	ElsevierSciencePublishers B.V
<i>Effect of quick lime on physicochemical properties of clay soil.</i>	Mohammed Mustapha Bessaim, AichaBessaim, HanifiMissoum, Karim Bendani	2018	Artigo	MATEC Web o Conferences
Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária.	Anna Karina Chaves Delgado	2007	Tese de Doutorado	Universidade de Brasília

### 3.1.1 A influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil

Aflitos (1981) estudou cinco solos lateríticos situados na região Norte e Nordeste do Brasil. Esse estudo desenvolvido na Universidade Federal da Paraíba, hoje, Universidade Federal de Campina Grande, buscou entender a influência de aditivos químicos em propriedades do solo.

Os aditivos utilizados nesse estudo foram:

- Cloreto de sódio (NaCl);
- Hidróxido de sódio (NaOH);
- Cal;
- Cal com traços de NaOH;

Para os solos estudados com o aditivo Cal, o autor conclui que ocorreram mudanças na plasticidade do solo, nas quais o limite de liquidez não apresentou tendência de comportamento uniforme entre os solos e o limite de plasticidade sofreu um aumento. Promoveu de uma forma geral uma redução na massa específica seca e uma elevação na umidade ótima de compactação. O aditivo promoveu uma resistência à imersão em água. Para os teores utilizados do aditivo, verificaram-se ganhos nas resistências incrementais com o teor de cal da mistura

Para os solos tratados com hidróxido de sódio, os limites de Atterberg mostraram um comportamento que sugere a desagregação do solo. Não houve variação significativa na massa específica seca e houve incremento de resistência com o aumento do teor do aditivo.

Já os solos tratados com cloreto de sódio não apresentaram variações definidas para os limites de Atterberg, não promovendo uma tendência de modificação na massa específica seca. Porém, ocorreu uma tendência na elevação no teor ótimo de umidade.

Quando os solos foram tratados com traços de hidróxido de sódio e com a cal foi verificado que a massa específica seca, quase não foi modificada, proporcionando também uma elevação na resistência desse solo tanto para períodos curtos de cura quanto para períodos longos, e a principal conclusão do autor foi que o traço de hidróxido de sódio adicionado junto com a cal, acelerou as reações químicas dos solos.

Os solos estudados pelo autor, com a transcrição de sua localização, formação geológica e pedológica, foram:

- TEPB – Solo da jazida de Teixeira no estado da Paraíba, localizado no Município de Teixeira-PB, bordo esquerdo da Rodovia PB-306, a 8 km deste, formação geológica da Serra Martins/terciário, com classificação pedológica REC3 (Regosol Eutrófico e Solos Leitólicos Eutróficos), com textura arenosa;
- CTPB – Solo da jazida de Cuité no estado da Paraíba, localizado no Município de Cuité-PB, bordo direito da rodovia PB-149, a 700m deste, formação geológica da Serra Martins/terciário, com classificação pedológica LVel (Leatrol Vermelho Amarelo Estrófico) Textura Argilosa;
- ARPB – Solo da jazida de Areia no estado da Paraíba, localizado no Município de Remígio-PB, bordo esquerdo da rodovia PB-079, a altura do km 45, formação geológica Pré-Cambriano. Apresentando na Paraíba

Gnaisses e Micromatitos e classificação pedológica PE13 (Textura argilosa e Solos Litólicos Eutróficos de Textura Média);

- CAPI – Solo da jazida de Castelo no estado do Piauí, localizado no Município de Castelo-PI, bordo direito da Rodovia de acesso à cidade, a altura do km 5, com formação geológica Cabeças/Devoniano Médio a Superior e classificação pedológica AQ5 - Areias Quartzosas e Solos Litólicos;
- MOPA – Solo da jazida de Mosqueiro no estado do Pará, localizado no Ilha de Mosqueiro-PA, bordo direito da rodovia PA-17, a altura do km 35, com formação geológica Barreiras/Terciário e classificação pedológica LA3 - Latossolo Amarelo Distrófico e Areias Quartzosas Distróficas.

### **3.1.2 A influência da cal nas propriedades de engenharia de solos lateríticos**

Ferro (1976) estudou três solos do estado da Paraíba, no qual utilizou dois tipos de cales, sendo uma cal calcítica e a outra cal dolomítica.

Em seu estudo, o autor buscou analisar os efeitos dos aditivos nos limites de Atterberg bem como seus efeitos sobre o CBR em amostra sem cura e com cura e imersão. A resistência à penetração de cone dos três solos também foi avaliada.

O autor conclui que, diferentemente do que deveria acontecer com solos de clima temperado, onde o limite de plasticidade aumenta até o chamando ponto de retenção da cal, para os solos estudados, ocorreu a diminuição deste parâmetro.

Já nas propriedades de compactação, o autor conclui que o peso específico seco máximo diminui e o teor de umidade ótima aumenta.

Em relação à resistência com cura de sete dias e posterior imersão de quatro dias, não foi verificadas variações de resistência significativa para os solos estudados *in natura*, porém foi verificado que o teor de umidade para maior resistência não coincide com a umidade de maior densidade. Quando da adição de cal, foi apresentado que, independente do tipo de cal, os maiores teores apresentaram maiores valores do CBR.

O autor verificou também que a metodologia de Eades e Grim, que apresenta como requisito o valor do pH de 12,4, não foi aplicável para os solos estudados, tendo em vista que teores maiores geraram resistências maiores.

Os mesmos solos *in natura* quando não submetidos à cura e imersão tenderam a apresentar valores de CBR maiores com relação aos que foram curados e imersos em água. Os corpos de prova adicionados com as duas cales e rompidos imediatamente após

a compactação tiveram seus CBR maiores. O autor explica que esse fato é de natureza físico-química, gerada pela troca catiônica ou adsorção, na qual promoveu a mudança na geometria do sistema solo-cal-vazios-água.

Os solos estudados, com a transcrição de sua localização, formação geológica, foram:

- Sape-Mari – situado sobre a zona fisiográfica do litoral, localizada à margem direita da rodovia PB-55, no trecho Mari-Guarabira a uma distância de cerca de 5 km da cidade de Mari, com formação geológica denominada Barreiras;
- Cuité – situada sobre os flancos de regiões elevadas da zona fisiográfica da Borborema Oriental, situa-se a margem esquerda da rodovia PB-149, trecho Barra de Santa Rosa-Cuité, na localidade denominada "Bela Vista", a aproximadamente 1,5 km da sede do município de Cuité, com formação geológica terciária denominada Serra dos Martins;
- Nova Floresta – situada sobre os flancos de regiões elevadas da zona fisiográfica da Borborema Oriental, está situada à margem direita da rodovia PB-151, no trecho Cuité-Nova Floresta, distando aproximadamente 5,0 Km da sede do município de Cuité, na localidade conhecida como "Ladeira das Gamelas".

### **3.1.3 Influência da área específica na atividade pozolânica do sistema solo laterítico-cal**

Neves (1989) estudou dezesseis amostras de solos lateríticos, as quais foram estudados em sua forma *in natura*, bem como aditivadas com 3%, 6% e 9% de cal. Esses solos foram curados em câmara úmida por três períodos distintos, 7 dias, 28 dias e 60 dias.

Foi determinada a área específica da fração fina dos solos por duas metodologias, sendo elas:

- método do permeâmetro de Blaine;
- método do permeâmetro de Fisher.

Após os respectivos períodos de cura, foram determinados à resistência a compressão simples e o Índice de Suporte Califórnia.

O autor verificou em seu estudo a não existência na relação da área específica com o Índice de Suporte Califórnia, porém encontrou uma boa relação entre a resistência à compressão simples e a área específica determinadas pelos métodos do permeâmetro de Blaine e Fisher.

Assim, o autor descreve que quando se pretende utilizar a proposta de Thompson (1966) para estabilização de solo com cal, a determinação da área específica pelos métodos já citados pode ser utilizada para pré-selecionar os solos lateríticos mais adequados para estabilização.

Os solos estudados, com a transcrição de sua localização, formação geológica, foram:

- TEPI – jazida localizada à margem direita da BR-316, a 8 km da cidade de Teresina, estado do Piauí, estando inserida geologicamente na formação pedra de fogo constituída de arenitos, siltitos e folhelhos intercalados em proporções variadas: os arenitos são brancos e amarelos claros, enquanto os siltitos e folhelhos são de tonalidade vermelho-púrpuro;
- BUPI – jazida localizada à margem da Rodovia BR-345, a 3,5 km da cidade de Buriti dos Lopes, no Piauí, estando inserida geologicamente na formação pimenteiras, constituídas de folhelhos de cores variegadas, predominando o vermelho e cinza-escuro; micáceos, contendo nódulos leitões de eolitos piritosos. Intercalações de arenitos e siltitos que variam de branco a cinza-claro, são comuns. A formação data da idade devoniana inferior;
- GIPI – jazida localizada à margem de um corte rodoviário, a 3,5 km da cidade de Gilbués, à margem esquerda da Rodovia BR-315, estando inserida geologicamente na formação pedra de fogo, constituída de arenitos, siltitos e folhelhos intercalados em proporções variadas; os arenitos são brancos e amarelo-claros, enquanto os siltitos e folhelhos são de tonalidade vermelho-púrpura;
- CAPI – jazida localizada à margem direita da Rodovia BR-316, a 5 km da cidade de Castelo no Piauí, estando inserida geologicamente na formação cabeças constituídas de arenitos de cores claras, branco e cinza-amarelados, às vezes, chegando a vermelho médio grosseiro, frequentemente, conglomerático e muito pouco argiloso. O arenito apresenta estratificações

cruzadas. Em alguns locais apresenta intercalações de siltitos e arenitos finos, laminados também de cores claras. A formação data da idade devoniana média e superior;

- PDMA – jazida localizada à margem direita da Rodovia BR-336, km 185, estando inserida geologicamente na formação itapecurú, constituída quase que totalmente de arenitos de cores diversas, com predominância do cinza-róseo e vermelho com estratificações cruzadas e silificações. Intercalam-se leitões de siltitos e folhelhos cinza-esverdeados e avermelhados. Em alguns locais, aparece um conglomerado basal contendo seixos de basalto alterado. A formação consta como do cretáceo inferior;
- VGMA – jazida localizada à margem esquerda da Rodovia BR-222, a 22,3 km da cidade de Itapecurú-Mirim, estando inserida geologicamente na formação Itapecurú, constituída quase que totalmente de arenitos de cores diversas, com predominância do cinza-róseo e vermelho, com estratificações cruzadas e silificações. Intercalam-se leitões de siltitos e folhelhos;
- SLMA – jazida localizada à margem direita da Rodovia BR-135, a 0,6 km de São Luiz, estando inserida geologicamente na formação Itapecurú, constituída quase que totalmente de arenitos de cores diversas, com predominância do cinza-róseo e vermelho, com estratificações cruzadas e silificações. Intercalam-se leitões de siltitos e folhelhos;
- JJPB – jazida localizada no Conjunto dos Bancários, a 2 km do *Campus* Universitário, João Pessoa-PB, estando inserida geologicamente na formação barreiras, constituída de sedimentos pouco consolidados, de estratificação predominantemente horizontal a fossilíferos; apresentando sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, arenosos, argila de coloração variegada, intercalando, muitas vezes, com camadas de seixos rolados e concreções lateríticas. Formação datada do terciário;
- TEPB – jazida localizada à margem esquerda da Rodovia PB-306, ligando Teixeira à Princesa Isabel, a 8 km da cidade de Teixeira, estando inserida geologicamente na formação da "Serra dos Morais". É constituída de sedimentos argilosos, arenitos silicificados, arenitos ferruginosos fortemente cimentados por limonita, além de cangas lateríticas, repousando sobre terrenos pré-cambrianos. A formação é datada do terciário;

- ARPB – jazida localizada à margem esquerda da Rodovia PB-079, a 5 km da cidade de Remígio, estando inserida geologicamente por predominâncias de rocha gnaisses e migmatito datadas do pré-cambriano.
- CTPB – jazida localizada à margem da Rodovia PB-149, a 700 m da cidade de Cuité, estando inserida geologicamente na formação "Serra dos Martins". É constituída de sedimentos argilosos, arenitos ferruginosos, fortemente cimentados por limonita além de cangas lateríticas, repousando sobre terrenos pré-cambriano. A formação é datada do período terciário;
- SPPB – jazida localizada à margem direita da Rodovia PB-055, a 6 km da cidade de Mari, estando inserida geologicamente na formação barreiras e é constituída de sedimentos diversos, pouco consolidados de estratificação horizontal e data do terciário;
- PIPI – Jazida localizada à margem direita da Rodovia BR-316 no quilómetro número 231, Piauí, estando inserida geologicamente na formação cabeças. Sua pedologia é formada por latossolo vermelho amarelo, textura média de arenito, intercalada por argila. Data do período devoniano médio e superior;
- MOPA – jazida localizada à margem direita da Rodovia PA-17, no quilómetro nº 35 de Mosqueiro-PA, estando inserida geologicamente na formação barreiras e é constituída de tipos litológicos que variam do argilito ao conglomerado, data do terciário;
- MAPA – jazida localizada à margem direita da Rodovia BR-316, a 37 km do Município de Analide, estado do Pará, estando inserida geologicamente na formação barreiras, tipos litológicos que variam de argilito a conglomerados. Sua pedologia é formada por solos concrecionários lateríticos com textura argilosa e média, sua formação data do terciário;
- VSMA – jazida localizada à margem direita da Rodovia BR-135, a 6,4 km da cidade de São Luiz, estado do Maranhão, estando inserida geologicamente na formação Itapecurú, constituída, principalmente, de arenitos nos quais se intercalam leitos de folhelhos de cor cinza-esverdeados e vermelhos, data do cretáceo inferior.

### **3.1.4 Parâmetros-chave para o controle de resistência de solos estabilizados com cal**

Consoli *et al.* (2009) ao estudarem um solo classificado como areno-argiloso (CL) quando misturado com cinco teores de cal, buscou-se estabelecer um critério racional de dosagem. O estudo busca avaliar a resistência à compressão não confinada pela influência da quantidade de cal, teor de umidade e porosidade, da mesma forma em que para a tecnologia do concreto, a relação água/cimento tem um papel importante e na tecnologia solo cimento, a relação vazios/cimento também se mostra um parâmetro com boa estimativa da resistência da compressão confinada.

Assim, foi verificado que a resistência à compressão não confinada, para corpos de provas curados por 28 e 90 dias, aumenta proporcionalmente com o aumento no teor de cal. A redução na porosidade também proporciona um aumento na resistência do solo estudado.

A mudança no teor umidade não apresentou mudanças significativas na resistência do solo estudado.

O autor conclui que a relação água/cal não é um parâmetro eficiente para avaliar a resistência não confinada, porém a relação vazios/cal, em que os vazios são definidos pela porosidade, e a cal pelo seu teor volumétrico, mostrou-se um parâmetro adequado para esse sistema solo/cal.

O autor não descreveu o local de coleta do solo estudado.

### **3.1.5 Modificação com cal de uma laterita problemática**

Osula (1991), em seu estudo, analisou a modificação de um solo laterítico classificado como solo A-7-6, quando adicionado de cal, utilizando como referência os critérios de granulometria e plasticidade estabelecidos pelo Highway Reserach Board (HRB).

O autor descreve que para a estabilização com cimento Portland, o HRB estabelece alguns quesitos que devem ser atingidos pelo solo *in natura*, sobre o ponto de vista econômico, para que esse solo seja viável de utilização. Estes limites são:

- 50% passando na peneira nº 200;
- 40% de limite de liquidez, e;
- 18% de índice de plasticidade.

Em seu texto é descrito um limite mais prático, no qual o autor afirma que o produto do índice de plasticidade, multiplicado pela porcentagem que passa pela peneira, 425µm, não exceda o valor 1.000.

O autor afirma que a modificação faz melhorar o atrito do solo e diminuir sua plasticidade e que a estabilização do solo é que tem como objetivo melhorar a resistência, geralmente apurada com a resistência à compressão não confinada.

Em seu estudo de modificação, o autor apurou que houve um aumento no teor de umidade ótima e uma diminuição na densidade seca máxima, com o aumento no teor de cal. Os limites de Atterberg também foram modificados, ocorrendo um ligeiro aumento no limite de plasticidade e uma grande diminuição no limite de iliquidez. Como consequência dessa modificação nos limites de Atterberg, o índice de plasticidade reduziu consideravelmente. Houve também uma redução na contração do solo.

Em relação à textura, a curva granulométrica mostra uma redução no teor de finos com o aumento no teor da cal.

O autor também estudou como aumento do teor de cal no solo, atuaria sobre a coesão e o ângulo de atrito, chegando à conclusão de que a coesão sofreu uma diminuição e o ângulo de atrito aumentou.

Assim, o autor conclui que, com a modificação, o solo estudado pode ser modificado com a cal, a qual atenderá as especificações previstas pelo HRB.

O solo estudado pelo autor foi:

- solo laterítico classificado como A-7-6, coletado em Agbede, na parte norte do estado de Bendel, na Nigéria. O solo pertence ao grupo de solos tropicais ferralíticos, derivados das rochas sedimentares Cainozóicas (Terciárias).

### **3.1.6 Efeito da cal virgem nas propriedades físico-químicas do solo argiloso**

Bessaim *et al.* (2018) estudaram os efeitos de uma cal virgem (CaO) em dois solos argilosos, buscando a melhoria dos limites de consistência desse solo e entender como esse aditivo influencia na variação do pH, tendo em vista que variações do pH são responsáveis por modificações e melhorias no solo. Os autores então ensaiaram os solos para obtenção dos limites de Atterberg e pH, tanto para amostras *in natura* quanto para amostras aditivadas com diferentes teores de cal.

Para teores mais baixos de cal (2%), os autores mencionaram que ocorreu um pequeno aumento no limite de liquidez e no limite de plasticidade. Ao aumentar o teor de cal, esses limites sofreram uma redução. Para o primeiro caso, os autores entenderam que a elevação no limite de liquidez e limite de plasticidade poderia ser entendida como o fenômeno de floculação das partículas de argila. No segundo momento, em que os limites abaixaram, os autores descreveram que esse fenômeno se deu pela troca catiônica, devido à liberação dos íons de cálcio que substituíram outros cátions presentes no argilomineral, reduzindo a espessura da dupla camada. Os autores também afirmam que a redução no limite de plasticidade é devida às agregações formadas pelas trocas catiônicas e os fenômenos de floculação e aglomeração.

Ao analisarem os solos sob a ótica do pH, foi determinado que com 2% de cal os solos não chegaram ao ponto de fixação da cal, ou seja, o pH de 12,4. Esse valor só foi possível de ser alcançado com um teor de 4% de cal.

Assim, os autores concluem que a adição da cal gerou uma modificação significativa nos solos estudados e que o pH é um parâmetro relevante a ser observado durante as estabilizações, para que seja possível que ocorram as trocas catiônicas e as reações pozolânicas, sendo que o pH ideal deve ser igual ou superior ao ponto de fixação da cal.

Os solos estudados pelos autores foram:

- Solo 1 – solo residual com classificação SUCS CL e cor esverdeada;
- Solo 2 - solo residual com classificação SUCS CL de cor marrom.

### **3.1.7 Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária**

Delgado (2007) estudou a influência da sucção no comportamento mecânico de solos do Distrito Federal.

Assim, para o seu estudo, a autora buscou a caracterização física dos solos, análises mineralógicas e químicas, classificação MCT, determinou curvas de compactação, determinou a sucção dos solos, determinou as curvas características, determinou o mini-CBR, a perda de massa por imersão, realizou o ensaio de absorção e capilaridade, determinou o teor ótimo de cal pelo método de Eades & Grim e realizou ensaios de resistência à compressão simples.

A autora promoveu a classificação dos solos estudados em três diferentes sistemas, sendo que a metodologia TRB e SUCS são metodologias criadas e consagradas em países de clima temperado. Portanto, a autora destaca a metodologia proposta por Nogami & Villibor, metodologia está descrita como metodologia MCT. Esta metodologia MCT avalia melhor o comportamento dos solos tropicais, tendo em vista que, muitas vezes, as classificações tradicionais não mostram o real comportamento de um solo tropical quando utilizado efetivamente em campo.

Com o estudo das propriedades químicas e mineralógicas, a autora obteve os valores do pH do solo em água e KCl, os teores de matéria orgânica, a capacidade de troca catiônica, o valor de saturação das bases e a análise química total dos solos no qual foi possível obter o coeficiente  $k_r$  do solo, coeficiente este, que indica o grau de intemperização do solo. A autora também fez a análise do coeficiente  $k_r$ , retirando o percentual de quartzo das amostras. É apresentada também a variação do pH dos solos com a variação dos teores de cal, bem como as características mineralógicas dos solos.

As curvas granulométricas dos solos *in natura* e com dois teores de cal, foram apresentadas e, assim, foi possível verificar a modificação na textura do solo. As mineralogias dos solos foram obtidas pelos espectros de raio-x, tanto para amostra *in natura* quanto para amostras com adição de cal. As imagens de microscopia de varredura também foram obtidas para amostras *in natura* e com adição de cal.

A autora também apresentou curvas de compactação, nas quais concluiu que os solos menos intemperizados apresentam curvas mais achatadas em relação aos solos mais intemperizados.

Curvas características foram apresentadas, nas quais se buscou verificar o efeito do tipo de solo na distribuição dos poros, e como a compactação e a variação da umidade de compactação afeta essa distribuição dos poros dos solos. Um dos aspectos relevantes foi o estudo de como a estabilização química e o tempo de cura podem interferir na forma da curva característica. A umidade e o índice de vazios causam influência na sucção e no comportamento mecânico dos solos, no qual ficou demonstrado que existe uma tendência na relação do CBR com a sucção.

A resistência à compressão foi avaliada pela diferença entre os resultados obtidos aos 28 dias de cura, com um solo sem aditivo. Esse critério foi definido por Thompson (1966).

A autora concluiu que:

- o teor elevado de  $Al^{3+}$  nos latossolos proporcionam maiores índices de vazios e porosidade;
- a baixa atividade dos latossolos estudados poderia ser explicada pela predominância da caulinita e ausência de minerais do tipo 2:1;
- o limite de plasticidade tem melhor relação com a densidade dos grãos, índice de vazios e umidade natural, e que nem sempre o índice de plasticidade diminui com a incorporação da cal;
- se faz necessário a consideração em conjunto do pH e da CTC para avaliação do comportamento mecânico do solo;
- o teor definido por Eades e Grim, não indicam, necessariamente, um bom comportamento dos solos tropicais;
- não é só a textura do solo que demonstra o comportamento do solo, deve-se ter em vistas também a mineralogia e a forma de como esses minerais se agrupam;
- o aumento na energia de compactação diminui a influência da reatividade da cal;
- as curvas características de amostras compactadas foram observadas, e para os solos intemperizados, verificou-se a redução de macroporosidade, enquanto nos solos menos intemperizados ocorre a interferência na estrutura;
- o formato da curva característica tem tendência a ser modificado pelo tempo de cura do corpo de prova e que a histerese é dependente do nível de intemperização do solo;
- foi verificado que, para os latossolos, ocorre a variação da sucção com os seguintes parâmetros:
  - energia de compactação – dependente das características físico-químicas e mineralógicas;
  - índice de vazios – ocorrem alterações de forma mais intensa em solos arenosos, de média intensidade em solos siltosos e de menor intensidade em solos argilosos.
- quando se incorpora cal, ocorre, para os latossolos, um aumento de índice de vazios. Já para os solos saprolíticos e da zona mosqueada, vai depender das características do solo;
- com a presença de um determinado teor de quartzo, ocorre pouca variação da sucção pelo predomínio de macroporos;

- o índice de vazios para uma certa energia de compactação é diminuído mais para os latossolos, em seguida para os solos saprolíticos e menos para os solos da zona mosqueada;
- o comportamento do solo apresenta, em termos de mini-CBR, relação com a sucção. A resistência obtida após a imersão de solos sem a cal, inviabilizaria o uso da maioria dos solos. Já em amostras com cal, a perda da resistência não é tão significativa, e uma maior energia de compactação contribui em preservar esta resistência, para boa parte dos solos;
- a sucção tem um papel importante no dimensionamento de pavimentos, tendo em vista que em condições normais de uso, esse solo será não saturado;
- ao analisar a resistência à compressão simples, apenas um solo atendeu o critério de reatividade de Thompson;
- A perda de massa por imersão é dependente da composição mineralógica e sua reatividade com a cal. Porém uma maior energia de compactação gerou um decréscimo na perda. A perda de massa por imersão foi maior em latossolos e de forma semelhante para solos da zona mosqueada e solos saprolíticos finos;
- os latossolos tiveram uma absorção pequena de água e, não foi verificado diferenças na absorção de água para solos *in natura* e solos com cal;
- a autora finaliza descrevendo que o teor ótimo de cal deve ser analisado em função do parâmetro que se deseja melhorar em campo.

Os solos estudados pela autora foram:

- HB7 – coletado próximo à rodovia DF-250, nas seguintes coordenadas 15° 44' 29" S e 47° 35' 39,5" W;
- HB9 – coletado próximo à rodovia DF-130, nas seguintes coordenadas 15° 50' 18" S e 47° 33' 46" W;
- HB10 – coletado próximo à rodovia BR-020, nas seguintes coordenadas 15° 35' 44,8S e 47° 38' 24" W;
- HB11 – coletado próximo à rodovia BR-020, nas seguintes coordenadas 15° 38' 56" S e 47° 44' 12,2" W;
- HB12 – coletado próximo à rodovia DF-180, nas seguintes coordenadas 15° 56' 30" S e 48° 08' 36" W;

- HBR1 – coletado próximo à rodovia DF-205, nas seguintes coordenadas 15° 32' 22" S e 47° 52' 27" W;
- HBR2 – coletado próximo à rodovia DF-001, nas seguintes coordenadas 15° 41' 30" S e 47° 50' 00" W;
- ZM3 – coletado próximo à rodovia DF-001, nas seguintes coordenadas 15° 40' 24" S e 48° 06' 02" W;
- ZM5 – coletado nas seguintes coordenadas 15° 40' 22" S e 47° 51' 11" W.
- ZM6 – coletado próximo à rodovia DF-205, nas seguintes coordenadas 15° 37' 56" S e 47° 51' 11" W;
- SF1 – coletado nas seguintes coordenadas 15° 51' 34,2" S e 47° 31' 53" W;
- SF2 – coletado próximo à rodovia BR-251, nas seguintes coordenadas 15° 56' 30" S e 47° 46' 32,2" W;
- SF4 – coletado próximo à rodovia DF-001, nas seguintes coordenadas 15° 45' 20" S e 47° 48' 50,4" W;
- SF8 – coletado próximo à rodovia DF-250, nas seguintes coordenadas 15° 44' 41" S e 47° 34' 08" W;
- SF13 – coletado próximo à rodovia DF-290, nas seguintes coordenadas 16° 00' 54" S e 48° 08' 25" W.

### 3.2 Estudos de solos aditivados com cimento

A Tabela 3.2 apresenta os trabalhos que foram utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.2 – Solos estabilizados com cimento.

Título	Autor	Ano	Tipo	Publicação
Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo cimento.	Maria da Glória Marcondes Rodrigues	1992	Dissertação de mestrado	Universidade Federal do Rio de Janeiro
<i>Mechanical-Cement Stabilization of Laterite for Use as Flexible Pavement Material.</i>	Manasseh Joel and Isaac O. Agbede	2011	Artigo	<i>Journal of Materials in Civil Engineering</i>
<i>Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations.</i>	Suksun Horpibulsuk, Runglawan Rachan, Avirut Chinkulkijniwat, Yuttana Raksachon, Apichat Suddeepong	2010	Artigo	<i>Construction and Building Materials</i>
Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.	Fernando Henrique Martins Portelinha	2008	Dissertação para obtenção do título <i>Magister Scientiae</i>	Universidade Federal de Viçosa

Aqui será feita uma breve descrição dos estudos que balizaram esta pesquisa e no próximo capítulo será feita a apresentação dos resultados encontrados, fazendo-se agrupamentos com a localização, classificação, dados químicos, físicos e mineralógicos dos mais diversos solos, de modo a possibilitar a releitura dos dados apresentados com foco no entendimento das propriedades e comportamentos.

### **3.2.1 Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo cimento**

Rodrigues (1992) estudou quatro solos lateríticos com diferentes características nas quais foram utilizados quatro laboratórios diferentes para a realização da dosagem do aditivo cimento pelo método físico-químico. O objetivo era a avaliação da precisão do método, repetibilidade e reprodutibilidade.

A autora avaliou que os índices de repetibilidade e reprodutibilidade como positivo, tendo em vista à variabilidade de características das amostras.

Ao utilizar o ultrassom, a autora afirma que o processo foi acelerado, tendo em vista que a quebra dos microagregados expõe maiores superfícies de contato disponível reagindo com o cimento.

Ao aumentar a temperatura, a autora verificou que as curvas não se definiram no tempo normal de ensaio, dando como provável causa uma menor reação com o hidróxido de cálcio, tendo em vista que este fica menos solúvel com o aumento da temperatura, ficando, assim, menos disponível para as reações com o solo.

Os solos estudados pela autora, com a transcrição de sua localização, formação pedológica foram:

- Cambuí – localizado no entroncamento entre as rodovias SP-310 e SP-326, Cambuí é classificado pedologicamente como latossolo vermelho amarelo, fase arenosa;
- VSMA – localizado à margem direita da rodovia BR-135 a 6.5 km de São Luiz do Maranhão;
- Euclidelândia – localizado na estrada Cantagalo-Boa Sorte, a 3 km de Euclidelândia, Rio de Janeiro e classificado pedologicamente como Podzólico vermelho-escuro Tb Eutrófico A”, moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia e relevo ondulado. O Tb na classificação quer dizer, argila de baixa atividade;

- Vista chinesa – localizado na Estrada Dona Castorina, Vista Chinesa, cidade do Rio de Janeiro e classificado pedologicamente como um Latossolo Cambissólico desenvolvido de deposição coluvial.

### **3.2.2 Estabilização mecânica – laterita com cimento para uso como material de pavimento**

Joel *et al.* (2011) apresentaram um estudo de um solo laterítico marrom avermelhado, no qual foi adicionado ao solo de 15 a 60% de areia, assim como adicionaram cimento nos teores de 3 a 12% em relação ao peso seco do solo.

O solo estudado foi compactado em duas energias de compactação diferentes, sendo a energia Proctor normal e a energia padrão da África Ocidental. Após a compactação foram realizados os ensaios de CBR e resistência à compressão não confinada, bem como verificado os limites de Atterberg.

Os autores concluem no seu trabalho que os limites de Atterberg foram alterados com a adição tanto da areia, quanto do cimento, ocorrendo uma melhora de comportamento no material estabilizado.

Da mesma forma, concluíram que a energia de compactação é um fator determinante para a utilização, o qual foi verificado para a laterita estudada, pois a maior energia de compactação fornece melhores resultados para o uso em pavimento.

Concluíram também que uma mistura de 45% de areia e 6% de cimento, quando compactado nas duas energias estudadas, adequa o solo às normas vigentes na África, no quesito resistência à compressão não confinada, onde o cimento proporcionará uma estabilização mais efetiva do solo.

Já no quesito CBR, a especificação geral da Nigéria recomenda um teor máximo de cimento de 7%, para que se atinja um valor de 180% para o CBR. Assim 45% de areia e 6%, nas duas energias de compactação, ofereceram picos de 230% e 430%, nesse critério.

Assim os autores finalizam concluindo que a utilização da areia junto ao cimento, promove uma economia quando se estabiliza o solo laterítico com cimento.

O solo estudado pelos autores foi:

- Solo laterítico marrom avermelhado, localizado em uma caixa de empréstimo em Ikpayongo, Nigéria, localizado entre as latitudes 7° 30' e 7° 35'; longitudes 8° 30' e 8° 35'.

### **3.2.3 Análise do desenvolvimento de resistência em argilas siltosa estabilizada com cimento a partir de considerações microestruturais**

Horpibulsuk *et al.* (2010) estudaram o desenvolvimento de resistência e um silte argiloso estabilizado com cimento. Os autores descrevem que para a estabilização do solo com o cimento, existem alguns fatores que influenciam no comportamento mecânico. Esses fatores são: o teor de água, o teor de cimento, o tempo de cura e a energia de compactação.

Para a avaliação da microestrutura, os autores utilizaram um microscópio eletrônico de varredura. Já para a medição dos tamanhos dos poros foi utilizada a técnica de intrusão por mercúrio e a análise de gravidade térmica.

Nos ensaios realizados, os autores verificaram e descreveram a existência de três zonas, delimitadas pelo teor de cimento. Essas zonas foram descritas como zona ativa, zona inerte e zona de deterioração.

A zona ativa, segundo os autores, é definida pela variação no teor de cimento o qual o seu incremento gera uma grande variação na resistência a compressão não confinada. Ficou demonstrado, nesse caso, que o teor de umidade que gera mais benefícios ao sistema é o teor de 1,2 vezes a umidade ótima, gerando maiores resistências.

Já na zona inerte, o incremento no teor de cimento não produz ou pouco produz variações na resistência à compressão não confinada.

A zona de deterioração é marcada pela diminuição na resistência à compressão não confinada.

As imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura mostram que para amostras com 10% de cimento, os produtos de hidratação do cimento preenchem os poros com maior efetividade nas amostras compactadas na umidade ótima e 1,2 vezes a umidade ótima. O menor volume de poros verificados pelos autores se deu na umidade ótima, seguido por 1,2 vezes a umidade ótima.

Observando o tempo de cura, os autores verificaram que com 4h, o solo já é recoberto por gel de cimento. Com o passar do tempo, as imagens de microscopia eletrônica de varredura já mostram a evolução no aumento dos produtos de hidratação de cimento, aumentando os aglomerados no sistema solo cimento. Ocorre também, com o tempo, uma variação dos tamanhos dos poros, na qual, inicialmente, o volume de poros menor que 0,1  $\mu\text{m}$  diminui, e o volume de poros maiores que 0,1  $\mu\text{m}$  tem um leve aumento. Posteriormente, nos estágios finais de cura do sistema solo cimento, o volume

de poros maiores que 0,1 µm tende a , e o volume de poros menores que 0,1 µm tende a aumentar.

O solo estudado pelos autores foi:

- Silte argiloso coletado no *campus* da *Suranaree University of Technology em Nakhon Ratchasima*, Tailândia.

### **3.2.4 Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**

Portelinha (2008) estudou dois solos residuais visando à sua utilização em projetos rodoviários. Seu estudo buscou analisar os solos *in natura* e os solos misturados com os aditivos químicos, nos seguintes quesitos:

- ensaios de caracterização geotécnica;
- resultados dos ensaios de compactação;
- resultado dos ensaios de compressão não confinada;
- propriedades químicas;
- mineralogias.

Tanto o sistema solo-cal quanto o sistema solo cimento foram estudados com três teores de cal (1%, 2% e 3%) e em cinco diferentes períodos após a mistura com o aditivo (0h, 1h, 2h, 4h e 8h).

Após a realização dos ensaios, o autor em um primeiro momento, analisou, para os dois solos *in natura* e solos modificados quimicamente, as reações de curto prazo que ocorrem nos solos estabilizados com aditivos químicos, sendo verificadas variações da granulometria, do índice de plasticidade e do peso específico seco máximo.

Após esse momento, o autor relacionou o aumento dos valores do pH com o aumento da capacidade de troca catiônica devido à saturação da superfície das partículas de argila pelos íons de cálcio.

Variações na curva granulométrica, índice de plasticidade e do peso específico, aparente seco, foram observados e, como justificativa, o autor relata que ocorreram devido às reações de troca catiônica. O autor esclarece, citando Osula (1996), que esse processo irá ocorrer até que o fenômeno de aglomeração finalize.

Como resultado da estabilização, o autor observou a presença de minerais na fase amorfa, que tinha sua constituição de silício e alumínio, que foram associados ao ganho de resistência do solo 1 quando da adição da cal. Não foram verificadas diferenças significativas dos minerais amorfos em amostras com cura de 7 e 28 dias e que a resistência à compressão não confinada foi estatisticamente semelhante. Ganhos de resistência foram associados a formas cristalinas, em que os produtos amorfos sofreram diminuição com o aumento do tempo de cura. Quando o cimento foi adicionado ao solo 1, já era possível a verificação da forma cristalina.

Aos 7 dias de cura, já se observava a formação cristalina, no solo 2 misturados com cal, o que representou ganhos de resistência. Aos 28 dias de cura, verificou-se um aumento de produtos amorfos e não houve alteração na resistência a compressão não confinada.

Apesar dos baixos teores de aditivos utilizados o autor concluiu que, para o solo 1 a variação da granulometria foi maior que no solo 2. A cal promoveu uma maior queda do  $I_P$  no ato da mistura, mas o cimento proporcionou uma queda maior em um prazo maior. Com a adição da cal houve aumento do pH, CTC e SB, no qual o aumento da CTC promoveu a modificação no  $I_P$ , textura, peso específico e elevação do pH. E com o aumento do pH ocorreu a dissolução da sílica e da alumina do solo permitindo as reações pozolânicas e de cimentação. O mineral rankinita foi associado a maiores taxas de aumento de resistência.

Os solos estudados pelo autor foram:

- Solo 1, coletado de um talude de corte na Universidade Federal de Viçosa. Sendo um solo residual maduro, com horizonte B latossólico de tonalidade amarelada, com estrutura granular forte, aspecto visual poroso e textura argilo-areno-siltosa.
- Solo 2, coletado em um talude de corte na Vila Secundino, no *Campus* da Universidade Federal de Viçosa. Sendo um solo residual jovem oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaisse do Pré-Cambriano, que apresenta coloração acinzentada, com textura areno-silto-argilosa.

# CAPÍTULO IV

---

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo anterior foram apresentados as teses, dissertações, trabalhos de conclusão de cursos e artigos que serão utilizados nas análises contidas neste capítulo.

Serão utilizados os resultados apresentados pelos autores de cada trabalho buscando-se fazer uma releitura, e obter entendimentos complementares de maneira a contribuir para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

É sabido de antemão que, devido ao curto espaço de tempo e à grande quantidade de trabalhos e à dificuldade em selecionar aqueles que ofereçam o maior número de informações, a escolha dificilmente se aproxima da ideal para os objetivos pretendidos, pois cada estudo buscou atender a objetivos específicos.

Assim, buscou-se aglutinar nesse trabalho, de forma que fosse possível analisar os resultados coletados, com vistas às caracterizações físicas, químicas e mineralógicas, bem como o aditivo utilizado, seguindo pelas modificações observadas nos aspectos físicos, químicos e mineralógicos, finalizando com os ganhos de resistências, seja em termos de CBR ou em termos de Resistência à compressão.

### 4.1 Caracterização Física dos Solos

A definição das características físicas dos solos é, geralmente, o primeiro passo dado e um dos mais importantes quando se busca o seu uso em obras de engenharia. É nesse primeiro momento que o engenheiro geotécnico obtém os parâmetros iniciais do solo, visando à forma de como este material poderá ser utilizado em uma dada obra geotécnica.

Ao se analisar os trabalhos que foram referenciados no capítulo anterior, apenas os estudos realizados por Delgado (2007) apresentaram as propriedades físicas de forma mais completa, possibilitando análises mais amplas voltadas para o objetivo desse estudo: entender melhor o comportamento dos solos estabilizados. Os parâmetros apresentados são:

- $w_n$  (%) – umidade natural;
- $\rho_s$  – Massa específica dos sólidos;
- $\gamma_0$  (kN/m<sup>3</sup>) – peso específico natural;

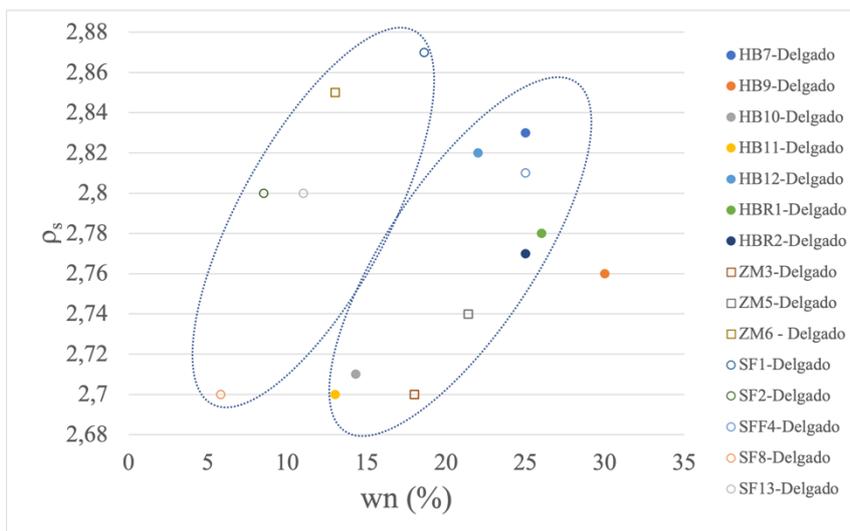
- $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) – peso específico aparente seco;
- $e$  – índice de vazios;
- $n$  (%) – porosidade;
- $S_r$  (%) – grau de saturação.

Esses dados apresentados são de grande importância, principalmente, quando existe variação ao longo do perfil de intemperismo e entre perfis de intemperismo. Esses dados são importantes também quando, como exemplo, em uma obra de pavimentação, caso exista a necessidade de transporte de material, o peso específico natural deverá ser utilizado para na determinação do coeficiente de empolamento, para o cálculo da distância e do custo do transporte dos solos. Não menos relevante é conhecer outras propriedades como a massa específica dos sólidos, pois ela guarda uma relação direta com a composição químico-mineralógica do solo e, geralmente, varia ao longo do perfil de intemperismo interferindo diretamente na estabilização química.

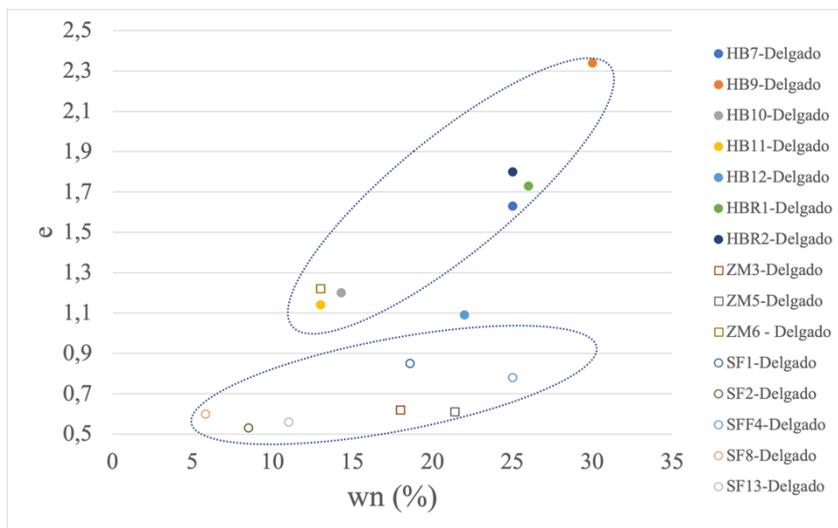
Internamente a umidade natural é, dentre outros, função da composição químico-mineralógica do solo, da porosidade, da geologia estrutural e hidrogeologia e da geomorfologia de subsuperfície sendo que este conjunto interfere na interação solo-atmosfera. Externamente, geralmente, ela será função do clima, das condições de drenagem, da geomorfologia de superfície e da orientação do maciço em relação à insolação e efeitos de vento.

Embora todos estes fatores interfiram na umidade de equilíbrio do solo em condições naturais, com os dados apresentados por Delgado (2007), elaborou-se a Figura 4.1 relacionando à umidade natural com a massa específica dos sólidos, umidade natural com o índice de vazios e umidade natural com o grau de saturação. Para facilitar o entendimento, circundou-se nas figuras os grupos de solos profundamente intemperizados (HB) e dos solos pouco intemperizados (SF). Cabe destacar que os solos da zona mosqueada (ZM) são solos de transição entre os solos profundamente intemperizados e os solos pouco intemperizados, razão pela qual dois pontos seguem as tendências registradas para os solos profundamente intemperizados (HB) e um segue as tendências dos solos pouco intemperizados (SF).

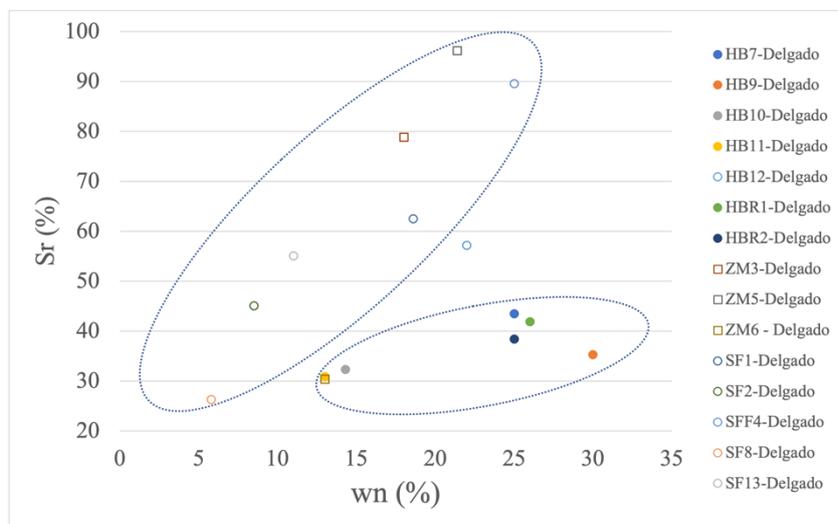
Ao se observar a Figura 4.1, verifica-se que as amostras de solo retiradas do horizonte B (HB7-Delgado, HB9-Delgado, HB10-Delgado, HB11-Delgado, HB12-Delgado, HBR1-Delgado e HBR2-Delgado), apresentam, de uma maneira geral, maiores índices de vazio, maiores teores umidades naturais, bem como, menores grau de saturação, quando comparado com os solos da zona mosqueada e os saprólitos finos.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1 – (a)  $wn(\%) \times \gamma_s$ , (b)  $wn(\%) \times e$ , (c)  $wn(\%) \times Sr (\%)$ .

O aumento no índice de vazios dos solos do horizonte B se relaciona com a agregação natural devido ao seu processo de formação, juntamente com seus minerais constituintes, principalmente, o óxi-hidróxido de ferro e o óxi-hidróxido de alumínio, que promovem a agregação da fração argila. Já a maior umidade natural tem como uma provável explicação a água que se encontra no interior dessas agregações destacando-se que essa água presente no interior do agregado, de certa forma, não contribui para o comportamento mecânico do solo, mas influencia sua classificação, tornando-os solos impróprios, quando classificados por meio do sistema SUCS e TRB. Portanto o seu entendimento pode levar à viabilização do uso adequado das metodologias clássicas de classificação.

Os agrupamentos mostrados nessa figura realçam a importância de se considerar o nível de intemperização do solo, sendo este, em princípio, um aspecto relevante quando se analisa a estabilização química.

Os limites de Atterberg são diretamente influenciados pela natureza químico-mineralógica do solo e por sua textura e podem ser relevantes ao se estudar o comportamento dos solos quando da estabilização química (Delgado, 2007). Porém, ao se apurar a umidade desse solo, a umidade do interior das agregações dos solos também é contabilizada e, como já descrito anteriormente, esse fluido no interior do agregado não influi no comportamento interagregado, ou seja, não influi no comportamento mecânico desse solo. No entanto, quando da estabilização química, ela terá um papel relevante, pois possibilitará a migração química para o interior das agregações podendo estabilizá-las ou instabilizá-las como mostrado por Ayala (2020) para o caso da cal e Wanderley Neto (2020) para o caso do cimento.

Ao se analisar os estudos, o seguinte conjunto de solos, HB10-Delgado, HB11-Delgado, ZM3-Delgado, ZM5-Delgado, SF8-Delgado, SF13-Delgado, PIPI-Neves, SLMA-Neves, VSMA-Rodrigues, foram enquadrados pelos(as) autores(as), como sendo solos não plásticos. Na Figura 4.2, são apresentados os resultados de índice de plasticidade dos demais solos.

O limite de liquidez de um solo está relacionado à sua resistência ao cisalhamento, marcando a separação do estado plástico do solo para o estado líquido. Já o limite de plasticidade, relaciona-se à resistência à tração do solo, marcando a separação do estado plástico para o estado semissólido. Ambos, como já pontuado, relacionam-se com a composição químico mineralógica do solo e, por consequência, com as alterações químicas do meio como ocorre nas estabilizações com cal e cimento.

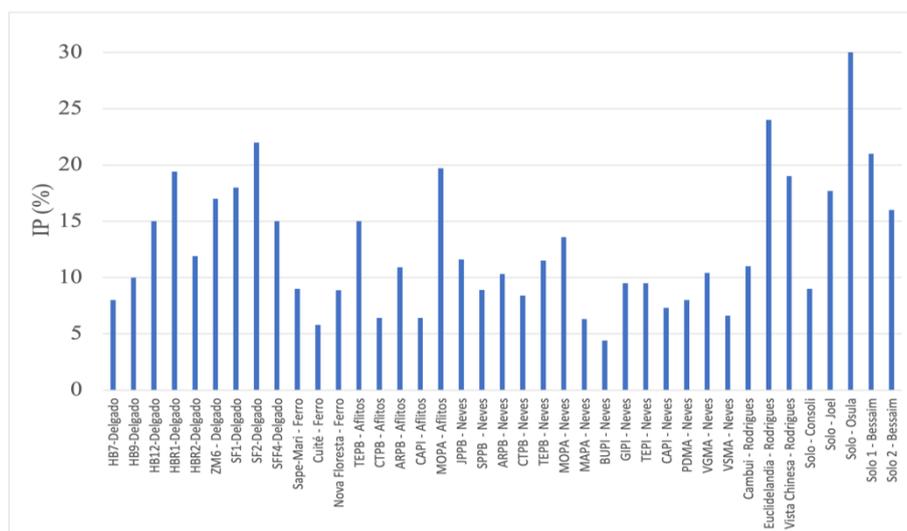


Figura 4.2 – Índice de Plasticidade dos solos *in natura*.

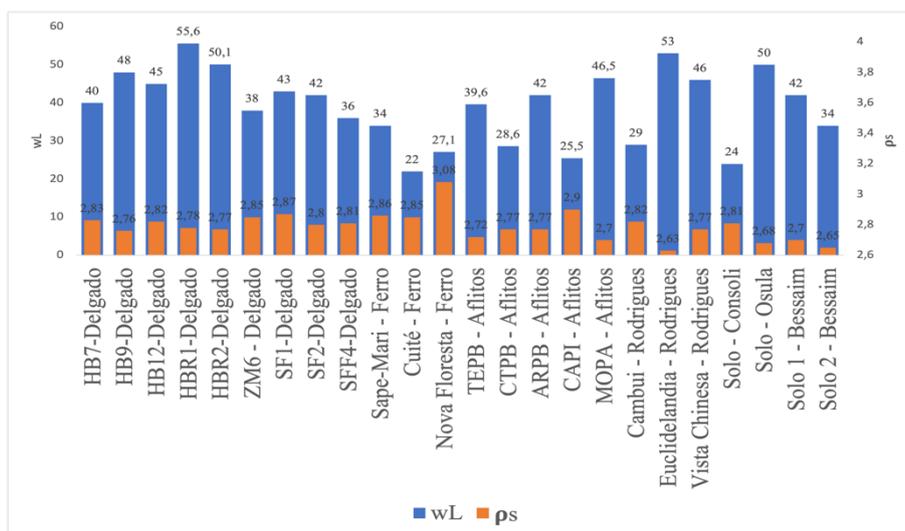
O índice de plasticidade vem da diferença do limite de liquidez com o limite de plasticidade, e é um parâmetro muito utilizado na classificação dos solos.

Desta forma, a Figura 4.3 apresenta o limite de liquidez (a) e o limite de plasticidade (b) conjuntamente com a massa específica dos sólidos.

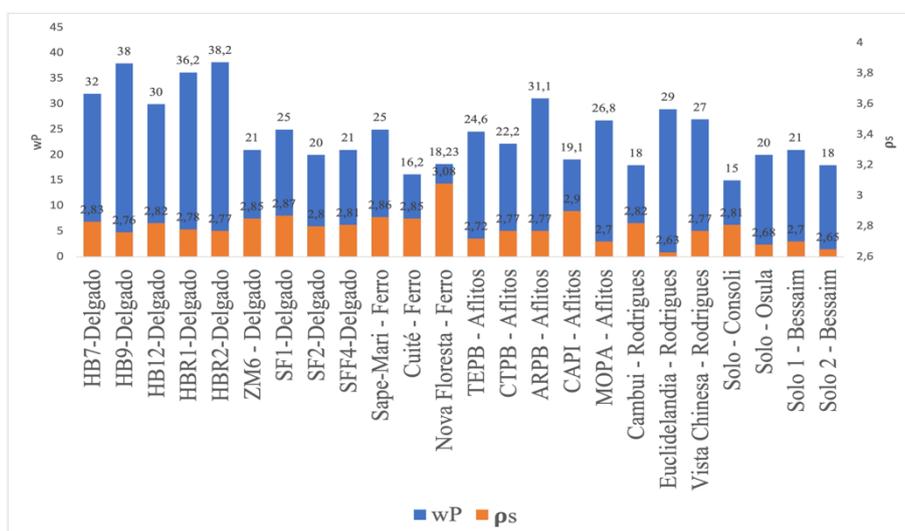
A massa específica dos sólidos fornece importantes informações químico-mineralógicas, tendo em vista que, ao se obter esse parâmetro, pode-se ter uma ideia da composição químico-mineralógica do solo, partindo do ponto que nos solos tropicais a massa específica dos principais minerais é próxima a 2,65, e que a presença de óxi-hidróxidos de ferro a eleva, e a presença de gibbsita a reduz. Dessa forma, é possível estimar se há uma maior ou menor predominância de óxidos-hidróxidos de ferro ou de gibbsita no solo.

Ao se observar a Figura 4.3 (a), verifica-se que os solos com  $\rho_s$  maiores que 2,80 apresentaram limites de liquidez menores que 45%, indicando uma possível tendência de comportamento, em que solos com maiores quantidades de óxidos-hidróxidos de ferro, tenderão a ter menores valores para  $w_L$ . Essa afirmação pode ser explicada pelas presenças de agregações naturais devido à presença dos óxidos-hidróxidos de ferro e alumínio, conforme descrito por Prado (2016), citando Wambeke (1992). A composição mineralógica dos solos a ser apresentada na Tabela 4.4 confirma a presença dos óxidos-hidróxidos de ferro e alumínio nos solos com essas características.

Como esperado, os solos classificados como não plásticos apresentaram, predominantemente, na sua composição mineralógica, o Quartzo.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Limites de liquidez e plasticidade, solos *in natura* - (a)  $w_L$ ,  $\rho_s$ ; (b)  $w_P$ ,  $\rho_s$ .

Da mesma forma, Massad (2016) afirma que o  $w_P$  é pouco influenciado pelos argilominerais e que um valor médio para Caulinita, nesse parâmetro, é de 32%, para a Illita é de 50% e para Montmorillonita é de 72%. No entanto, valores bem mais elevados podem ser obtidos no caso dos argilominerais expansivos, devendo os resultados serem tratados em termos de umidade e porosidade efetivos e não em função parâmetros globais, como geralmente é feito (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021). Dessa forma, ao se analisar a Figura 4.3, é possível entender que os HB9-Delgado, HBR1-Delgado e HBR2-Delgado podem ter a Illita como um dos componentes mineralógicos.

A carta de plasticidade de Casa Grande foi elaborada com a finalidade de classificar os solos e é também utilizada para a classificação dos solos pelo sistema SUCS.

A Figura 4.4 apresenta os solos estudados pelos autores dentro da carta de plasticidade de Casa Grande.

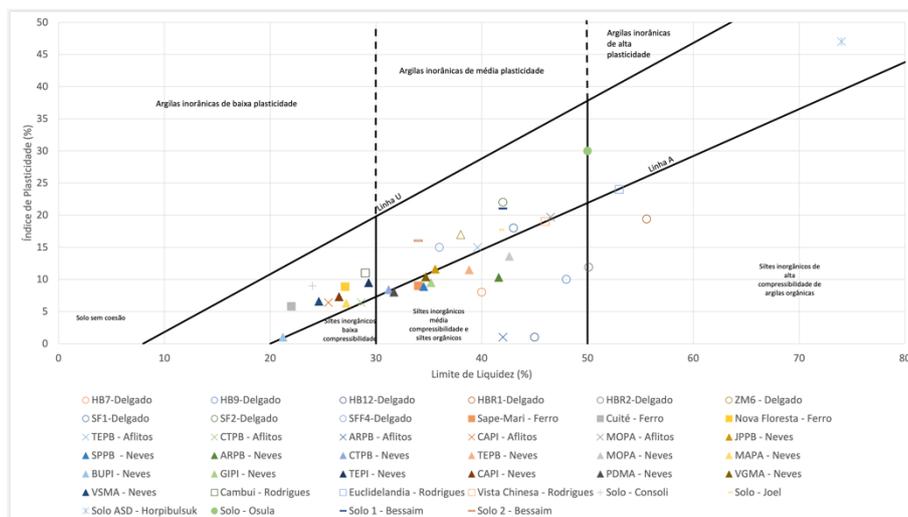


Figura 4.4 – Carta de plasticidade dos solos *in natura*.

Entretanto, a carta de plasticidade foi desenvolvida para classificar solos de clima temperado. Os solos de clima tropicais, sendo eles intemperizados, possuem agregações que retem umidade em seu interior. De uma certa forma, essa umidade não atua no comportamento mecânico do solo, porém é contabilizada nos limites de Atterberg, refletindo, assim, em uma classificação que pode não condizer com seu comportamento em campo.

Dessa forma, com o objetivo de desconsiderar essa água no interior do agregado, usando-se as curvas características presentes no trabalho de Delgado (2007), buscou-se retirar a umidade correspondente à entrada de ar dos microporos, com o entendimento que essa umidade se encontraria dentro do agregado e não intervindo no comportamento mecânico dos solos, conforme sugerem Camapum de Carvalho *et al.* (2019) e Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021). Dessa forma, a Figura 4.5 apresenta a mudança de classificação dos solos devido à retirada da umidade que “se encontra” no interior dos agregados. Com essa visão, entende-se a necessidade, de ampliar os estudos sobre o tema, de modo a adequar as metodologias de classificação existentes aos solos tropicais.

Outro importante dado para a caracterização física dos solos *in natura* é a sua granulometria. Por meio da granulometria, é possível a obtenção de parâmetros que permitem a classificação dos solos, tanto no sistema HRB quanto no sistema SUCS, que, como já descrito anteriormente, são sistemas criados para solos de climas temperados, podendo ser utilizados em solos tropicais com certa cautela. A granulometria é um parâmetro não só importante para a estabilização física como para a estabilização

química, pois a superfície específica que está diretamente ligada à textura do solo estabelece o potencial de interação com os produtos químicos adicionados como a cal e o cimento.

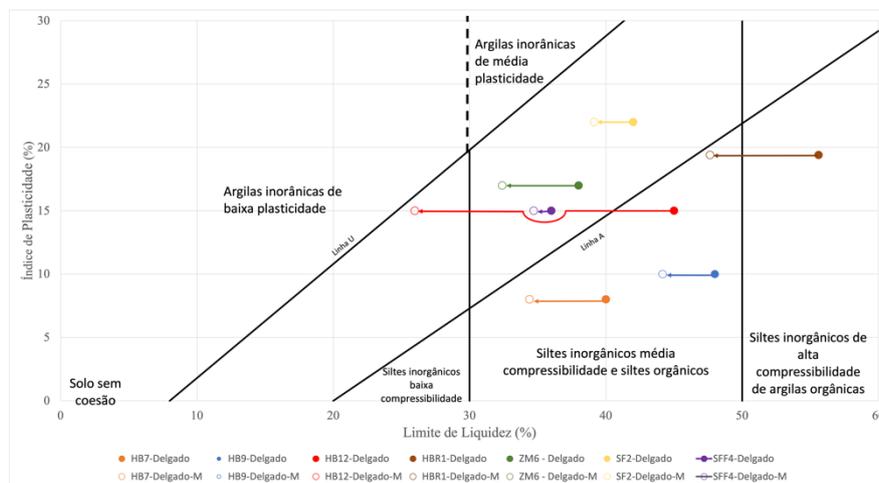
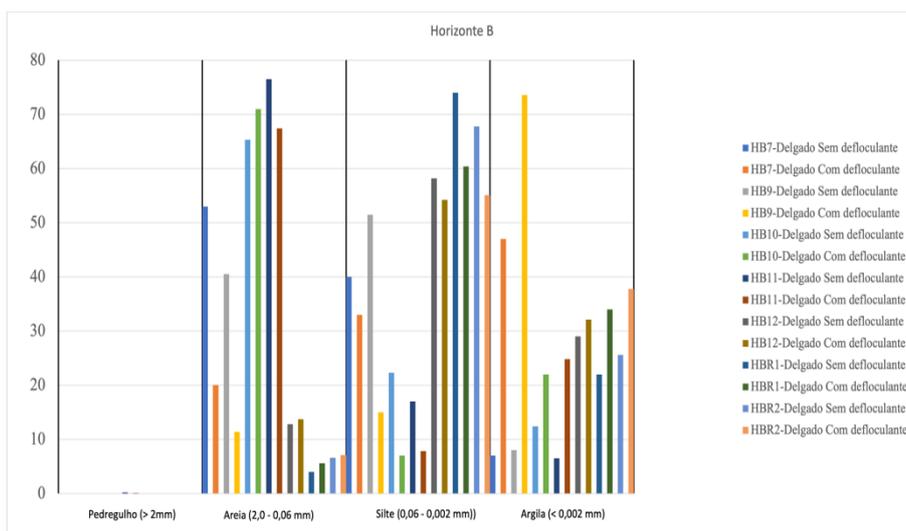


Figura 4.5 – Mudança de classificação na carta de plasticidade.

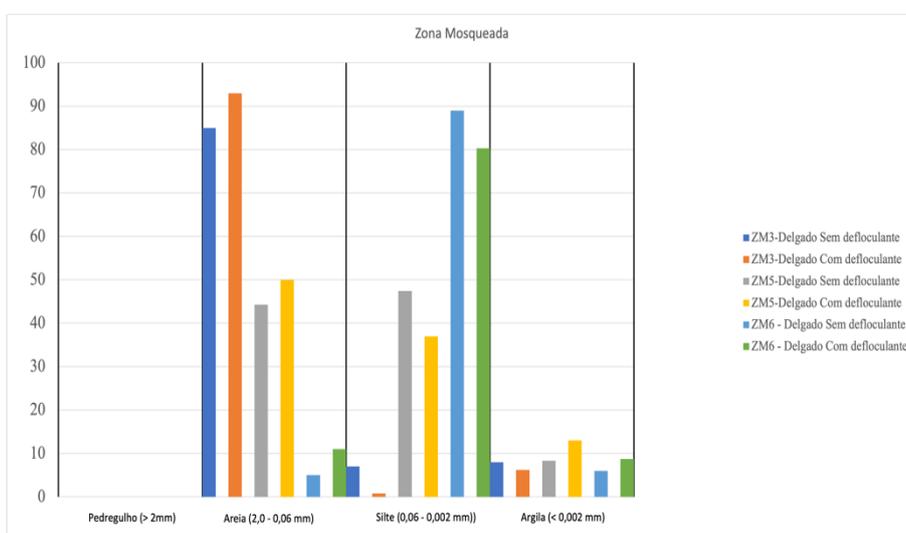
A Figura 4.6 apresenta a composição granulometria dos solos e, ao analisar a composição granulométrica dos solos, foi observado que apenas um autor apresentou a composição granulométrica dos solos *in natura*, realizando o ensaio de sedimentação granulométrica, com e sem o uso de defloculante, tornando, assim, possível observar a presença de agregações formadas naturalmente que podem ser ampliadas ou reduzidas com a incorporação dos aditivos químicos (Rezende 1999, 2003).

Dessa forma, ao se analisar a Figura 4.6, é possível observar a variação da composição granulométrica desses solos sem o uso do defloculante em relação aos resultados obtidos com o uso do defloculante.

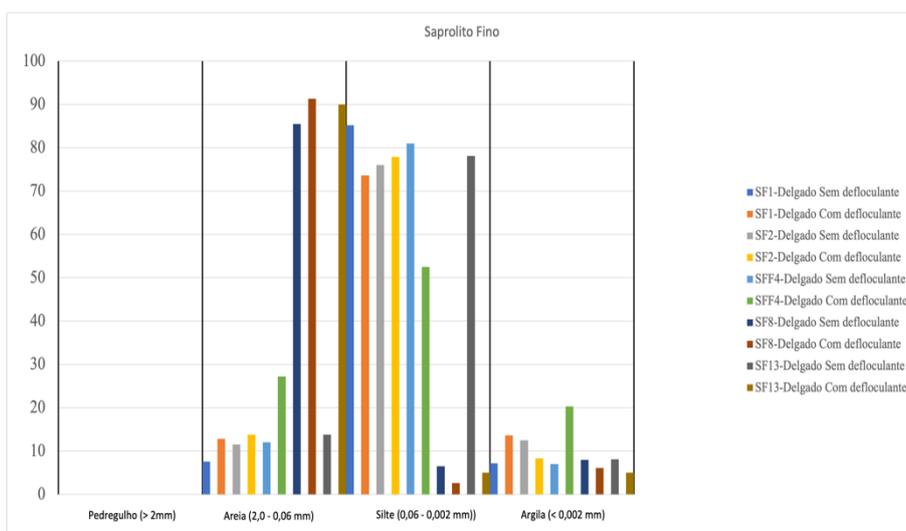
Ao se analisar a variação na composição granulométrica do solo *in natura* do horizonte B, durante a utilização ou não do defloculante, pode-se observar a variações nas porções areia, silte e argila. Ao se comparar a granulometria do solo sem o uso de defloculante com a granulometria com o uso do defloculante, é possível observar aumentos nas frações argilas, fenômeno que pode ser atribuído à desagregação das frações silte e/ou areia presentes no solo em estado natural.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6- Composição Granulométrica – (a) Horizonte B, (b) Zona Mosqueada, (c) Saprólito Fino

Comparando a granulometria dos solos do horizonte B sem o uso de defloculante com o uso do defloculante, observou-se que: - solo HB7 apresentou um aumento de 571%

da fração argila, uma redução de 18% na fração silte e uma redução de 62% na fração areia; - o solo HB9 apresentou um aumento de 820% da fração argila, uma redução de 71% na fração silte e uma redução de 72% na fração areia; - o solo HB10 apresentou um aumento de 77% da fração argila, uma redução de 69% na fração silte e um aumento de 9% na fração areia; - o solo HB11 apresentou um aumento de 282% da fração argila, uma redução de 54% na fração silte, uma redução de 12% na fração areia e uma redução de 5% na fração pedregulho; - o solo HB12 apresentou um aumento de 11% da fração argila, uma redução de 7% na fração silte e um aumento de 7% na fração areia; - o solo HBR1 apresentou um aumento de 55% da fração argila, uma redução de 18% na fração silte e um aumento de 40% na fração areia; - o solo HB2 apresentou um aumento de 48% da fração argila, uma redução de 19% na fração silte e um aumento de 8% na fração areia.

Observa-se, também, que nos ZM3-Delgado, SF2-Delgado, SF8-Delgado e SF13-Delgado, ocorreu justamente o inverso do descrito no parágrafo anterior, quando foi utilizado o defloculante. O defloculante gerou floculação de partículas de argila presentes no solo. Esse fenômeno pode estar ligado à presença do mineral Ilita na composição do solo (Camapum de Carvalho *et al.* 2002). A comparação desses solos sem o uso do defloculante e com o uso do defloculante mostrou que: - o solo ZM3 apresentou uma redução de 23% da fração argila, uma redução de 89% na fração silte e um aumento de 9% na fração areia; - o solo SF2 apresentou uma redução de 34% da fração argila, um aumento de 3% na fração silte e um aumento de 20% na fração areia; - o solo SF8 apresentou uma redução de 44% da fração argila, uma redução de 60% na fração silte e um aumento de 7% na fração areia; - o solo SF13 apresentou uma redução de 38% da fração argila, uma redução de 94% na fração silte e um aumento de 552% na fração areia.

Para o conceito dos solos tropicais, essa informação da agregação natural dos solos é muito importante, pois irá traduzir na forma de como o solo estará trabalhando em campo quando for utilizado de forma *in natura* ou sofrer instabilizações oriundas de aditivos químicos como a cal e o cimento (Ayala 2020, Wanderley Neto 2020).

Um solo tropical naturalmente agregado poderá ter o comportamento diferente do previsto por sua classificação efetuada pelos sistemas TRB e SUCS, no quais essas agregações são quebradas para obtenção da curva granulométrica ou, até mesmo, novas agregações podem surgir fazendo com que o comportamento do solo possa não estar de acordo com a sua classificação.

Com os dados obtidos da curva granulométrica, é possível analisar a relação silte/argila proposta por SIBCS (2018), com a finalidade de avaliar o estágio de intemperismo e comparar com outras análises a serem feitas mais adiante, como a da

metodologia MCT, relação sílica sesquióxidos. Essa metodologia proposta afirma ser válida para solos de textura franco-arenosa ou mais fino. Assim, os solos foram avaliados texturalmente, utilizando o triângulo textural, com o objetivo de se verificar quais solos se enquadrariam nesse conceito. A Figura 4.7 apresenta a classificação textural de todos os solos presentes da Figura 4.6.

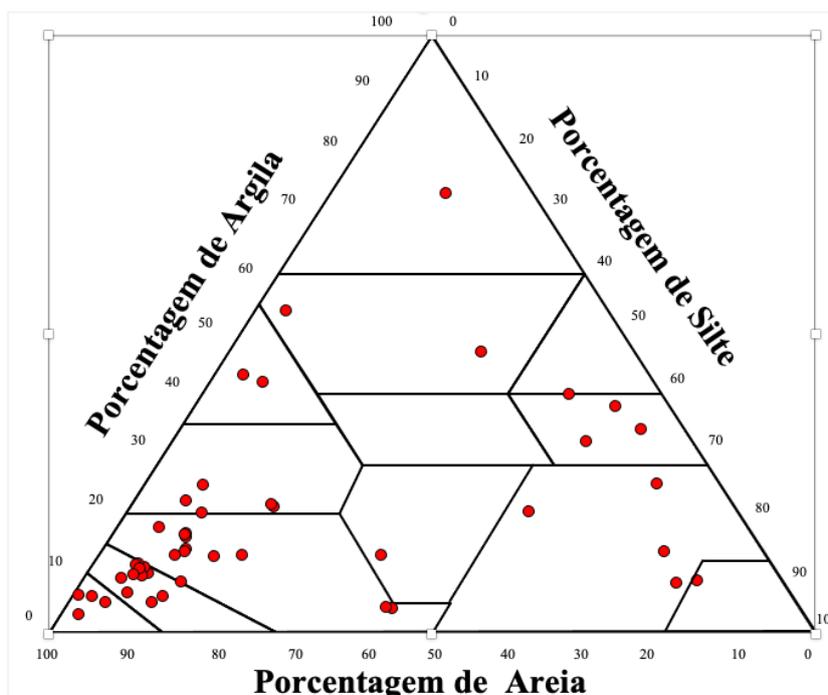


Figura 4.7 – Análise textural dos solos.

Assim, os solos presentes nas zonas A (Areia) e B (Areia Franca) deverão ser excluídos dessa análise por serem classificados como solos mais grossos.

Dessa forma, os solos ZM3-Delgado, SF8-Delgado, SF13-Delgado, Cuité-Ferro, Nova Floresta-Ferro, CTPB-Aflitos, ARPB-Aflitos, CAPI-Aflitos, JPPB-Neves, SPPB-Neves, ARPB-Neves, CTPB-Neves, PIPI-Neves, CAPI-Neves e PDMA-Neves ficaram fora da análise da relação silte/argila, proposta por SIBCS (2018).

Seguindo esse critério, é apresentado na Tabela 4.1 os solos conforme os estágios de intemperismos dados pela análise da textura do solo e da relação silte/argila.

Outra forma para classificação dos solos *in natura*, é a metodologia MCT, apresentada por Nogami & Villibor (1981), que se torna uma metodologia de grande ajuda para a correta classificação dos solos tropicais. Dos autores apresentados, apenas Delgado (2007) apresentou a classificação MCT dos solos estudados.

Assim, os solos presentes nas zonas A (Areia) e B (Areia Franca) deverão ser excluídos dessa análise por serem classificados como solos mais grossos.

Tabela 4.1 – classificação textural dos solos *in natura*.

Amostra	Relação Silte/Argila	Classificação
HB7-Delgado	0,7	Menos intemperizado
HB9-Delgado	0,2	Mais intemperizado
HB10-Delgado	0,3	Mais intemperizado
HB11-Delgado	0,3	Mais intemperizado
HB12-Delgado	1,7	Menos intemperizado
HBR1-Delgado	1,8	Menos intemperizado
HBR2-Delgado	1,5	Menos intemperizado
ZM5-Delgado	2,8	Menos intemperizado
ZM6 - Delgado	9,2	Menos intemperizado
SF1-Delgado	5,4	Menos intemperizado
SF2-Delgado	9,4	Menos intemperizado
SFF4-Delgado	2,6	Menos intemperizado
Sape-Mari - Ferro	0,8	Menos intemperizado
TEPB - Aflitos	0,6	Mais intemperizado
MOPA - Aflitos	0,9	Menos intemperizado
TEPB - Neves	0,6	Mais intemperizado
MOPA - Neves	0,9	Menos intemperizado
MAPA - Neves	0,3	Mais intemperizado
BUPI - Neves	1,5	Menos intemperizado
GPI - Neves	10,5	Menos intemperizado
TEPI - Neves	0,6	Mais intemperizado
VGMA - Neves	1,2	Menos intemperizado
VSMA - Neves	0,8	Menos intemperizado
SLMA - Neves	1,5	Menos intemperizado
Cambuí - Rodrigues	0,5	Mais intemperizado
VSMA - Rodrigues	0,8	Menos intemperizado
Euclidelândia - Rodrigues	0,1	Mais intemperizado
Vista Chinesa - Rodrigues	0,2	Mais intemperizado
Solo - Consoli	9,8	Menos intemperizado
Solo ASD - Horpibulsuk	0,8	Menos intemperizado
Solo - Osula	0,1	Mais intemperizado
Solo 1 - Bessaim	1,2	Menos intemperizado
Solo 2 - Bessaim	2,7	Menos intemperizado

Todavia, a Tabela 4.2 apresenta uma comparação entre a classificação dada pela metodologia MCT (Delgado, 2007), proposta por Nogami & Villibor, e a classificação pela textura dada pelo SIBCS (2018).

Ao se observar essa tabela, não se consegue chegar a uma relação direta entre a classificação MCT e a classificação pela textura. Essa deficiência pode ser explicada devido à metodologia MCT avaliar o comportamento mecânico do solo, enquanto a textura estará relacionada à classificação pedológica, na qual os solos analisados ainda podem estar, em uma fase de transição, conforme proposto por Vertamatti (1988).

Embora com limitações na definição dos limites de Atterberg dos solos tropicais agregados e dos solos expansivos, conforme indicado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) e Camapum de Carvalho *et al.* (2019), em se tratando de solos agregados, como é o caso dos solos lateríticos, como a umidade de saturação dos

agregados entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade não apresenta alterações significativas, termina o índice de plasticidade sendo pouco afetado.

Tabela 4.2 – Comparação de classificação dos solos *in natura* (modificado-Delgado, 2007).

Amostra	Classificação MCT	Classificação pela Textura
HB7-Delgado	LG'	Menos intemperizado
HB9-Delgado	NA'	Mais intemperizado
HB10-Delgado	LG'	Mais intemperizado
HB11-Delgado	LG'	Mais intemperizado
HB12-Delgado	NG'	Menos intemperizado
HBR1-Delgado	LG'	Menos intemperizado
HBR2-Delgado	LG'	Menos intemperizado
ZM5-Delgado	-	Menos intemperizado
ZM6 - Delgado	LG'	Menos intemperizado
SF1-Delgado	LG'	Menos intemperizado
SF2-Delgado	LG'	Menos intemperizado
SFF4-Delgado	LG'	Menos intemperizado

Outro aspecto relevante relacionado aos solos tropicais diz respeito à variação da densidade dos sólidos ao longo do perfil de intemperismo, uma vez que este depende diretamente da composição químico-mineralógica do solo, interferindo, portanto, em suas propriedades e comportamentos, e na própria estabilização química. A não consideração dessa particularidade dos perfis de intemperismo tropical pode ser prejudicial ao estudo e controle tecnológico de uma obra, interferindo, por exemplo, diretamente no peso específico aparente seco.

#### 4.2 Análise Mineralógica e Química dos Solos

Como segundo passo, buscando entender melhor as características dos solos em seus respectivos estados naturais, faz-se necessário a análise química e mineralógica destes, visando obter dados que irão ajudar na sua correta utilização, seja de forma *in natura*, seja com a adição de algum aditivo químico. É verdade que, na prática da engenharia, a opção geral é puramente a análise do comportamento, pois geralmente é ele o definidor da qualidade e durabilidade da obra. No entanto, o entendimento das propriedades físico-químicas e mineralógica do solo e dos aditivos, quando for o caso, enquanto definidoras dos fatores internos responsáveis pelo comportamento do material usado e do desempenho da obra, constitui-se em ferramenta auxiliar de grande relevância para otimizar o próprio comportamento dos solos estabilizados ou não.

A Figura 4.8 apresenta algumas relações potenciométricas, relacionando o pH em água com o teor de argila, o  $\Delta$ pH com o teor de argila, o pH em água e o PCZ e PCZ e o teor de argila.

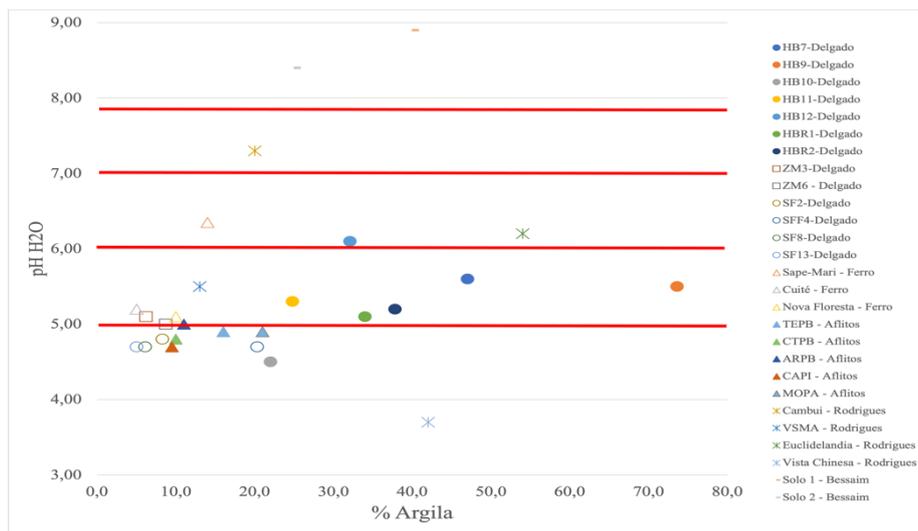
Um dos primeiros dados que facilmente pode-se obter de um solo é o seu pH. De forma mais completa, o pH do solo deve ser obtido tanto em água quanto em uma solução com KCl. Como já descrito na revisão bibliográfica, e de forma objetiva, o pH do solo pode fornecer parâmetros de acidez do solo, o ponto de carga zero (PCZ), o  $\Delta\text{pH}$ , e, com a análise desses dados, fornecer parâmetros sobre a predominância de argilas silicatadas ou predominância de óxido de ferro e alumínio, bem como a tendência de floculação/agregação ou dispersão/desagregação dos solos.

Como pode ser observado na Figura 4.8, nem todos os autores apresentaram análise do pH do solo, e alguns autores apresentaram somente o pH em água. A falta do pH em água e do pH em KCL dificulta o estudo comportamental do solo, tendo em vista que o fenômeno de floculação/defloculação e agregação/desagregação do solo pode ser explicado com fundamento nesse parâmetro.

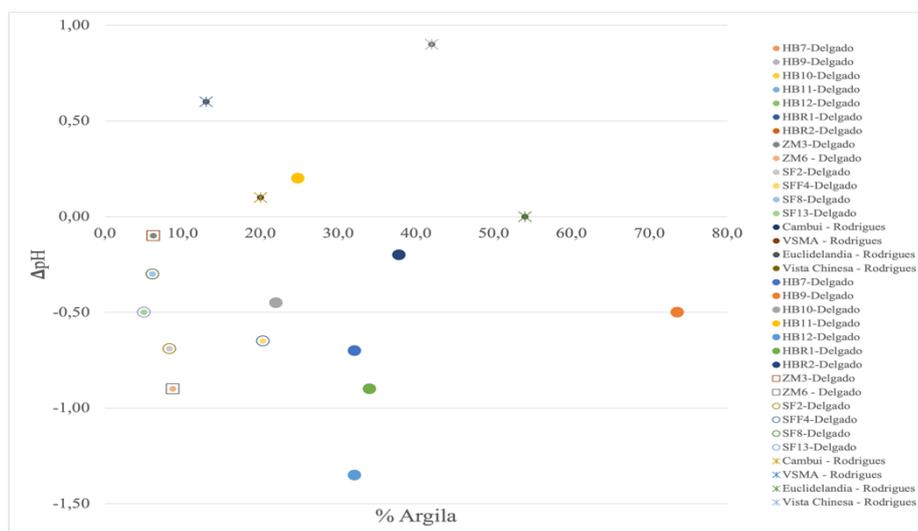
Na Figura 4.8 (a), observa-se a acidez do solo *in natura*, na qual os solos ácidos podem indicar a falta de base devido ao seu processo de formação que pode intervir, a lixiviação e/ou aporte químico, condição que se associa ao clima e a condições de drenagem. Com a medição do pH em água, pode-se classificar os solos da seguinte forma: solo com acidez elevada tem o  $\text{pH} < 5,0$ ; com acidez alta tem a faixa  $5,0 < \text{pH} < 5,9$ ; com acidez fraca o intervalo é  $6,0 < \text{pH} < 6,9$ ; e para o neutro tem-se o  $\text{pH} = 7,0$ . Já nos solos fracamente alcalinos tem-se  $7,1 < \text{pH} < 7,8$ , e com elevada alcalinidade  $\text{pH} > 7,8$ . A acidez no solo é um indicativo de presença de cátions ácidos (Al e H) devido ao processo de formação dos solos que promoveu a remoção de cátions básicos (Ca, Mg, K e Na).

A Figura 4.8 (b) é o reflexo do estudo de Lima (2003) que, citando Kiehl (1979), apresenta uma estimativa da predominância mineralógica dos solos, apenas pelo valor obtido do pH em KCl menos o pH em água, ou seja, a partir do  $\Delta\text{pH}$ .

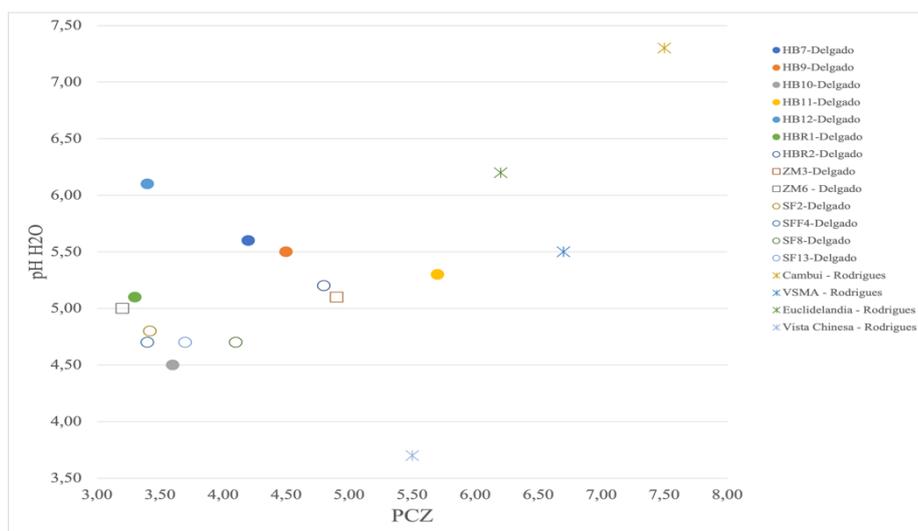
Os solos com  $\Delta\text{pH}$  menores do que zero (HB7-Delgado, HB9-Delgado, HB10-Delgado, HB12-Delgado, HBR1-Delgado, HBR2-Delgado, ZM3-Delgado, ZM5-Delgado, ZM6-Delgado, SF1-Delgado, SF2-Delgado, SF4-Delgado, SF8-Delgado, SF13-Delgado) apresentam cargas negativas e têm o predomínio de argilas silicatadas e uma elevada quantidade de alumínio trocável. Quando este é maior do que zero (HB11-Delgado, Cambuí-Rodrigues, VSMA-Rodrigues e Vista Chinesa-Rodrigues) apresenta cargas positivas e tem o predomínio de óxi-hidróxido de ferro, alumínio e uma baixa quantidade de alumínio trocável. A presença dos sesquióxido de ferro e alumínio, segundo Aflito (1981), é um fator que reduz a reatividade da cal, bem como a ausência de alumínio trocável, indica que a reação pozolânica que é de longo prazo, para a formação do aluminato de cálcio hidratado, não irá ocorrer, reduzindo o consumo da cal no sistema.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8 – Relações potenciométricas – (a) pH H<sub>2</sub>O x % argila, (b) ΔpH x % argila, (c) pH H<sub>2</sub>O x PCZ.

O pH em KCl se torna tão importante quanto o pH em água, para obtenção do ΔpH (pH em KCl – pH em água), parâmetro este, que pode indicar, em um solo intemperizado,

se nele predominam os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio ou os filossilicatos quando, respectivamente, ele é positivo ou negativo.

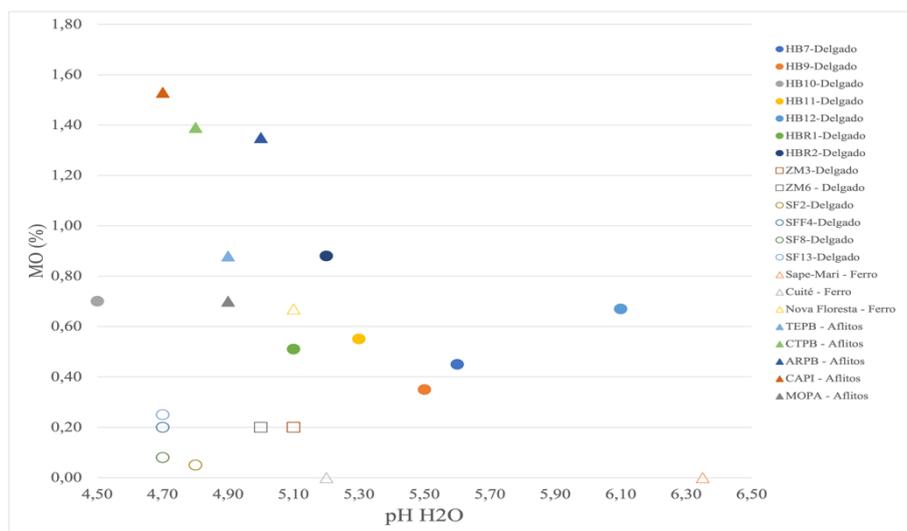
Uma observação relevante é a de que essa predominância descrita no parágrafo anterior, é função do pH em que o solo se encontra, tendo em vista que mudanças de pH, podem solubilizar ou precipitar minerais que, de certa forma, deixarão de contribuir ativamente para o grau de acidez dessa solução.

Sobre os resultados apresentados, chama a atenção o fato de que o solo “Euclidelândia – Rodrigues” apresentou um valor de  $\Delta\text{pH}$  igual a zero, não havendo predomínio nem de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio e nem de argilas silicatadas, portanto, como pH em água e o pH em KCl são iguais ao PCZ, gerando, assim, um equilíbrio de cargas, fazendo com que o solo tenha a tendência de apresentar o máximo de floculação.

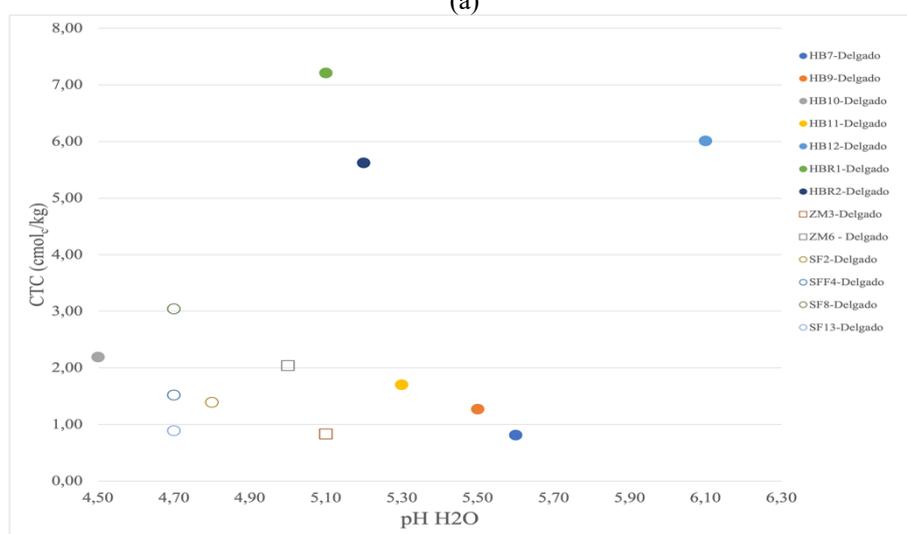
Na Figura 4.8 (c), observa-se a relação entre o pH em água e o seu PCZ. Quanto mais próximo forem esses valores um do outro, o solo tenderá a ter uma floculação maior, ou seja, a figura mostra que os solos que estão próximos à linha correspondente a  $45^\circ$  têm a tendência de apresentarem agregações quando *in natura*, enquanto os mais afastados da linha, tendem a ser mais dispersos. Essa tendência de floculação é devido ao equilíbrio de cargas elétricas, nas quais o pH em água tenderá a ser igual ao pH em KCL, tornando o  $\Delta\text{pH}$  próximo a zero. Dois pontos merecem ser realçados quanto à adição de produtos químicos ao solo: eles vão interferir nesse equilíbrio; dependendo do pH alcançado, seja ele em direção à maior acidez ou em direção à maior alcalinidade poderá propiciar a solubilização de compostos como os óxi-hidróxidos de ferro e/ou alumínio e o carbonato de cálcio interferindo, assim, na estabilidade textural e estrutural do solo.

Outras análises químicas necessárias são a apuração da CTC do solo, bem como a obtenção do teor de matéria orgânica.

A Figura 4.9 (a) mostra o teor de matéria orgânica em função do pH em água. O teor de matéria orgânica é um dos parâmetros mais importantes a serem buscados, quando se trata de estabilização química de solos, pois ela tem alta capacidade de troca catiônica, e quando presente em um solo que se irá aditivar com cal ou cimento Portland, proporcionará um elevado consumo de cátions  $\text{Ca}^+$ , limitando as melhorias desejadas nesse sistema solo-aditivo. Embora a MO interfira no pH do solo, um importante entendimento é que a acidez é também afetada por outros fatores como o teor de alumínio disponível no sistema.



(a)

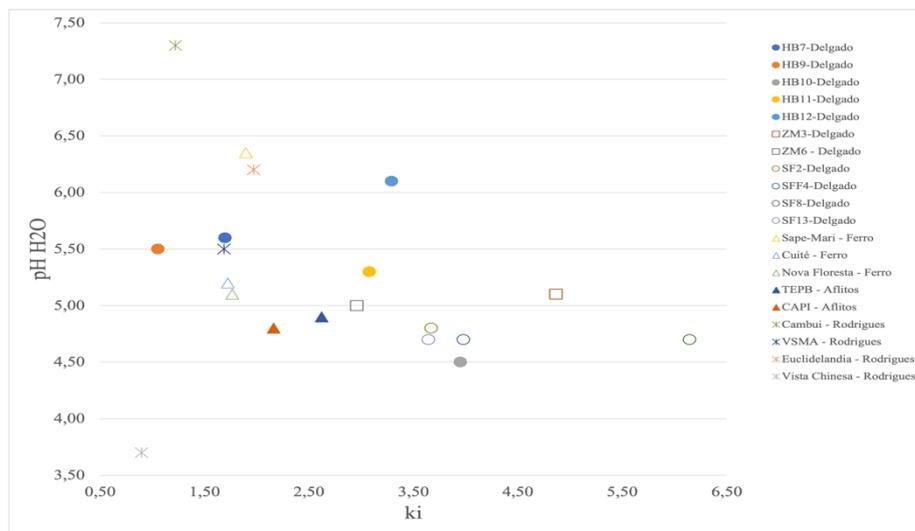


(b)

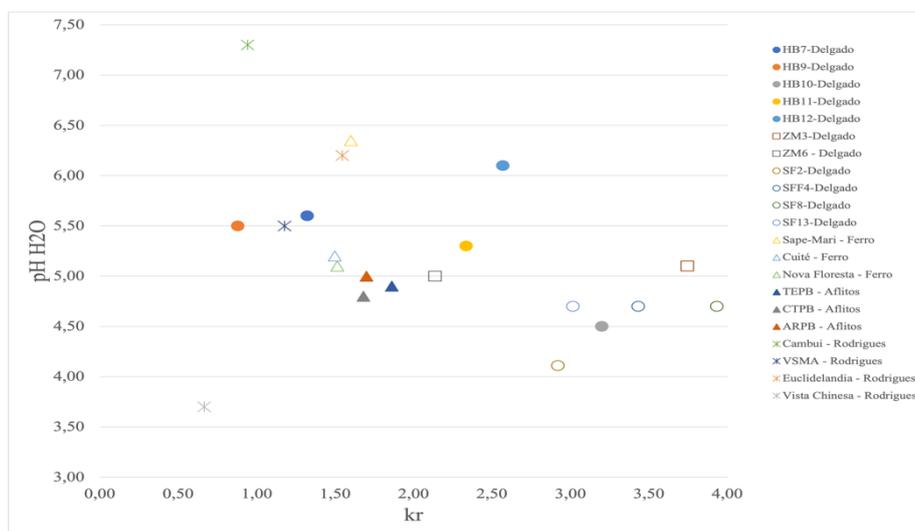
Figura 4.9 – Relações do pH em água com: (a) MO, (b) CTC.

Conforme descrito por Prado (2016), a CTC é a capacidade que um solo tem de reter cátions. Os solos TEPB-Aflitos, CTPB-Aflitos, ARPB-Aflitos, CAPI-Aflitos e MOPA-Aflitos, HB12-Delgado, HBR1-Delgado e HBR2-Delgado apresentaram a CTC de média à alta, sendo que essa constatação é um indicativo de que esses solos terão um elevado consumo de cátions  $\text{Ca}^+$ , durante a sua estabilização química. A Figura 4.9 (b) apresenta o pH em água, em função da CTC dos solos.

Não menos importante é a análise química total do solo que irá fornecer os parâmetros para avaliação dos coeficientes de intemperismo  $k_i$  e  $k_r$ , discutidos anteriormente na revisão bibliográfica. A Figura 4.10 apresenta os resultados apurados de  $k_i$  e  $k_r$  colocados em função do pH em água.



(a)



(b)

Figura 4.10–Coeficientes de intemperismo  $k_i$  e  $k_r$  em função do pH em água –

(a)  $k_i$  x  $pH_{H_2O}$ , (b)  $k_r$  x  $pH_{H_2O}$ .

Ao se analisar a Figura 4.10, é possível observar uma certa linearidade entre os coeficientes  $k_i$  e  $k_r$  em relação ao valor do pH em água. Essa linearidade mostra uma tendência, para os solos estudados, de que quanto mais intemperizado for o solo maior será o pH em água. Tal constatação parece contraditória com o fato de que, geralmente, considera-se que solos mais intemperizados são mais ácidos.

Ampliando as considerações sobre  $k_i$  e  $k_r$ , na revisão bibliográfica, foi descrito que solos que possuem  $k_i$  menor que 2,2 apresentam um indicativo de serem solos profundamente intemperizado e o coeficiente  $k_r$  permite diferenciar os solos da família caulinita dos solos oxídicos (Camapum de Carvalho *et al.* 2015). Assim, com os dados disponíveis na Figura 4.10 e com a apuração dos valores de  $k_i$  e  $k_r$ , foi possível construir a Tabela 4.3, apresentando os solos classificados em relação ao seu grau de

intemperização e a família a qual pertence, conforme descrito por Camapum de Carvalho *et al.* 2015, que será discutido mais adiante.

Tabela 4.3 – Classificação dos solos quanto ao grau de intemperismo por meio dos coeficientes  $k_i$ ,  $k_r$  e MCT. (Modificado - Delgado, 2007- Ferro, 1976 - Aflitos, 1981 - Neves, 1989 - Rodrigues, 1992 – Horpibulsuk *et al.*, 2010).

Amostra	Classificação – Grau de Intemperismo	Família	Classificação MCT
HB7-Delgado	Latossolo	Caulínítico	LG'
HB9-Delgado	Latossolo	Caulínítico	NA'
HB10-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	LG'
HB11-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	LG'
HB12-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	NG'
ZM3-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	
ZM5-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	
ZM6 - Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	LG'
SF1-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	LG'
SF2-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	LG'
SFF4-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	LG'
SF8-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	
SF13-Delgado	Solo não laterítico	Caulínítico	
Sape-Mari - Ferro	Latossolo	Caulínítico	
Cuité - Ferro	Latossolo	Caulínítico	
Nova Floresta - Ferro	Latossolo	Caulínítico	
TEPB - Aflitos	Solo não laterítico	Caulínítico	
CTPB - Aflitos	Latossolo	Caulínítico	
ARPB - Aflitos		Caulínítico	
MOPA - Aflitos	Solo não laterítico	Caulínítico	
JPPB - Neves	Latossolo	Caulínítico	
SPPB - Neves	Latossolo	Caulínítico	
ARPB - Neves	Solo não laterítico	Caulínítico	
CTPB - Neves	Latossolo	Caulínítico	
TEPB - Neves	Latossolo	Caulínítico	
MOPA - Neves	Latossolo	Caulínítico	
MAPA - Neves	Solo não laterítico	Caulínítico	
BUPI - Neves	Latossolo	Caulínítico	
PIPI - Neves	Latossolo	Caulínítico	
GPI - Neves	Solo não laterítico	Caulínítico	
TEPI - Neves	Latossolo	Caulínítico	
CAPI - Neves	Latossolo	Caulínítico	
PDMA - Neves	Latossolo	Caulínítico	
VGMA - Neves	Solo não laterítico	Caulínítico	
VSMA - Neves	Latossolo	Caulínítico	
SLMA - Neves	Latossolo	Caulínítico	
Cambuí - Rodrigues	Latossolo	Caulínítico	
VSMA - Rodrigues	Latossolo	Caulínítico	
Euclidelândia - Rodrigues	Latossolo	Caulínítico	
Vista Chinesa - Rodrigues	Latossolo	Oxidico	
Solo ASD - Horpibulsuk	Solo não laterítico	Caulínítico	

Ao se comparar os solos que apresentaram a classificação MCT, observa-se que nem todos se encontram de acordo com a classificação, devido ao grau de intemperismo. Essa situação, provavelmente, é explicada devido à existência de solos transicionais, conforme mostrado por Vertamatti (1988), que apresenta em seu trabalho uma

modificação na classificação MCT, a qual denomina MCT-M, que propõe uma melhor classificação desses solos que ainda se encontram em processo de evolução pedológica.

Assim, como as propriedades químicas, as propriedades mineralógicas dos solos interferem diretamente no processo de estabilização química. A Tabela 4.4 apresenta os minerais constituintes dos solos que estão disponíveis nos trabalhos apresentados no capítulo anterior e que foram utilizados em estudos de estabilização química. Nesta tabela, estão apresentados, na segunda coluna, os minerais predominantes e nas colunas seguintes, seguindo a ordem de predominância, os demais minerais na ordem apresentada por cada autor.

Analisando a Tabela 4.4 juntamente com as Figuras 4.10 e a Tabela 4.3, faz-se necessário uma análise cuidadosa dos coeficientes de intemperização  $k_i$  e  $k_r$  obtidos. No que tange à mineralogia, o quartzo que, geralmente, tem sido admitido como um mineral residual o qual se faz presente mesmo nos solos profundamente intemperizados, pode, como indicado por Senaha (2019), ser fruto do processo de intemperismo. Um mineral que comumente se faz presente nos solos profundamente intemperizados é a gibbsita. Em alguns solos, em condições muito favoráveis de intemperização, os minerais primários podem passar diretamente para gibbsita, no entanto, em outras condições de intemperização menos favoráveis, eles poderão passar por minerais como a montmorilonita e illita, evoluírem para caulinita e, só depois, chegarem ao estágio de gibbsita. Diante desse cenário, não é simples fazer uma associação ampla da composição mineralógica com o grau de intemperização sofrido pelo solo. A percepção de desacordos entre as propriedades químicas e mineralógicas devem, portanto, ser analisadas com cautela.

Feitas essas considerações, alguns aspectos associados à mineralogia merecem, no entanto, destaque quando se vai estabilizar um solo quimicamente:

- Os argilominerais com maior capacidade de troca iônica como é o caso da montmorilonita, geralmente, requerem maiores teores de aditivo nos processos de estabilização, conforme descrito na Tabela 2.1, por Teixeira *et al.* (2017) e apresentado na Tabela 2.2, por Alleoni (2002), citado por Prado (2016).

- O quartzo, devido à sua baixa atividade, requer a formação de cimentações entre os grãos para que se tenha uma melhoria do comportamento mecânico.

- Os solos contendo agregações com presença de gibbsita, hematita e/ou Goethita ou com suas presenças, fazendo a cimentação entre partículas e/ou agregações, podem passar por processos de instabilização devido a suas solubilizações em condições de pH favoráveis, conforme apresentado por Ayala (2020) e Wanderley Neto (2020).

Tabela 4.4– Composição mineralógica dos solos (Modificado - Delgado, 2007- Ferro, 1976 - Aflitos, 1981 - Neves, 1989 - Rodrigues, 1992 - Osula, 1991).

Amostra	Constituintes Mineralógicos						
	Predominante	Outros					
HB7-Delgado	Caulinita	Gibbsita	Quartzo	Hematita	Goethita	Ilita	Rutilo + Anatásio
HB9-Delgado	Caulinita	Gibbsita	Hematita	Quartzo	Rutilo + Anatásio	Ilita	Goethita
HB10-Delgado	Quartzo	Caulinita	Gibbsita	Hematita	Ilita	Goethita	Rutilo + Anatásio
HB11-Delgado	Quartzo	Gibbsita	Caulinita	Hematita	Goethita	Rutilo + Anatásio	
HB12-Delgado	Quartzo	Caulinita	Ilita	Hematita	Gibbsita	Goethita	Rutilo + Anatásio
ZM3-Delgado	Quartzo	Caulinita	Ilita	Hematita	Gibbsita	Goethita	Rutilo + Anatásio
ZM5-Delgado	Quartzo	Caulinita	Ilita	Gibbsita	Hematita	Goethita	Rutilo + Anatásio
ZM6 - Delgado	Caulinita	Quartzo	Hematita	Ilita	Gibbsita	Goethita	Rutilo + Anatásio
SF1-Delgado	Quartzo	Caulinita	Ilita	Hematita	Goethita	Rutilo + Anatásio	Gibbsita
SF2-Delgado	Quartzo	Caulinita	Ilita	Hematita	Gibbsita	Goethita	Rutilo + Anatásio
SFF4-Delgado	Quartzo	Ilita	Caulinita	Gibbsita	Hematita	Goethita	Rutilo + Anatásio
SF8-Delgado	Quartzo	Caulinita	Hematita	Gibbsita	Goethita	Rutilo + Anatásio	
SF13-Delgado	Quartzo	Ilita	Caulinita	Hematita	Goethita	Gibbsita	Rutilo + Anatásio
Sape-Mari - Ferro	Caulinita	Quartzo	Goethita				
Cuité - Ferro	Caulinita	Quartzo	Goethita				
Nova Floresta - Ferro	Caulinita	Quartzo	Goethita				
TEPB - Aflitos	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita			
CTPB - Aflitos	Caulinita/Goethita	Quartzo	Anatásio	Hematita	Calcáreo		
ARPB - Aflitos	Caulinita / Quartzo	Anatásio	Hematita				
CAPI - Aflitos	Caulinita / Quartzo / Anatásio	Hematita					
MOPA - Aflitos	Caulinita						
JPPB - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita	Anatásio		
SPPB - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Anatásio			
ARPB - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Anatásio			
CTPB - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita	Anatásio		
TEPB - Neves	Caulinita	Quartzo	Mica	Microclina	Anatásio		
MOPA - Neves	Caulinita	Quartzo	Hematita	Goethita	Anatásio		
MAPA - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Anatásio			
BUPI - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita				
PIPI - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita	Anatásio		
GIPI - Neves	Caulinita	Quartzo	Microclina	Serécita	Goethita	Hematita	
TEPI - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita	Anatásio		
CAPI - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Anatásio			
PDMA - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita	Anatásio		
VGMA - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Hematita	Anatásio		
VSMA - Neves	Caulinita	Quartzo	Hematita	Goethita	Anatásio		
SLMA - Neves	Caulinita	Quartzo	Goethita	Gibbsita	Anatásio		
Cambuí - Rodrigues	Quartzo	Caulinita	Gibbsita	Goethita	TiO <sub>2</sub>		
VSMA - Rodrigues	Quartzo	Caulinita	Goethita	Gibbsita	TiO <sub>2</sub>		
Euclidelândia - Rodrigues	Caulinita	Quartzo	Goethita	TiO <sub>2</sub>	Gibbsita		
Vista Chinesa - Rodrigues	Quartzo	Caulinita	Gibbsita	Goethita	TiO <sub>2</sub>		
Solo - Osula	Haloisita	Quartzo	Caulinita	Goethita	Hematita		

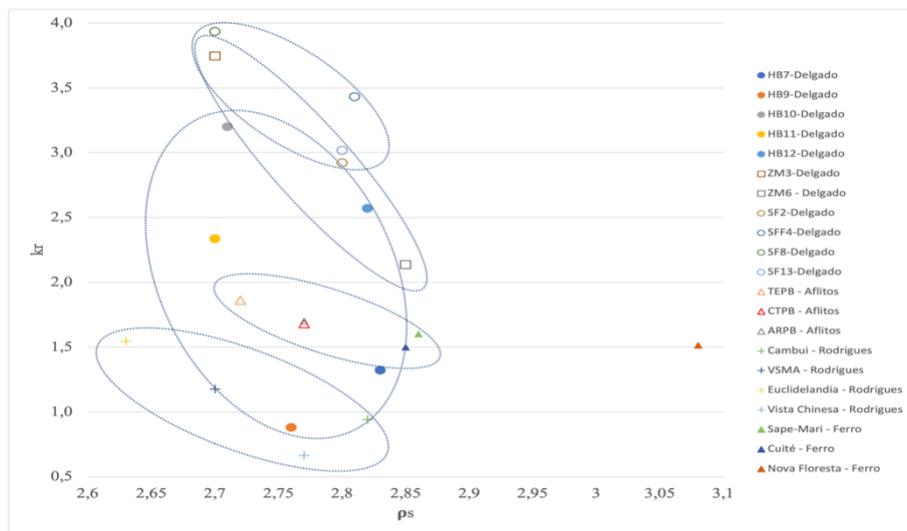
A massa específica aparente seca, o teor de umidade ótimo, a resistência à compressão simples e o CBR, foram informações também apresentadas pelos autores. Como já era esperado, não foram encontrados estudos que contivessem todas as informações, porém com as informações disponíveis, buscar-se-á fazer uma releitura dos dados apresentados pelos autores. A resistência à compressão simples apresenta significativa dispersão dos resultados, o que era esperado, aponta para a necessidade de análises mais amplas das propriedades e comportamento dos solos.

### 4.3 Relação entre propriedades físicas e químicas

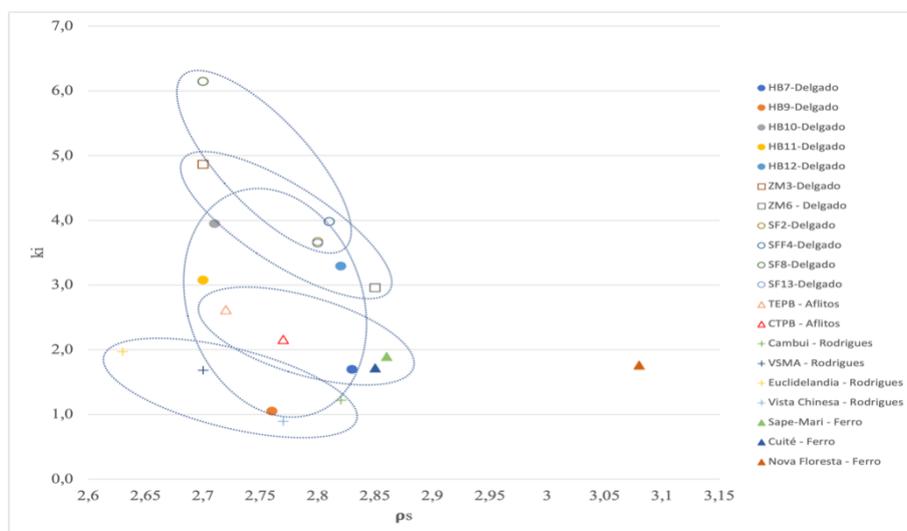
Diante dos resultados apresentados para as propriedades físicas e químicas, optou-se por analisar algumas relações entre elas, antes de adentrar nas análises das estabilizações químicas propriamente ditas.

Considerando-se o fato de que os óxi-hidróxidos de ferro, e de ferro e alumínio interferem diretamente em  $kr$  ( $kr = \frac{\%SiO_2/60}{\%Al_2O_3/102 + \%Fe_2O_3/160}$ ),  $ki$  ( $ki = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3} \times 1,7$ ) e na densidade dos grãos, apresenta-se na Figura 4.11 as relações de  $kr$  com  $\rho_s$  (a) e de  $ki$  com  $\rho_s$  (b). Apesar dessas tendências gerais serem as esperadas, ela realça a importância do  $\rho_s$  quando se está a estudar as propriedades e comportamento dos solos tropicais. Os círculos nas figuras representam os solos extraídos de um mesmo horizonte pedológico, porém apresentando vários graus de intemperismo e densidade de grãos.

Ampliando as análises das relações entre as propriedades físicas e as propriedades químicas dos solos tropicais, a Figura 4.12 apresenta as relações entre  $ki$  e  $kr$  e o coeficiente de atividade de Skempton. Observa-se, nesta Figura, que  $kr$  (a) e  $ki$  (b) tende a aumentar com o coeficiente de atividade de Skempton, ou seja, parâmetros simples de laboratório podem se constituir em importante ferramenta auxiliar quando se estuda a estabilização química dos solos.



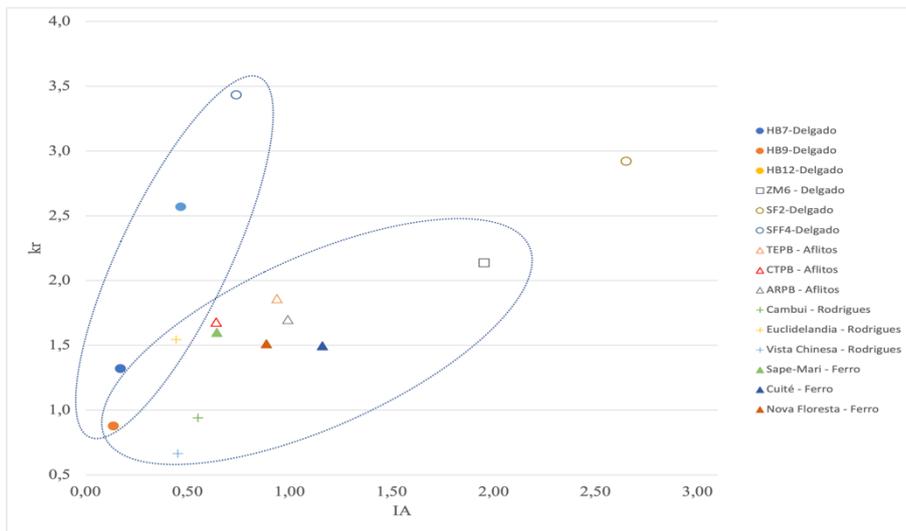
(a)



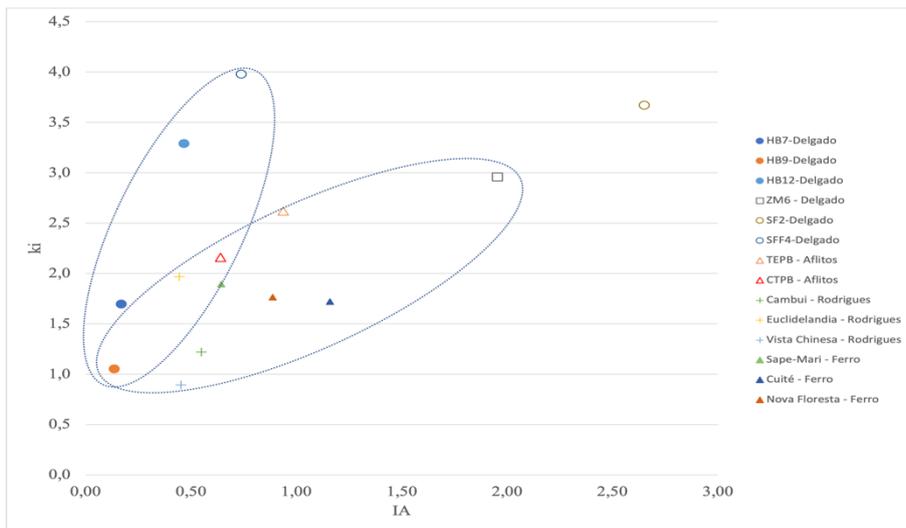
(b)

Figura 4.11 – a) relação  $kr \times ps$ ; (b) relação  $ki \times ps$ .

A Figura 4.13 apresenta o pH em água em função da relação entre o teor de argila e a densidade de grãos. Observa-se a tendência de aumento do pH em água com o crescimento da relação entre o teor de argila e a densidade de grãos. Embora outros fatores intervenham nessa relação, sendo o pH um parâmetro químico importante, aprofundar os estudos sobre essa relação pode ser proveitoso ao estudo da estabilização química dos solos. A norma do DNIT 419/2019 para estabilização do solo com cal, para o uso em pavimentos, já prevê o controle do pH em água, porém a norma DNIT 414/2019 para estabilização do solo com cimento não tem a previsão do controle do pH. Nos próximos tópicos, será mostrada a importância do controle do pH em água, bem como uma provável necessidade do controle do pH em KCl.



(a)



(b)

Figura 4.12 – (a)  $k_r$  x IA; (b)  $k_i$  x IA

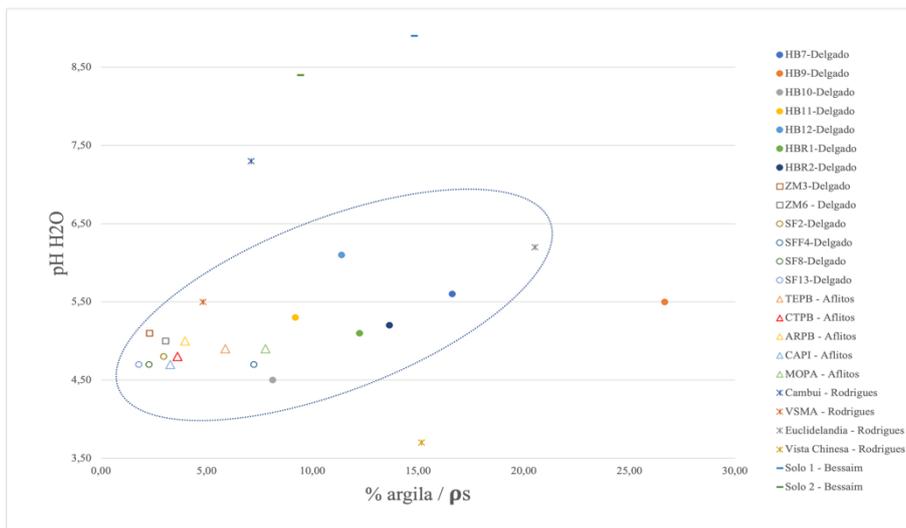


Figura 4.13 – pH x (% argila/ $\rho_s$ ).

### 4.3 Estabilização Químicas dos Solos com a Cal

Os estudos apresentados até o momento fornecem importantes relações entre as propriedades físicas e químicas dos solos e refletem diretamente no resultado da estabilização química. No entanto, além dos fatores condicionantes da interação entre o solo e o estabilizante químico, faz-se imprescindível conhecer o estado das misturas e seu impacto no comportamento.

Por exemplo, o comportamento dos solos saturados e não saturados depende dentre outros da porosidade e distribuição de poros no solo. No caso dos solos não saturados, são também fatores de grande relevância a umidade, o grau de saturação, a porosidade e a sucção matricial e osmótica, havendo, muitas vezes, uma grande discrepância entre as condições em que o solo é estudado em laboratório e aquela em que ele se encontrará no campo, inclusive quanto ao próprio tratamento dispensado ao solo.

Exemplificando, embora sempre vá ocorrer certa variação em parâmetros como a massa específica aparente seco e o grau de saturação, a dispersão dos resultados mostrados na Figura 4.14 aponta para certa disparidade com o esperado, refletindo a variabilidade de procedimentos e técnicas de estudo que vão desde a simples coleta à preparação das amostras para ensaios de laboratório.

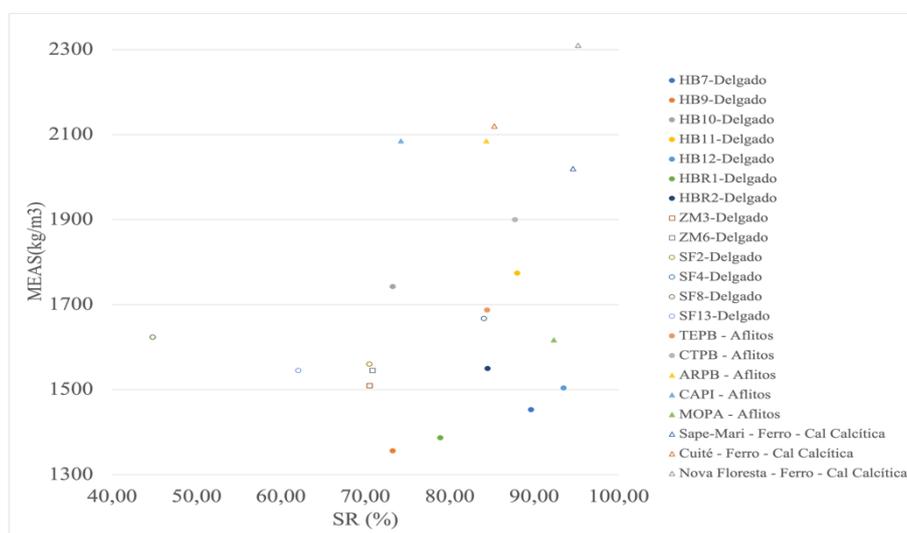


Figura 4.14 – MEAS x SR (%).

Diante da caracterização dos solos em seu estado natural e com dados do seu comportamento mecânico, sem aditivos químicos, serão apresentados os dados de estabilização apresentados pelo autor de cada estudo, buscando-se propor um entendimento fundamentado nos possíveis fenômenos físico-químicos que ocorrem durante a estabilização.

Assim, a Figura 4.15 mostra a mudança química, em termos de pH, para os solos considerados nesta análise e que foram estabilizados com cal. Algumas particularidades merecem destaque nessa figura:

- Verifica-se que, para os solos estudados, 2 % de cal é um teor que marca o início da estabilização do pH com o aumento do teor de cal. O teor de 2% de cal é estabelecido pelo DNIT como teor mínimo, no qual teores menores propiciarão uma distribuição desuniforme de aditivos, bem como não marcando o início da estabilização descrita anteriormente. O DNIT também estabelece 10% como o teor máximo de cal que se acredita estar ligado a critérios econômicos, nos quais se devam buscar materiais mais adequados ou outros aditivos.

- Os solos saprolíticos, embora com teor de minerais menos ativos, como o quartzo, vão intervir no resultado pH mais elevados, a ampliação do teor de cal aponta para a influência mineralógica, pois nesses solos, geralmente, fazem-se presentes argilominerais 2:1 com maior capacidade de troca iônica.

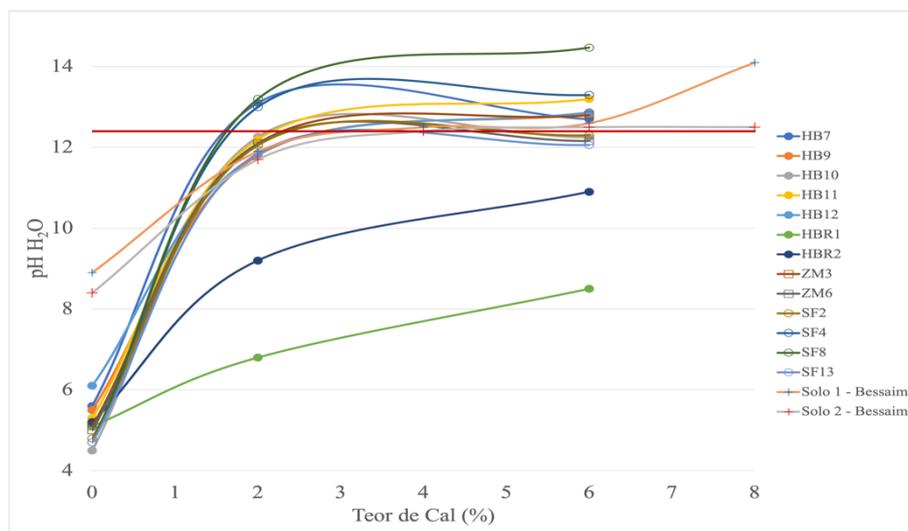
- Os solos com maior nível de intemperização se encontram agrupados, exceto os dois solos HBR1 e HBR2, cuja distinção pode estar refletindo diferenças na metodologia de preparação dos solos para o ensaio. Por exemplo, é sabido que a secagem do solo propicia a diminuição do pH, conforme descrito por Collins *et al.*, (1970), citado por Motta (2019).

Ao se analisar a Figura 4.15, um dos primeiros dados a se obter é a diferença entre o valor do pH em KCl e o valor do pH em água, ou seja, o  $\Delta\text{pH}$ , em especial para o solo puro. A mudança do parâmetro  $\Delta\text{pH}$  tem com o objetivo avaliar, pela ótica eletroquímica, as transformações que a adição da cal impôs ao solo. Essas mudanças são devidas às iterações químicas, trocas catiônicas, solubilizações e possíveis reações pozolânicas que possam ocorrer e, até mesmo, a uma possível formação de novos minerais, devido à adição da cal ao solo. Assim, o  $\Delta\text{pH}$  avaliará o equilíbrio das cargas elétricas dadas pela presença das argilas silicadas e/ou pela presença dos óxidos de ferro e alumínio, conforme descrito por Lima (2003), citando Kiehl (1979).

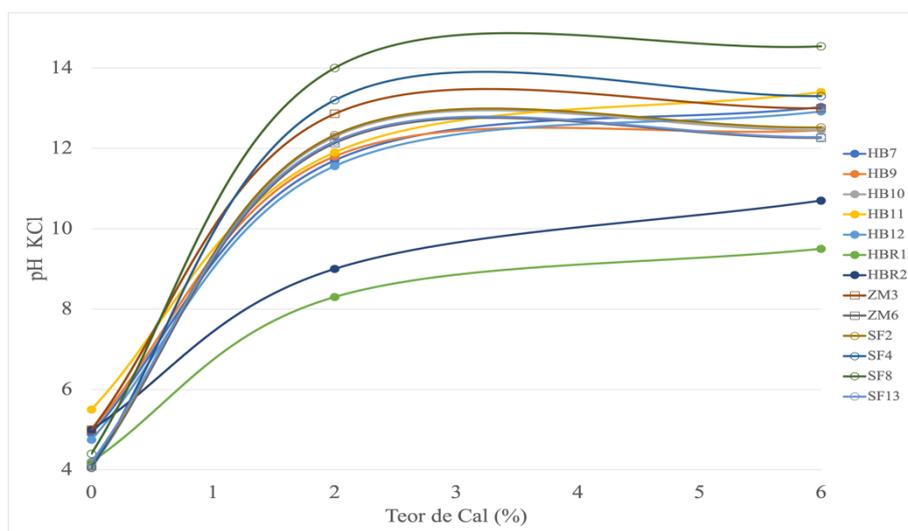
Da mesma forma, o PCZ é um dos parâmetros que, segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), citando Uehara e Gillman (1980), poderá ser utilizado como uma medição indireta do ponto de efeito salino nulo, em solos tropicais muito intemperizados, solos estes compostos por minerais de cargas variáveis.

Ao se analisar a Figura 4.15 (a), é possível observar que o pH em água de todos os solos se eleva como esperado. Porém nem todos atingem a condição de equilíbrio dada por Eades & Grim (1966), na qual esses autores apontam, em seus estudos, que o teor

necessário de cal é o teor que atinja o pH em água no valor de 12,4 (linha vermelha mostrada na figura).



(a)



(b)

Figura 4.15 – Variação do pH em função do teor de cal – (a) pH em H<sub>2</sub>O, (b) pH em KCl.

Esse conceito de estabilização, utilizando essa metodologia dada por Eades & Grim (1966), foi adotado recentemente pelo DNIT, em outubro de 2019, quando publicou no *site* do IPR a Norma DNIT 419/2019-ME. É importante destacar que essa norma descreve em uma nota que, para solos tropicais residuais ricos em óxi-hidróxido de ferro (Goethita e Hematita) e alumínio (Gibbsita), este valor de pH de 12,4 poderá não ser atendido.

Dessa forma, a avaliação do  $\Delta$ pH, juntamente com a observação do pH em água do solo, torna-se bastante importante para o entendimento químico dos solos, tendo em vista que o pH em água, previsto normativamente, nem sempre será atendido. Dessa forma, a

Tabela 4.5, apresenta, com base no valor de  $\Delta\text{pH}$  determinado para os solos estudados, o provável predomínio mineralógico em função do teor de cal utilizado.

Dos quinze solos analisados na Figura 4.15 (a), seis solos (HB10, HBR1, HBR2, ZM6, SF2 e SF13) não atingem o valor de pH, descrito por Eades & Grim (1966), com o teor máximo de cal estudado. Quando se analisa esses solos, dado pelas mudanças geradas pela aditivação do solo com a cal, que promoveu mudanças elétricas no solo, e observado o parâmetro  $\Delta\text{pH}$  na Tabela 4.5, tem-se que, para o teor de cal descrito, o solo terá predomínio de óxido de ferro e alumínio. Tal predominância pode ter contribuído para a não elevação do pH, conforme previsto na Norma DNIT 419/2019-ME.

Quando se analisa os dados mineralógicos do solo *in natura*, é possível verificar a presença de óxido-hidróxidos de ferro e alumínio (Gibbsita, Goethita e Hematita). No solo HB10, esses minerais somam 10,5%; na amostra ZM6 somam 16,36%; já no solo SF2, somam 9,3%; e no solo SF13, a somatória chega a 7,8%. Porém outros solos da mesma tabela atingem patamares maiores, como por exemplo o HB7, que soma 37,6% e o HB9, que soma 43,7%. Nesses dois últimos solos, é possível observar que mais da metade da somatória de Gibbsita, Goethita e Hematita, trata-se da Gibbsita, o que aponta para a complexidade no estudo de solos tropicais aditivados com cal.

Na Figura 4.16, é possível observar a variação do PCZ, devido às reações físico-químicas que ocorrem no sistema solo cal, a cada teor de cal apresentado, podendo, assim, conseguir avaliar a possível floculação/agregação e defloculação/desagregação do solo que, segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), descrevem sobre a tendência de as partículas flocularem em meios mais ácidos ou próximo ao PCZ e a se dispersarem em meios alcalinos e que apresentam pH em água se afastando do PCZ.

Dos resultados apresentados na Figura 4.16, cabe destaque o fato de os maiores valores de PCZ se situarem nos solos menos intemperizados, incluindo-se os de transição que integram a zona mosqueada.

Sob o ponto de vista do Método do ICL, proposto por Rogers *et al.* (1997), não se pode afirmar, com os dados disponíveis, se foi atingido uma constância no pH e nem o teor que, porventura, possa ter proporcionado essa constância.

A avaliação das estabilizações sob o ponto de Hilt & Davidson (1906), não pode ser avaliada, tendo em vista que seria necessário que se possuís mais dados para avaliar a variação do teor de cal com a variação do limite de plasticidade, juntamente com a resistência gerada pela adição da cal.

Tabela 4.5– Mudanças observações pelo  $\Delta pH$ 

Amostra	Teor de Cal (%)	$\Delta pH$	Mudanças observações pelo $\Delta pH$
HB7	0	-0,7	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	-1,4	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,33	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
HB9	0	-0,5	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0	Equilíbrio de Cargas
	6	-0,39	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
HB10	0	-0,45	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,03	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,21	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
HB11	0	0,2	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	2	-0,3	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,2	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
HB12	0	-1,35	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	-0,27	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,05	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
HBR1	0	-0,9	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	1,5	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	1	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
HBR2	0	-0,2	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	-0,2	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	6	-0,2	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
ZM3	0	-0,1	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,76	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,2	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
ZM6	0	-0,9	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,03	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,1	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
SF2	0	-0,69	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,28	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,22	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
SF4	0	-0,65	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,2	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0	Equilíbrio de Cargas
SF8	0	-0,3	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,8	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,07	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
SF13	0	-0,5	Predomínio de Argilas Silicatadas e elevada quantidade de Alumínio Trocável
	2	0,32	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável
	6	0,22	Predomínio de Oxido de Ferro / Alumínio e baixa quantidade de Alumínio Trocável

Dada a particularidade de os solos tropicais, profundamente intemperizados, terem os limites de plasticidade e de liquidez dependente da microporosidade que integra os agregados e microagregados, cuja água que os ocupa, efetivamente, não contribui para esses limites (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. 2021), faz com que as relações desses limites com o teor de cal sejam muito variáveis. No entanto, ao se considerar o índice de plasticidade, o efeito dessa água, no limite de plasticidade de liquidez, neutraliza-se. Com isso, o ideal nesses solos é fazer as análises em função do índice de plasticidade.

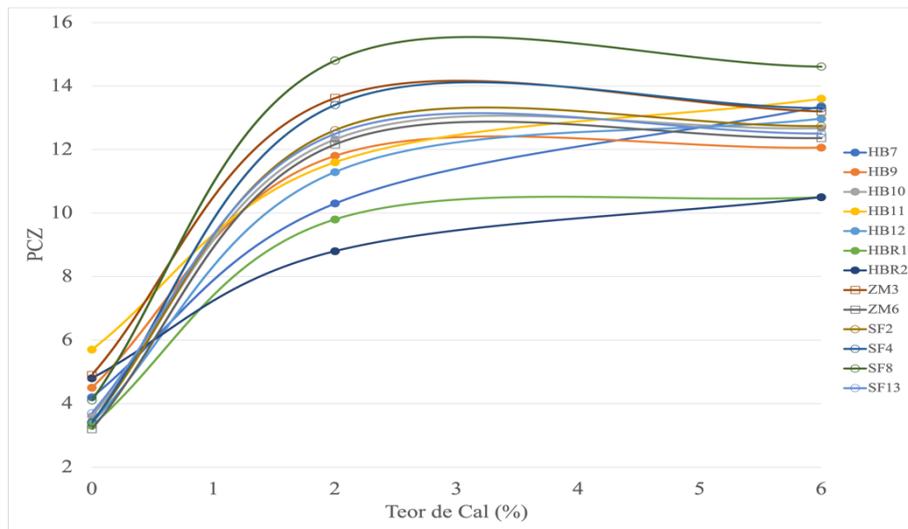


Figura 4.16 – Variação do PCZ com o teor de cal.

De uma forma geral, é esperado que a diminuição do índice de plasticidade ocorra com a ampliação do teor de cal como verificado para a maioria dos analisados na Figura 4.17.

O índice de plasticidade dos solos guarda um elo com sua fração ativa composta, especialmente, por argila. Com isso, analisou-se a relação existente entre o índice de atividade de Skempton ( $IA = IP / \% \text{ argila}$ ) e o teor de cal incorporado ao solo. Sob a ótica desse índice é possível avaliar a atividade coloidal do solo *in natura*, e de que forma a adição da cal gera influência neste parâmetro. Ao se observar a variação nesse parâmetro, é possível avaliar a forma com a qual a composição química e mineralógica da fração argila influenciará as propriedades geotécnicas, tanto do solo argiloso *in natura* quanto do sistema, quimicamente modificado, denominado solo cal.

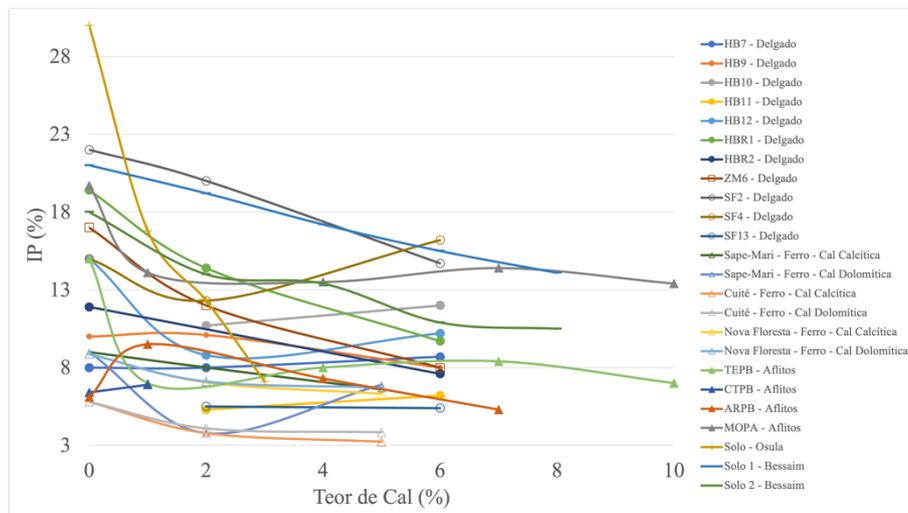


Figura 4.17 – Variação do índice de plasticidade em função do teor de cal adicionado.

Com isso, é apresentado na Figura 4.18 a variação do índice de atividade dado por Skempton, em função do teor de cal adicionado aos solos. É interessante observar nesta figura que os solos menos intemperizados e, portanto, possuindo minerais dotados de maior capacidade de troca iônica, foram os que apresentaram maior variação do índice de atividade com o teor de cal apontando para a necessidade de maiores teores de cal para se atingir as trocas iônicas necessárias para que se dê início às reações de cimentação.

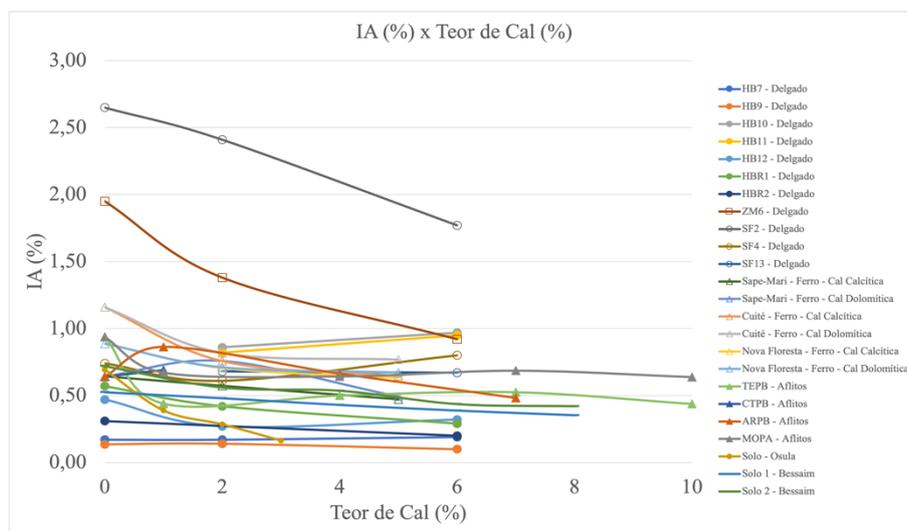


Figura 4.18 – Variação do índice de atividade em função do teor de cal adicionado.

Ao observar a Figura 4.17 e a Figura 4.18, é possível verificar que não ocorre, de maneira generalizada, a redução do índice de plasticidade e do coeficiente de atividade com a adição da cal ao solo. Solos como o HB10-Delgado, HB11-Delgado, SF13-Delgado, que eram classificados *in natura*, como não plásticos, passaram a apresentar plasticidade, quando aditivado. Ao se observar o índice de atividade de Skempton, para esses solos, nota-se que o solo *in natura* era considerado não plástico e, devido a esse parâmetro, não apresentava atividade coloidal. Com a adição de cal, ocorreu a ativação das propriedades mineralógicas, químicas e coloidais da fração argila, mesmo que em intervalo, dado pela classificação de Skempton ainda seja considerado como uma argila de atividade normal.

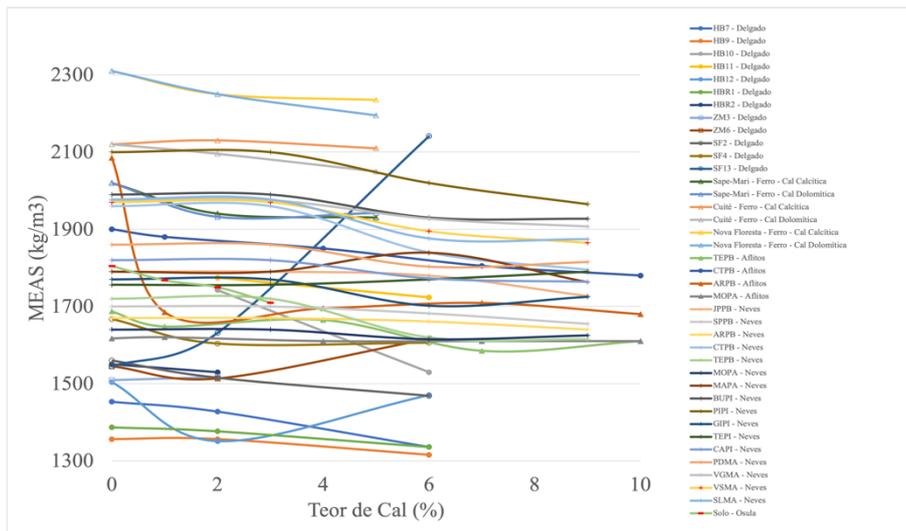
É provável que tal comportamento tenha se dado devido a desagregações nos solos mais intemperizados (HB10-Delgado e HB11-Delgado) e desfazimento de pacotes de argila no menos intemperizado (SF13-Delgado) conferindo-lhes maior atividade. Cabe destacar que tal particularidade, se confirmada, é relevante quando se estuda a melhoria do comportamento mecânico dos solos por meio da adição de produtos químicos como a cal.

A massa específica aparente seca, também sofreu modificação devido à variação do teor de cal no solo. De uma maneira geral, é observado na Figura 4.19 (a) que existe uma tendência de redução na massa específica do solo com a adição da cal, conforme também descrito por Brito *et al.*, (2017).

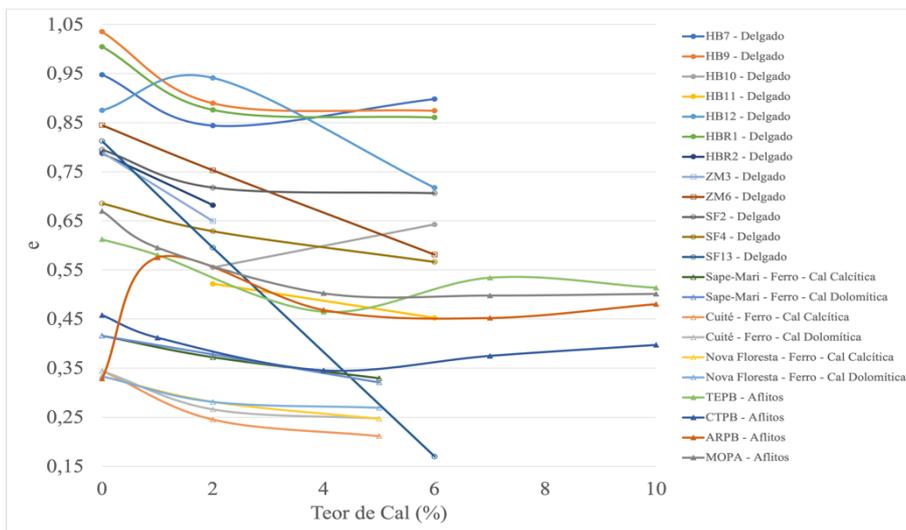
Os solos que têm como os dois primeiros componentes mineralógicos a Caulinita e o Quartzo apresentam comportamento bem semelhantes quanto à variação da MEAS, guardado as devidas proporções, devido às interações químicas fomentadas pelos outros minerais presentes. Essa semelhança é observada nos solos estudado por Neves, Aflitos, Delgado e Ferro, quando estudados com a cal cálcica.

Na Figura 4.19 (b), observa-se a variação do índice de vazios, com a variação no teor de cal. Para que fosse possível plotar a Figura 4.19 (b), utilizou-se a proposta apresentada por Llanque Ayala (2018), a qual, em seu estudo, mostrou que a densidade específica dos grãos ( $\rho_s$ ) se modifica com a variação no teor de cal. Nesse trabalho, foi apresentado que o  $\rho_s$  diminui de uma forma acentuada quando o teor de cal sai de 0% para 4%, e posterior a esse teor, tem a tendência de sofrer um aumento. Esse mesmo comportamento foi observado em sua tese de doutorado (Llanque Ayala, 2020). Seguindo esse raciocínio, e por intermédio de uma equação polinomial de terceiro grau, apuradas dos estudos de Llanque Ayala (2018), foi estimado, com o objetivo de uma melhor compreensão comportamental, o valor de  $\rho_s$  das amostras aditivadas com cal, proporcionando, assim, o cálculo do índice de vazios, de uma forma indireta. Dessa maneira foi plotada a Figura 4.19 (b).

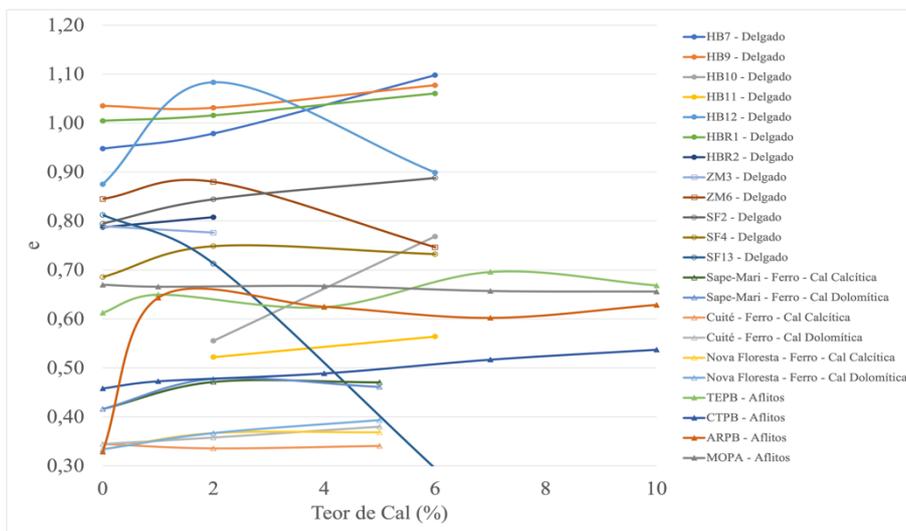
Já a Figura 4.19 (c) apresenta a mesma variação do índice de vazios em função do teor de cal, porém utilizando-se os estudos de Aguiar (2014). A metodologia para a obtenção da densidade específica dos grãos ( $\rho_s$ ) foi de forma similar ao descrito no parágrafo anterior. Além das variações serem mais amenas, verifica-se, nesta Figura, que algumas tendências de variação do índice de vazios com o teor de cal, invertem-se em relação ao observado na Figura 4.19 (b), colocando, assim, em evidência a relevância de se determinar os das misturas quando se pretenda analisar parâmetros como o índice de vazios e o grau de saturação.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.19 – (a) Variação da massa específica aparente seca, (b) variação no índice de vazios conforme Lanque Ayala (1988), (c) variação no índice de vazios conforme Aguiar (2014), todos em função do teor de cal adicionado.

Para os solos estudados, destaca-se, na Figura 4.19, o solo SF13-Delgado, que teve a elevação da massa específica, a medida em que se eleva o teor de cal no sistema. Esse solo, quando *in natura*, era classificado como não plástico, passando a ter um índice de plasticidade de 5,4%, quando misturado com 6% de cal. Ao se observar a Tabela 4.5, é possível verificar uma mudança de comportamento nas cargas de superfície do indicando, o  $\Delta pH$  que o solo deixou de ter predomínio de argilas silicatadas e alta quantidade de alumínio trocável, quando *in natura*, passando com a adição da cal, a ter predomínio de óxido de ferro/alumínio e também reduzindo a quantidade de alumínio trocável disponível no sistema. O pH em água, quando analisado em conjunto com o PCZ, indicou um desequilíbrio de cargas elétricas que, segundo Prado (2016), tende a fazer com que o solo sofra uma dispersão. Com a presença de partículas menores no solo e a desagregação gerada, é compreensível o aumento de massa específica aparente seca para este solo em questão. Guimarães *et al.* (1997) mostraram, ao estudar um solo laterítico, que a desagregação eleva o seu peso específico aparente seco e diminui a umidade ótima tendendo, no entanto, a piorar o seu comportamento mecânico.

Os solos ZM6-Delgado e HB12-Delgado tiveram um comportamento semelhante, porém em um primeiro momento ocorreu a diminuição de sua massa específica e com teores mais elevados, ocorreu uma elevação. Esses dois solos também tiveram o comportamento das cargas de superfície semelhante ao solo SF13, deixando de ter predomínio de argilas silicatadas e alta quantidade de alumínio trocável, quando *in natura*, para uma mistura de solo/cal, possuindo alto teor de óxido de ferro/alumínio e tendo disponível uma baixa quantidade de alumínio trocável. Ao se incrementar o teor de cal, o solo HB12-Delgado, em um primeiro momento, apresentou a diminuição no índice de plasticidade, com uma posterior elevação desse índice. Já o solo ZM6-Delgado apresentou uma diminuição no índice de plasticidade com o incremento do teor de cal.

Ao se plotar um gráfico no qual, o limite de plasticidade e o limite de liquidez, variam com o teor de cal adicionado ao solo, verifica-se comportamentos que podem indicar que o solo possa estar passando por processos físico-químicos de desagregação/defloculação.

O limite de liquidez se relaciona com a resistência ao cisalhamento do solo e, assim, sobre essa ótica, é possível avaliar que a elevação desse parâmetro, poderia indicar uma desagregação/defloculação do solo, gerando mais área de contatos entre as partículas, proporcionando, assim, uma maior resistência ao cisalhamento. Já o limite de plasticidade é relacionado com a resistência à tração, e a elevação do valor deste parâmetro indicaria um certo grau de desagregação/defloculação do solo, no qual o teor de finos gerados no

processo justificaria o aumento nesse parâmetro. O entendimento dos fenômenos da agregação/floculação também pode se dar nessa ótica, porém as considerações são opostas às dadas para os limites de liquidez e plasticidade. Assim, a Figura 4.20 e a Figura 4.21 apresentam a variação do limite de liquidez e a variação do limite de plasticidade, respectivamente, com o teor de cal adicionado ao solo.

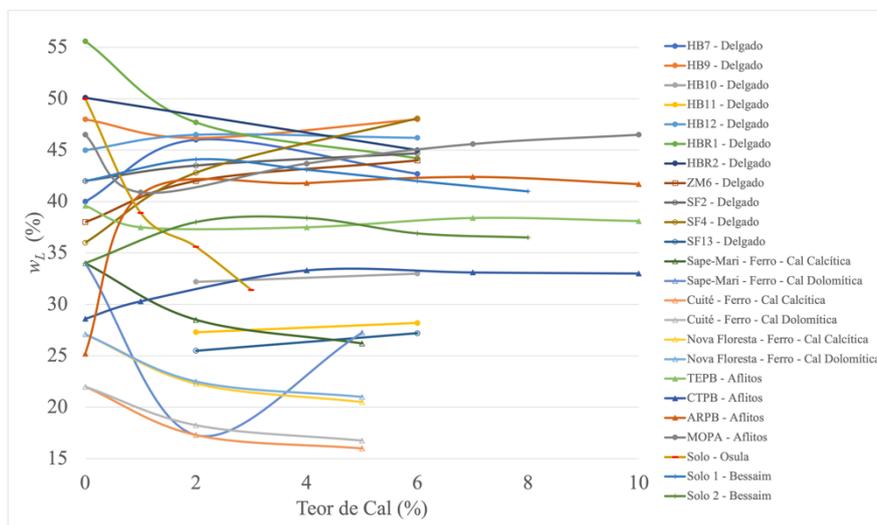


Figura 4.20– Variação do limite de liquidez em função do teor de cal adicionado.

Há que se ter em mente que, em muitos casos, as variações de umidade com o ganho de resistência nos limites de liquidez e plasticidade podem ser compensadas pela água que se encontrava nos microporos dos agregados não impactando, assim, em termos de umidade nos valores obtidos para  $w_l$  e  $w_p$ , conforme apresentado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) e Carvajal *et al.* (2005)

Da mesma forma, os solos estudados que têm predominância mineralógica de Quartzo e Caulinita apresentam a tendência de elevar o limite de liquidez nos primeiros teores de cal, tendendo a mostrar estabilidade com teores maiores, certamente, nos solos aqui analisados, tal fenômeno é consequência das trocas iônicas da caulinita. Os resultados obtidos por White (1955) e apresentados em Grim (1962) sugerem que a caulinita, ao receber o cálcio, tende a aumentar os limites de liquidez e plasticidade

Delgado (2007), em sua tese de doutorado, apresentou as curvas granulométricas dos solos que estudou *in natura*, com 2% de cal e com 6% de cal. As análises realizadas nesse trabalho, fixaram-se nas condições de umidade ótima do estudo apresentado e desses teores de cal descritos.

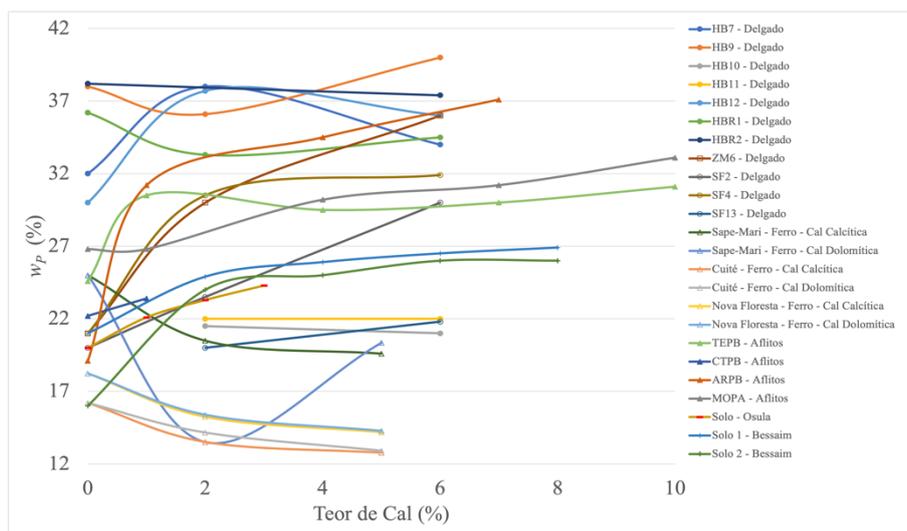


Figura 4.21– Variação do limite de plasticidade em função do teor de cal adicionado.

Assim, ao analisar as curvas granulométricas disponibilizadas, juntamente com os atributos, como pH, PCZ,  $\Delta$ pH, limites de Atterberg e constatações descritas no Anexo 1, conclui-se que:

- Para os solos mais intemperizados, estudados 2 %, o pH em água sofreu elevação, juntamente com o seu PCZ, porém não suficiente para promover um equilíbrio de cargas ( $\Delta$ pH), mantendo, de uma forma generalizada, um predomínio de cargas negativas. Essas cargas não equilibradas, tendem a gerar desagregações no solo. O pH, em água, observado ultrapassou o PCZ do solo *in natura*, fato que, segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2015), citando Rezende (2003), tende a desagregar o solo, somando-se a isso que o pH em água do solo estabilizado é mais alcalino que o PCZ desse sistema solo com 2% de cal, fato que esses mesmos autores descrevem que o solo tende a se dispersar. Ao se observar os limites de Atterberg, é possível atribuir que esses fenômenos são refletidos na tendência geral vista na elevação do limite de liquidez. Tais fenômenos podem ter refletido na curva granulométrica, na qual foram observadas partículas mais finas (desagregações), quando comparados com o solo *in natura*. Ao se verificar os parâmetros desses solos mais intemperizados com 6% de cal, é verificado, de maneira geral, um predomínio de cargas positivas, nas quais o  $\Delta$ pH tendeu a diminuir seu valor, em módulo, quando comparado ao solo *in natura*. Já o pH em água, mostrou-se ácido e próximo ao PCZ, do novo sistema solo + 6% de cal, o que está de acordo com o descrito por Rezende (2003) e Camapum de Carvalho *et al.* (2015). Os parâmetros de limite de liquidez e limite de plasticidade não podem ser analisados de forma isolada, tendo em vista que as agregações geradas tendem a “reter” água no interior dos agregados. Essa água não reflete no comportamento interpartículas, devendo-se analisar em conjunto com o índice de

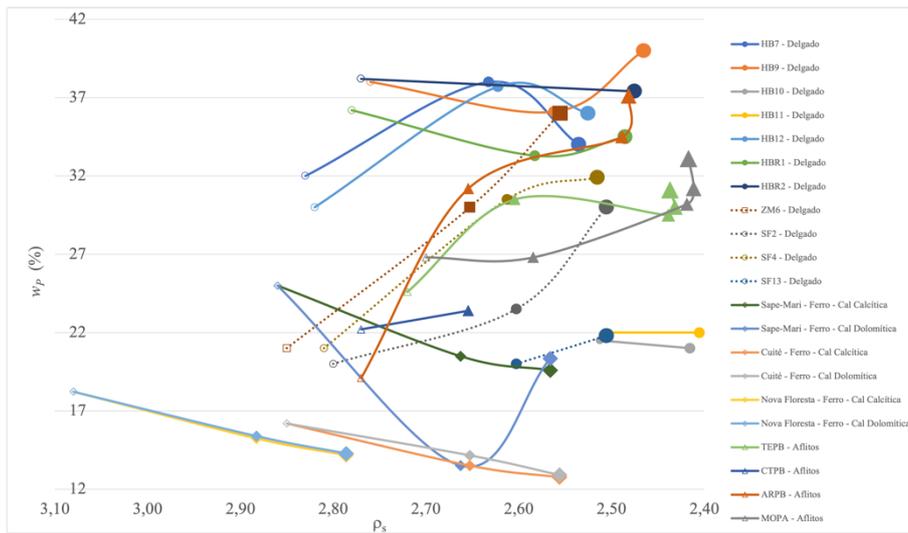
plasticidade (IP), pois essa água retida nos agregados existentes e formados é neutralizada quando se calcula  $w_l - w_p$ . Analisando-se o IP, esse, sim, tendeu a diminuir com a incorporação crescente de cal, o que aponta para um melhor comportamento mecânico. Corrobora com esses entendimentos o fato de que pode ser observado, na curva granulométrica, sem o uso de defloculante, a presença de partícula maiores.

- Os solos saprolíticos e os solos da zona mosqueada, já apresentaram, com a aditivção de 2% de cal, uma inversão de cargas elétrica, passando a ter o predomínio de cargas positivas, com os 2% de cal. Essa inversão de cargas promoveu, de uma forma geral, um melhor equilíbrios de carga, proporcionando também que o pH em água ficasse mais ácido que o PCZ do novo sistema. Ocorrem pequenas desagregações ou desempacotamento de filossilicatos, tendo em vista a influência mineralógica de argilominerais 2:1 que, geralmente, fazem-se presentes. Com este teor de 2% de cal, pouca ou nenhuma mudança no índice de plasticidade foi observada. A adição de 6% de cal a estes solos fez o pH em água ficar mais próximo ao PCZ, proporcionado um melhor equilíbrio de cargas elétricas, nas quais o módulo do  $\Delta pH$  tendeu a diminuir. A granulometria desses solos não sofreu relevantes alterações devido ao teor de minerais menos ativos, como o quartzo. Os limites de plasticidade e de liquidez tenderam a aumentar resultando, no entanto, em uma tendência de redução do índice de plasticidade apontando conjuntamente para uma melhoria em seu comportamento. Cabe lembrar que o aumento em  $w_p$  e  $w_l$  significa que o solo passa a apresentar a mesma resistência para uma umidade maior, ou seja, aponta para uma ampliação das forças interpartículas.

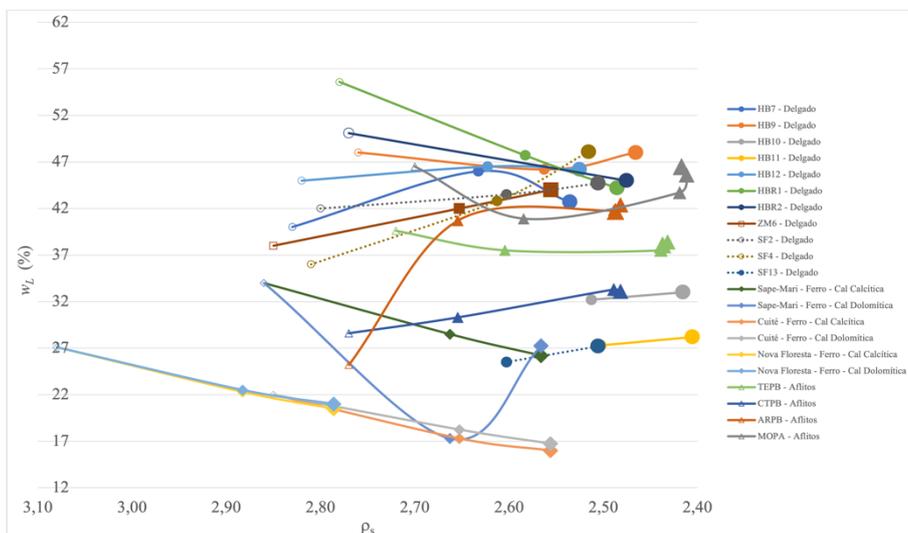
Um aspecto importante a ser realçado diz respeito ao fato de alguns solos, como os estudados por Ferro (1976), apresentarem redução de  $w_l$  (Figura 4.20) e  $w_p$  (Figura 4.21) com a incorporação de cal, o que estaria a sinalizar para uma redução das forças interpartículas se considerado o mesmo nível de hidratação do solo. Conjuntamente o  $w_l$  e  $w_p$  levaram a uma tendência de redução do IP (Figura 4.17) indicando uma redução na faixa de umidade em que o solo se comportaria de modo plástico, requerendo, assim, análises complementares dos parâmetros definidores do comportamento mecânico do que estaria em contraposição, a sinalizar para a melhoria do comportamento mecânico dos solos. Vargas (1977) apresenta ilustrações sobre a relevância e o impacto da origem do solo sobre a plasticidade, ou seja, sobre a influência da composição químico mineralógica sobre a plasticidade do solo. Esses e outros como a densidade de grãos são fatores intervenientes no comportamento mecânico dos solos e dos solos estabilizados quimicamente, que devem ser entendidos como intrínsecos, no entanto, há que se

considerar ainda os extrínsecos como teor de umidade, porosidade qualidade do fluido do meio que refletem diretamente na sucção e comportamento mecânico do solo.

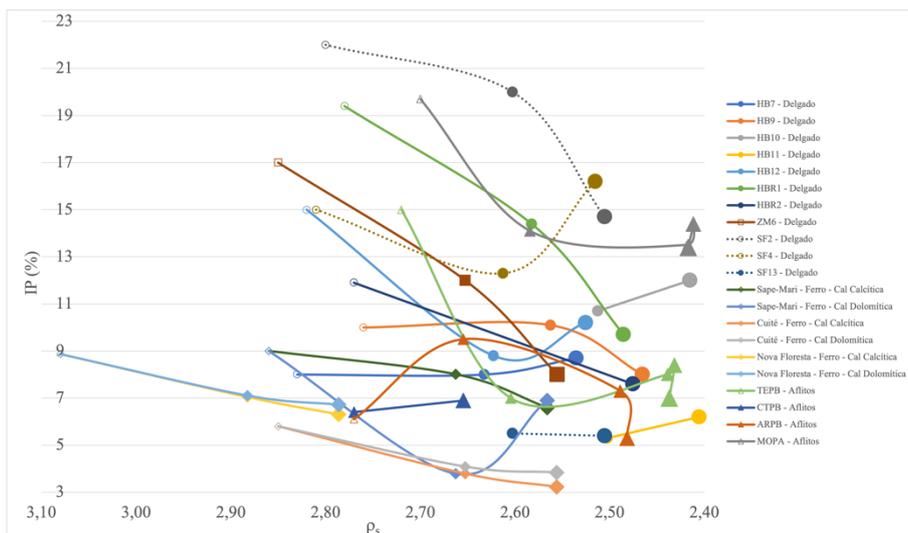
Então, apontando agora para a relevância da densidade dos grãos e dos limites de Atterberg, por meio do índice de plasticidade, quando se estuda a estabilização química dos solos foi elaborada a Figura 4.22. Nessa Figura, os símbolos vazios indicam o solo natural e os pontos cheios indicam a adição química com o tamanho que se amplia com o seu teor. Observa-se nas Figuras (a) e (b) a não definição de uma tendência única, respectivamente, para o limite de plasticidade ( $w_p$ ) e para o limite de liquidez ( $w_l$ ) com a incorporação crescente do aditivo químico. Essa indefinição poderia estar atrelada à formação ou destruição de agregados sem que se remova de  $w_p$  e de  $w_l$  a umidade presente nas agregações. Já nas Figuras 4.22 (c) e 4.22 (d), em que se considera no índice de plasticidade que as presenças dessa umidade de saturação dos agregados praticamente se anulam, observam-se tendências mais claras de variações das densidades de grãos com o IP. De um modo geral, observa-se a tendência do IP (c) diminuir, com a diminuição da densidade dos grãos ocorrendo, no entanto, para alguns solos, ocorre a inversão dessa tendência ao se ampliar o teor de aditivo. Analisando-se o impacto do estabilizante químico na densidade de grãos por meio da relação com o coeficiente de atividade de Skempton (IP / % de argila), Figura 4.22 (d), verifica-se não só a variação do impacto do aditivo químico nas tendências em função do tipo de solo como o fato de que a depender do solo, a influência no IP é compensada pela mudança na textura horizontalizando a tendência, enquanto para outros solos essas alterações são dispares. Mas qual seria a relevância dessas constatações quando se está a avaliar o comportamento mecânico dos solos estabilizados quimicamente? Teria alguma? Embora requerendo mais estudos específicos, por certo que sim, pois os limites de plasticidade e de liquidez utilizados na determinação do IP refletem diretamente as forças de superfície das partículas que são sensíveis à química do meio, alterada com o estabilizante, enquanto a textura não só interfere nesses limites, mas, principalmente, são responsáveis pelo maior ou menor contato interpartículas intervindo, diretamente, na mobilização do atrito. Portanto, essas análises são, no mínimo, dignas de maiores reflexões quando se estuda a estabilização química dos solos.



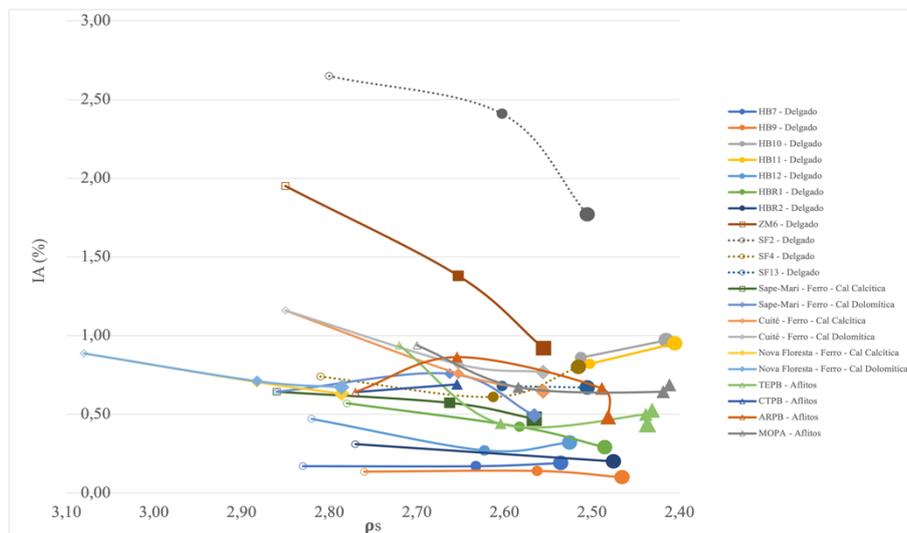
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.22 – Relação entre a densidade dos grãos e: (a) wp; (b) wl; (c) IP; (d) IA

Ao analisar os dados da Figura 4.15, Figura 4.16 e da Tabela 4.5, sob a ótica descrita por Prado (2016), que descreveu que a floculação máxima ocorrerá no PCZ, e que esse mesmo autor, citando Mekaru & Uehara (1972), afirma que no PCZ, o pH em água é igual ao pH em KCl, ou seja, o  $\Delta\text{pH} = 0$ .

Com esse entendimento descrito, são apresentados, na Figura 4.23, os gráficos da variação do  $\Delta\text{pH}$  versus teor de cal, que, pelos estudos apresentados, indicaria o valor provável do teor ótimo de cal para cada solo, no qual o  $\Delta\text{pH}$  será igual a zero e a floculação tenderá a ser a máxima para cada sistema solo/cal.

Ao se analisar as imagens da Figura 4.23, é possível observar que, com a variação do teor de cal, ocorrem mudanças elétricas no solo. Quando o gráfico corta o eixo das abcissas, é um indicativo de teor ideal de cal, no quesito de se obter a máxima floculação.

É possível observar na imagem (g) da Figura 4.23 que para esse solo, com os teores de cal estudados, não foi possível ocorrer o equilíbrio de cargas e, por consequência, o PCZ não foi atingido; assim, esse solo, para esses teores, não apresentará a máxima floculação. Essa afirmação não quer dizer que não terá floculação, mas, apenas que, devido às condições de domínio de carga, existira forças de repulsão atuando.

Já na imagem (d) da Figura 4.23, observa-se dois pontos em que o  $\Delta\text{pH}$  promoveu um equilíbrio de cargas elétricas, ou seja, para este solo, existem dois prováveis teores de cal, nos quais a floculação será máxima. Esse fenômeno pode estar de acordo com o descrito por Camapum de Carvalho *et al.* (2020), os quais descrevem a possibilidade da química da solução aquosa, que foi alterada devido à adição da cal interagir com a superfície interna dos agregados existentes naturalmente proporcionando novas reações.

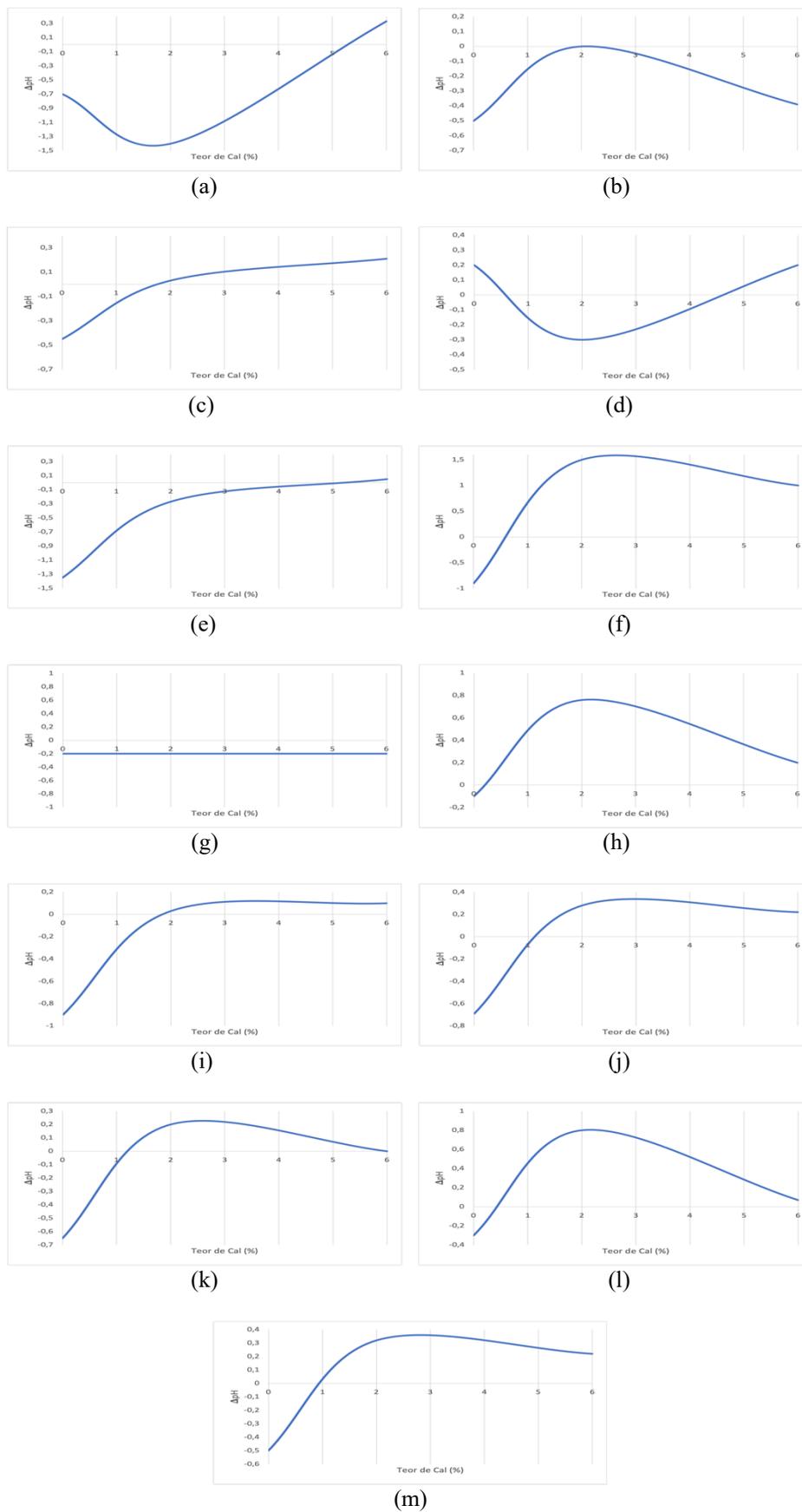


Figura 4.23 – Variação do  $\Delta pH$  em função do teor de cal no solo – (a) HB7-Delgado, (b) HB9 -Delgado, (c) HB10-Delgado, (d) HB11-Delgado, (e) HB12-Delgado, (f) HBR1-Delgado, (g) HBR2-Delgado, (h) ZM3-Delgado, (i) ZM6-Delgado, (j) SF2-Delgado, (k) SF4-Delgado, (l) SF8-Delgado, (m) SF13-Delgado.

Nas imagens (f), (h), (j), (k), (l) e (m) da Figura 4.23, podem estar indicando que para teores maiores, do que os estudados, poderá apresentar outro teor de cal, no qual o  $\Delta pH$  indicará um novo equilíbrio de cargas. Esse novo ponto pode estar relacionado com os fenômenos de troca catiônica, carbonatação e reações pozolânicas, bem como com a interação da nova química da solução aquosa com o interior dos agregados, conforme descrito por Camapum de Carvalho *et al.* (2020). Essas possibilidades, deverão ser avaliadas por estudos futuros.

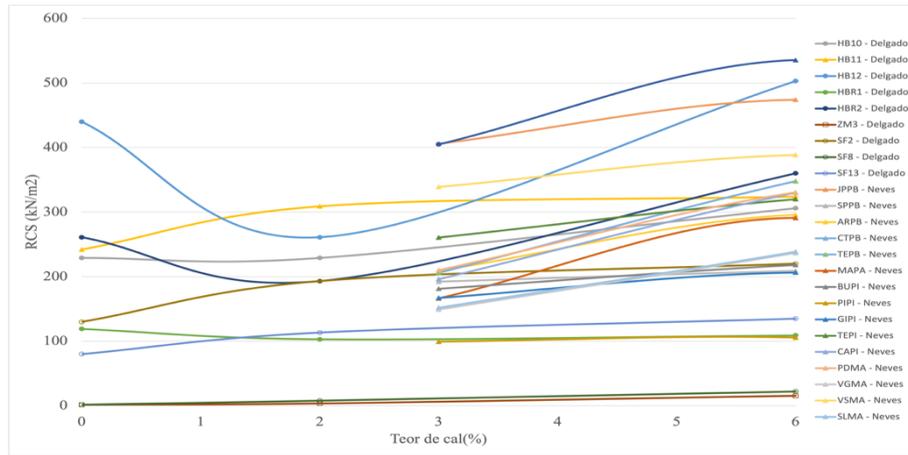
Diante dessas análises, é ponderado que os solos mais intemperizados, tendem a apresentar, quando *in natura*, um  $\Delta pH$  menor que zero, ou seja, com predomínio de cargas elétricas negativas. O equilíbrio das cargas elétricas, visando a uma maior flocculação, de um modo geral, ocorre com teores de cal previstos para a faixa comumente adotada para melhoria de solo (entre 2% e 5% de cal), devendo ser estudado para cada caso. Já com os solos transicionais e os solos saprolíticos, o equilíbrio das cargas, tendem a ocorrer, para os solos estudados, com teores de cal menores que 2%, apontando para que possa existir outro ponto de equilíbrio de cargas para teores maiores que 6% de cal.

Dessa forma é observada que a variação na textura do solo é dependente de vários fatores de cunho químico, mineralógico e elétrico, nos quais observações fenomenológicas devem ser mais bem estudadas para que um entendimento mais amplo dessas particularidades seja analisado e discutido, contribuindo, assim, para um melhor entendimento da interação no sistema solo/cal.

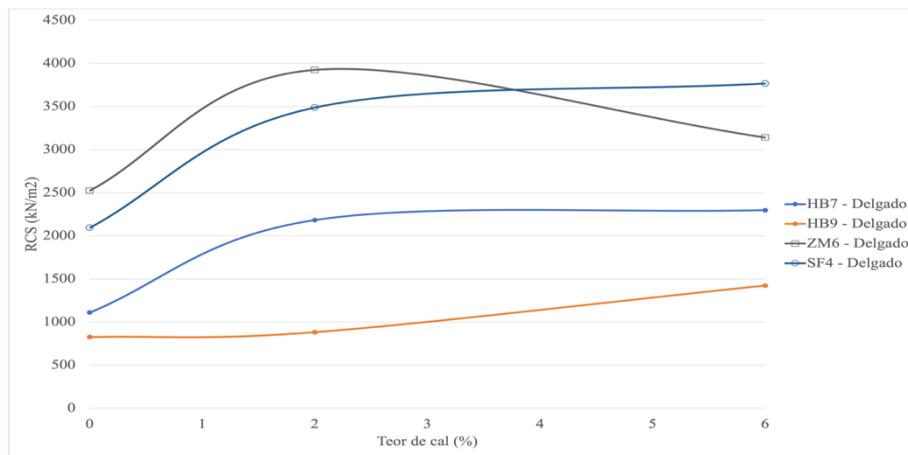
De todos os atributos intervenientes nas propriedades e comportamento dos solos submetidos a intervenções de ordem química, muitos deles previstos e determinados em um estudo, o comportamento mecânico é o único com o qual muitos autores se preocupam em analisar, supondo que o solo, ou mistura de solo com aditivo, irá simplesmente se comportar, conforme avaliado por meio dos ensaios que definiram esse comportamento. Mas ficam aqui algumas indagações: o comportamento mecânico foi efetivamente avaliado nas condições de compactação tomadas como base ou passaram durante o processo de cura em laboratório por alterações de porosidade e umidade? Em condições de cura de campo, as propriedades físico-químicas das misturas com o solo seriam preservadas? Não sendo, quais seriam os reflexos nas propriedades e comportamento desses solos e dos solos circunvizinhos para os quais a química pode ter sido carregada?

A maioria dos estudos que compõe esta pesquisa apresentaram valores de resistência apenas considerando o solo em condição saturada, que, de certa maneira, pode oferecer uma relativa maior tranquilidade ao projetista. Esta tranquilidade, é geralmente traduzida pela retirada da resistência que era conferida pela sucção ao solo, resistência

esta que tende a se ampliar à medida que a umidade se afasta da umidade de saturação. Mas ainda, assim, fazem-se necessárias análises complementares sobre o impacto dessa condição de saturação completa na sucção osmótica introduzida pelo aditivo químico que pode não perdurar durante a vida útil da obra.



(a)



(b)

Figura 4.24 – Resistência à compressão simples em função do teor de cal.

A Figura 4.24 apresenta os valores de resistência à compressão simples dos solos em função do teor de cal. Devido à escala, optou-se por apresentar os resultados dividindo-se a figura em (a), RCS 0 à 600 kN/m<sup>2</sup>, e (b), 0 à 4500 kN/m<sup>2</sup>. A análise dos resultados apresentados nesta figura pode ser conjugada com os resultados de IP, IA e  $\Delta pH$  em função do teor de cal, lembrando que outros fatores, como sucção, interferem na resistência e que os ensaios de RCS são realizados com o solo ou mistura em condição não saturada.

É importante observar o comportamento dos solos estudado por Neves (1989). Ao se analisar a composição mineralógica, verifica-se que esses solos têm como mineral predominante a Caulinita, seguido pelo Quartzo. Essa predominância da Caulinita junto

com o Quartzo, proporcionou um aumento, quase que linear, e constante, conforme é aumentado o teor de cal nesses solos. Nesses solos, a fração areia média corresponde a 76,2%, fração esta que, pela resistência, não reagiram quimicamente com a cal. Porém as outras frações (silte + argila), correspondem a 23,8%. Essas frações, principalmente a fração argila, reagiram com a cal, e as possíveis reações que possam ter surgido, complementaram a resistência dada pela areia presente (Quartzo), e complementada pelas reações com o aumento no teor de cal.

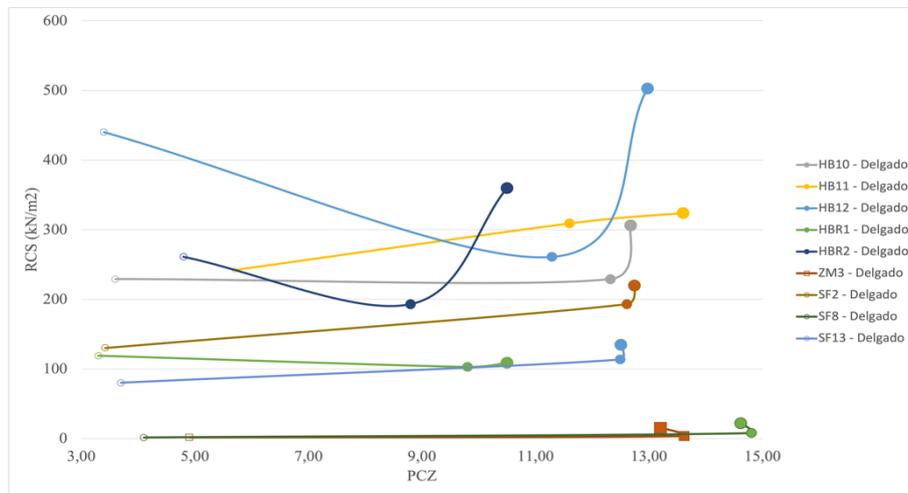
Os solos HBR2-Delgado e HB12-Delgado, apresentaram uma forte queda em sua RCS, com 2% de cal e uma forte elevação 6% de cal. O mineral predominante para o solo HB12 é a Caulinita seguido do Quartzo. A fração areia destes solos, correspondem em média 10,4 %, sobrando para as outras frações (silte + argila) 89,6 %. Assim, é possível entender a queda de resistência do solo quando aditivado em 2% de cal, com este teor, os processos de desagregação seriam mais atuantes na parte fina do solo. Esse entendimento é corroborado pelos resultados apresentados na Figura 4.23 (e), que mostra para o solo HB12-Delgado, que o equilíbrio de cargas, ou seja, a floculação, ocorre com quase 5% de cal, o que pode ter promovido o aumento de resistência mostrado na Figura 4.24 ao se acrescentar 6% de cal.

A Figura 4.25 apresenta os valores de resistência à compressão simples, em função do ponto de carga zero (PCZ). Ao se analisar esta, é possível observar que, para um determinado PCZ, o comportamento mecânico do solo muda, sendo um indicativo da existência de um PCZ ideal, fato que deverá ser mais bem estudado e constará com uma das sugestões para trabalhos futuros. Faz-se, no entanto, relevante observar, nessa Figura, a queda da RCS com posterior elevação, com o aumento do PCZ para os solos HB12 e HBR2 e tendência à diminuição da RCS, com o aumento da PCZ para o solo ZM6, os quais apresentaram comportamentos semelhantes aos observados na variação da RCS com o teor de cal.

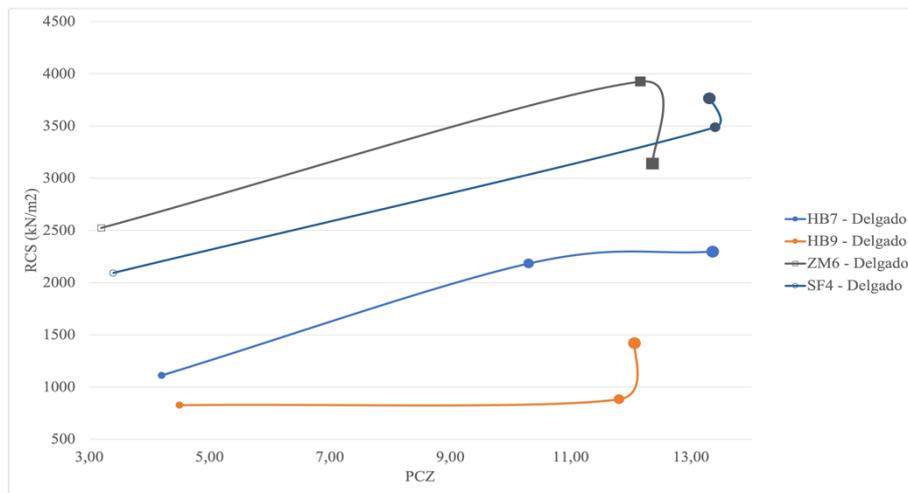
De uma forma geral, ao se observar a Figura 4.24, consegue-se apurar que as resistências crescem com o aumento do teor de cal adicionado ao solo. Somando essa análise com a da Figura 4.25 é possível concluir que existe um teor máximo de cal ideal, e que adições de cal além desse teor máximo, pode promover queda no desempenho mecânico do sistema solo cal.

Outro aspecto relevante e analisado por alguns autores (TRB 1987, Delgado 2007 e Dalla Rosa 2013) para condições de cura em laboratório é a influência do tempo de cura no comportamento do solo, tendo em vista a possível ocorrência de reações de longo prazo que ocorrem nesse sistema solo-aditivo químico, denominada de reações

pozolânicas. A melhoria do comportamento mecânico das misturas com o tempo de cura reflete no melhor desempenho das obras geotécnicas e podem levar à utilização de menos aditivo, caso se planeje adotar a resistência com prazos maiores de cura.



(a)



(b)

Figura 4.25– Resistência à compressão simples em função do PCZ.

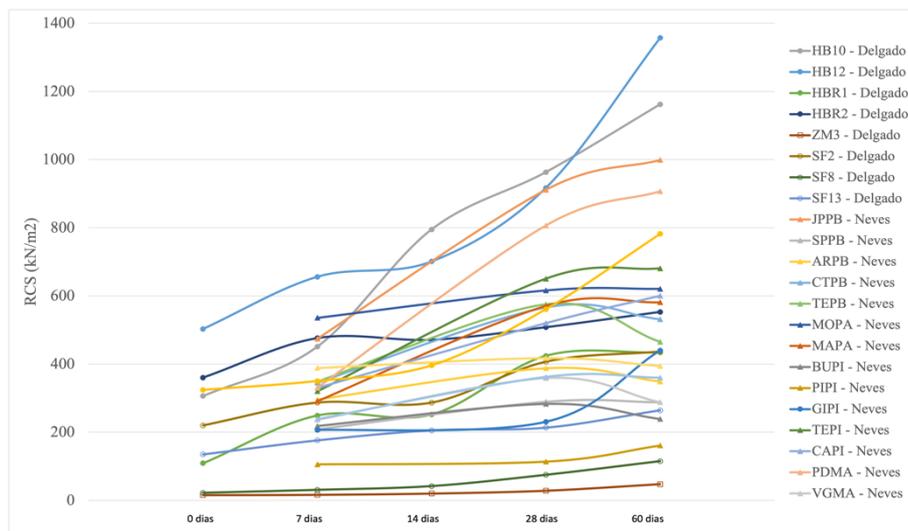
Com a adição da cal ao solo, é esperado um ganho de resistência, relacionados em um momento inicial com as trocas catiônicas e com os fenômenos de floculação e/ou agregação. Em intervalos de tempo maiores, têm-se as reações pozolânicas que conduzem a uma melhoria do comportamento mecânico e que, ocorrendo, tendem a ser mais permanentes.

A Figura 4.26 apresenta as variações da resistência à compressão simples do solo com o tempo. Esta avaliação de comportamento mecânico é importante, tendo em vista que, dessa forma é possível avaliar a evolução da resistência do solo observando-se os ganhos e eventuais perdas de resistência de algum dos solos com o tempo. Os resultados

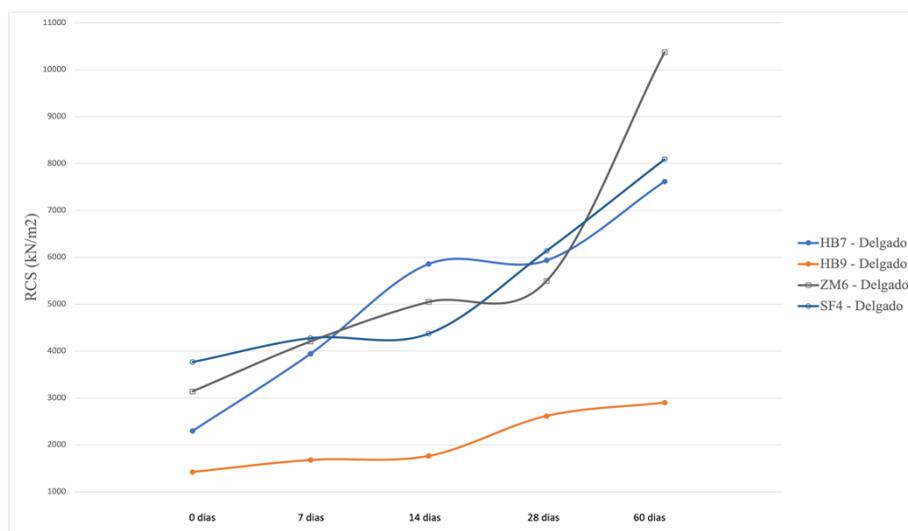
mostrados indicam que alguns solos apresentam ganhos e outros perdas de resistência a partir dos 28 dias de cura, exemplificando essa perda de resistência os solos CTPB-Neves, TEPEB-Neves, VSMA-Neves, VGMA-Neves, BUPI-Neves. Com isso, embora os comportamentos verificados mereçam maiores análises e reflexões, o prazo de 60 dias de cura pode ser entendido como um prazo relativamente curto para análise, quando se pensa nas reações químicas do solo de longo prazo. No entanto, voltando a atenção para os resultados apresentados, alguns aspectos merecem atenção e fica aqui a pergunta: nos casos em que ocorreram a perda de resistência com a ampliação do tempo de cura não teria essa redução na resistência sido fruto da desidratação excessiva dos corpos de prova?

Outro aspecto relevante, conforme apresentado na revisão bibliográfica, diz respeito à possibilidade de ocorrência de processos de migração química, da água dos poros, que agora está modificada pela adição da cal, para o interior dos agregados, conforme relatado por Camapum de Carvalho e Gitirana Jr (2021), podendo gerar desagregações no solo com o tempo, desagregações estas, em consonância com estudo apresentado por Marino *et al.* (2022), que poderão resultar na perda de resistência do solo. Estudos complementares, no caso das estabilizações químicas dos solos, devem ser desenvolvidos com o intuito de entender melhor se essas desagregações geradas ao longo do tempo poderão influenciar nas características e comportamento mecânico do solo.

Alguns dos trabalhos analisados avaliaram a resistência dos solos em termos de CBR, após inundação, sendo esse ensaio ainda muito usual e utilizado em pavimentação rodoviária no Brasil. A Figura 4.27 apresenta os resultados dos ensaios realizados pelos autores dos estudos após inundação dos corpos de prova. Observa-se nessa figura que alguns solos apresentaram redução, nesse parâmetro, após a incorporação de um determinado teor de cal, geralmente após 6% de cal. Os solos Sape-Mari-Ferro e Cuité-Ferro quando aditivados com cal dolomítica apresentaram redução no CBR, quando aditivados com 2% de cal dolomítica, e um aumento nesse parâmetro quando aditivado com 5%. Já o solo Nova Floresta-Ferro, com 2% de cal dolomítica, apresentou uma elevação no parâmetro CBR e uma pequena redução com 5% dessa cal.



(a)

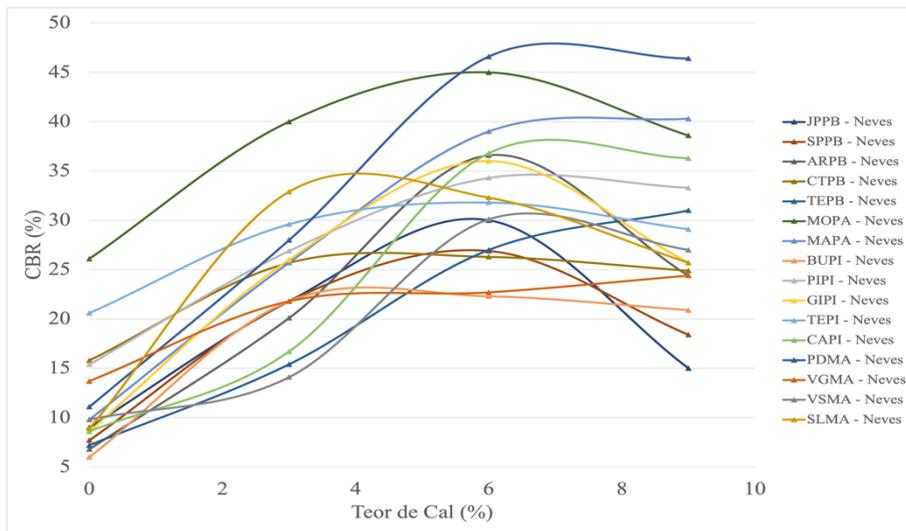


(b)

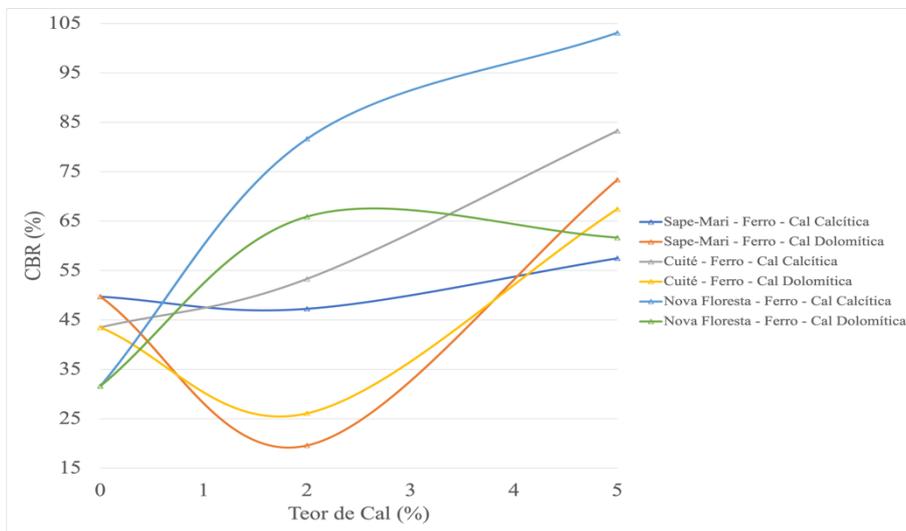
Figura 4.26 – Variação de resistência com o tempo, solos com 6% de cal.

A Figura 4.28 apresenta os valores de CBR destes solos sem saturação, indicando ganhos de CBR, inclusive, com o teor de 2% de cal, indicando, assim, a importância da sucção quando se analisa o comportamento mecânico dos solos não saturados; cabendo destacar que a sua consideração, assim como o impacto que ela gera no comportamento mecânico, deve ser contextualizado considerando-se a faixa de umidade de equilíbrio de campo.

Além da solubilização e migração da cal, diminuindo as reações físico-químicas esperadas, as variações da sucção matricial e osmótica são um tema que deverá ser bastante estudado, analisado e discutido em futuros estudos, tendo em vista que, principalmente no meio rodoviário, os solos podem ser considerados, na maioria dos casos, como presentes em estado não saturado. De modo a destacar sua relevância, a Figura 4.29, apresenta a redução do CBR quando da saturação dos solos com 2% de cal.



(a)



(b)

Figura 4.27 – Variação do CBR com teor de cal – solo saturado.

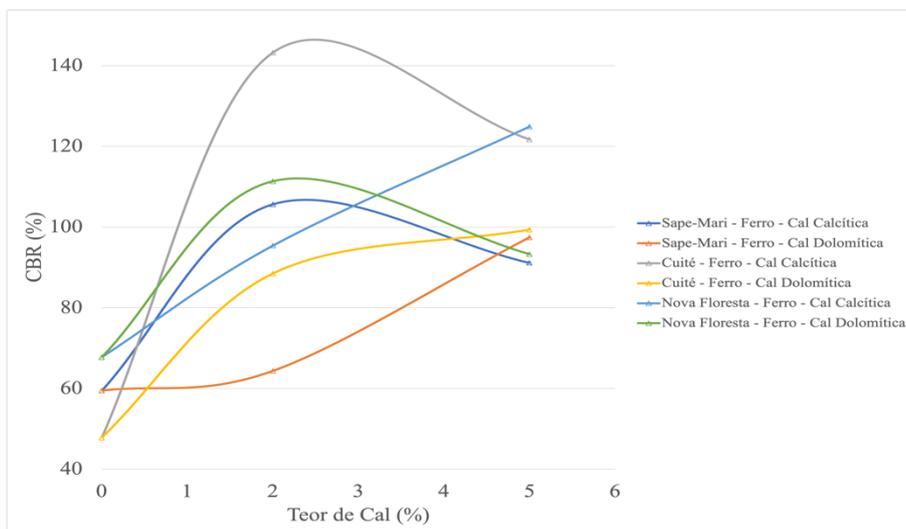


Figura 4.28 – Variação do CBR com teor de cal – solo não saturado.

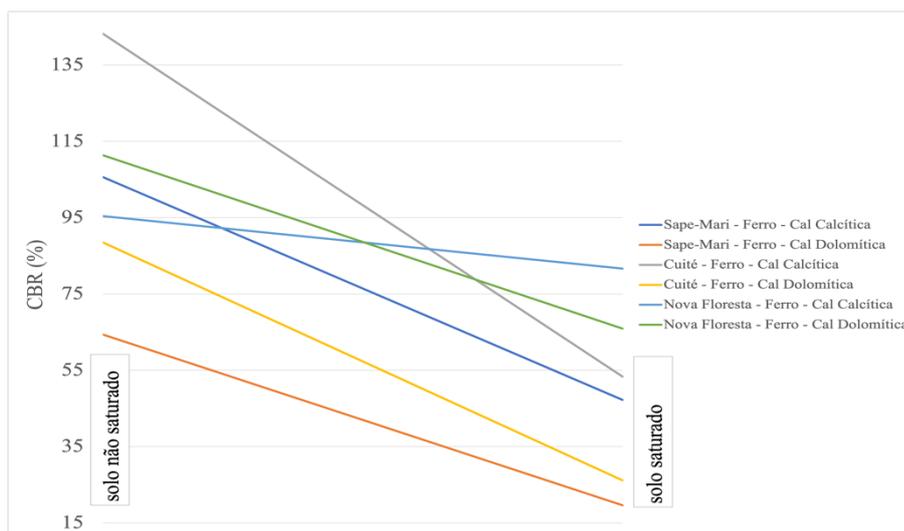


Figura 4.29 – Perda de CBR devido à saturação.

#### 4.4 Estabilização Químicas dos Solos com Cimento

Uma alternativa adotada na melhoria do comportamento mecânico dos solos é a utilização do cimento como agente estabilizador. Essa alternativa tem como objetivo a obtenção de materiais mais rígidos, nos quais a reação da água com o cimento poderá proporcionar, por meio de cimentações, maiores resistências mecânicas para os solos, adequando-os para a sua utilização. Embora não seja tratado nesse estudo, cabe salientiar o fato de muitas vezes se associar o uso concomitante da cal e do cimento na estabilização dos solos. A ideia, nesses casos, é que a cal proporcione as trocas iônicas e o cimento entre em seguida gerando as reações cimentantes.

A adição do cimento, principalmente em baixos teores, atuará como modificadores dos solos, assim como no caso do uso da cal como aditivo químico. Os limites de Atterberg, também apresentam a definição do comportamento dos solos aditivados com cimento, no qual se espera que ocorra a reação química da água incorporada ao sistema solo cimento, com o próprio cimento, bem como devido a outras reações do cátion  $Ca^{2+}$ , disponível no cimento ou formado como subproduto das reações químicas, na forma de hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$ .

A Figura 4.30 ilustra a variação no índice de plasticidade, com a variação do teor de cimento.

O solo denominado “Solo – Joel”, foi estudado com adição de teores de areia além da adição dos teores de cimento. É importante a análise desta variação dos limites de Atterberg, tendo em vista que, como observado no trabalho de Joel (2011), dependendo da distância da jazida ou dependendo da disponibilidade do cimento, a areia ou o cimento

poderão ser utilizados em conjunto ou separadamente, para adequar o solo para ao uso pretendido, considerando-se o fator custo.

Com as reações iniciais com a adição do cimento, deve-se verificar, separadamente, da mesma forma que no sistema solo-cal, o comportamento do limite de liquidez e do limite de plasticidade que, como já descrito anteriormente, relacionam-se com a resistência ao cisalhamento e a resistência à tração no solo, respectivamente.

A Figura 4.30 apresenta a variação do limite de liquidez com a variação do teor de cimento considerando-se as diferentes incorporações de areia. Nessa figura, é possível verificar para o Solo – Joel, que esse parâmetro sofreu uma redução com o incremento no teor de cimento. Da mesma forma, observa-se um certo grau de paralelismo, com a variação na porcentagem de areia utilizada, apontando para as reações do cimento com a parte fina do solo e da mesma forma que no sistema solo-cal, esta redução é um indicativo de agregação no solo e das trocas iônicas que ocorreram. Já para o Solo ASD – Horpibulsuk, verifica-se uma estabilidade entre os teores variando de 0 % a 3%, reduzindo sutilmente entre os teores de 6% a 10%.

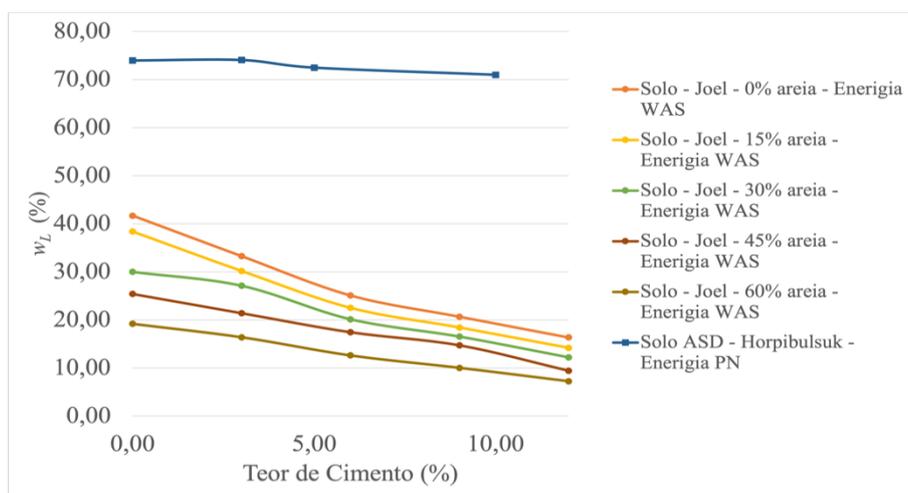


Figura 4.30-Variação dos limites de Atterberg em função do teor de cimento.

A Figura 4.31 apresenta a variação  $wl / (1 - \% \text{ areia})$  em função do teor de cimento. Observa-se nessa figura que, para o teor máximo de 12% de cimento, os valores de  $wl$  tendem a convergir para um valor único, indicando que nesse teor de cimento estaria se completando as trocas iônicas do solo.

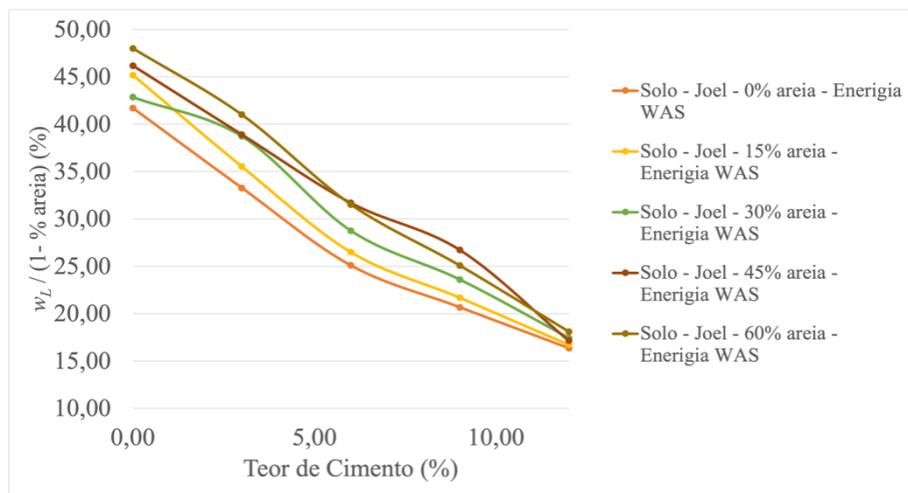


Figura 4.31 – Variação  $w_L / (1 - \% \text{ areia})$  em função do teor de cimento.

Quando se analisa os solos considerando-se a variação do limite de plasticidade em função do incremento no teor de cimento, é possível observar, na Figura 4.32, que o Solo – Joel, apresentou, como no caso do limite de liquidez, a redução no limite de plasticidade, na qual esse fenômeno pode estar a indicar um processo de agregação da fração fina do solo assim como a ocorrência de trocas iônicas. Da mesma forma, é verificado um paralelismo das curvas, com o mesmo solo e porcentagens de areia (Quartzo) diferentes, indicando que, apesar de o limite de plasticidade ter reduzido com a adição da areia, a química do cimento, nas fases iniciais da reação, está interagindo com a parte mais fina do solo, em especial por meio das trocas iônicas.

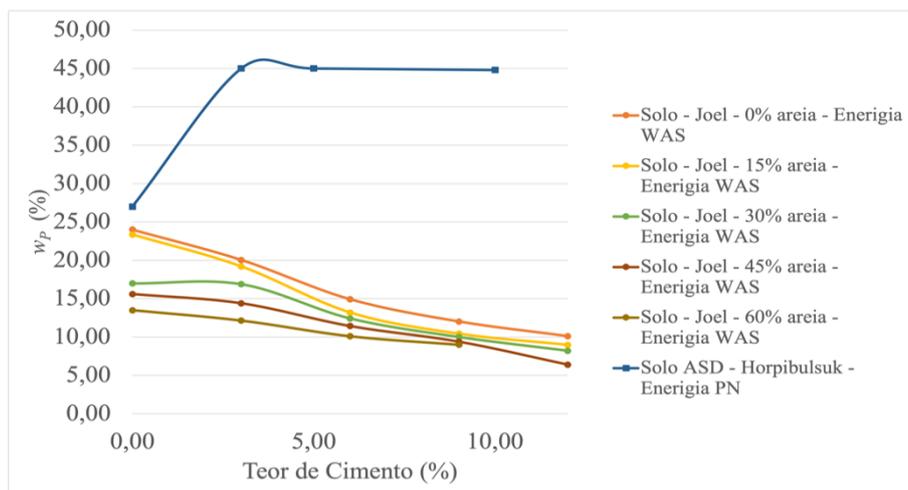


Figura 4.32 – Variação do limite de plasticidade em função do teor de cimento.

Ao se observar o Solo ASD – Horpibulsuk, verifica-se que com a adição de 3% de cimento esse solo tem o seu limite de plasticidade elevado, indicando uma desagregação no solo e, em especial, um aumento da resistência à tração. Para teores entre 3% e 10%

de cimento, o limite de plasticidade desse solo, praticamente, não se alterou, possivelmente indicando que, para teores acima de 3%, já cessaram as trocas iônicas passando a ampliação do teor de cimento a intervir pouco na textura.

A Figura 4.33 apresenta a variação  $w_p / (1 - \% \text{ areia})$  em função do teor de cimento. Observa-se nessa figura, exceto quando da incorporação de 60% de areia, quando o solo se tornou não plástico, que os pontos, como no caso do limite de liquidez, convergiram para um valor único indicando do mesmo modo que as trocas iônicas tenham se completado com esse teor de cimento.

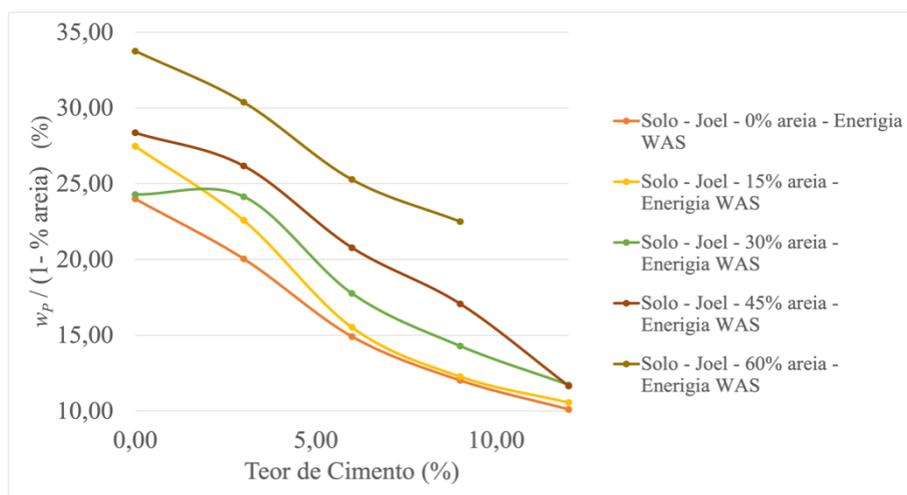


Figura 4.33 – Variação  $w_p / (1 - \% \text{ areia})$  em função do teor de cimento.

Ao se observar a Figura 4.34, verifica-se que, para todos os solos, o índice de plasticidade reduziu com o incremento do teor de cimento. O solo ASD – Horpibulsuk apresentou uma forte queda nesse índice até o teor de 3%, sendo que, após esse teor, é verificado que o aumento da quantidade de cimento quase não interfere na redução do seu  $I_p$ . Essa redução se deu em razão da forte elevação no limite de plasticidade enquanto o limite de liquidez sofreu pouca variação.

Já para os Solos – Joel, também se observa uma redução do  $I_p$  com a adição do cimento e é possível verificar que, com o incremento da areia ao solo, as linhas de redução no  $I_p$ , tendem a guardar um certo paralelismo entre elas.

Este paralelismo na redução do  $I_p$ , pode ser entendido como a reação química do cimento, com a fração fina (argilosa) do solo, onde as reações de floculação/agregação e troca catiônica estão ocorrendo, sem a presença ainda do endurecimento do cimento adicionado ao solo por meio das reações pozolânicas.

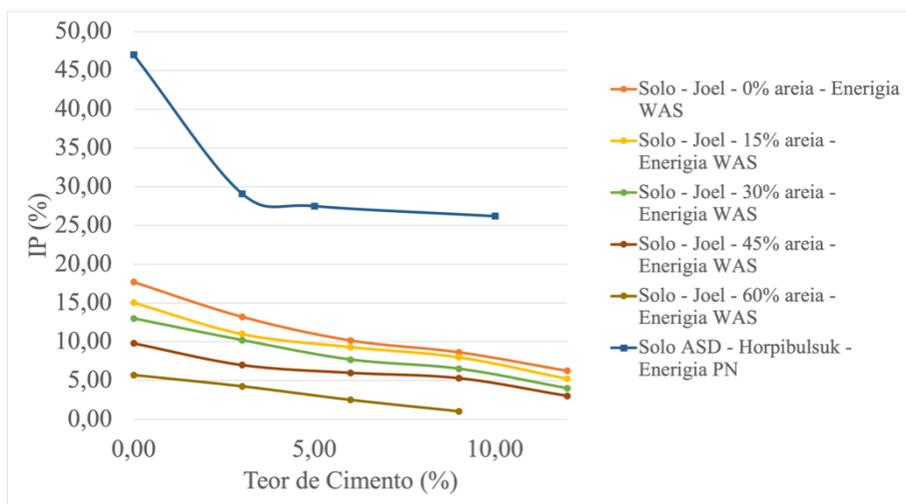


Figura 4.34– Variação do índice de plasticidade em função do teor de cimento.

A Figura 4.35 apresenta a variação  $IP / (1 - \% \text{ areia})$  em função do teor de cimento. Observa-se, nessa figura, que os resultados convergiram para uma tendência única, exceto a mistura com 60% de areia, o que aponta, assim, como no caso do limite de plasticidade, para alguma possível diferença procedimental na avaliação do  $w_p$  dessa mistura. O mais importante, no entanto, é a constatação de que as propriedades físicas dos solos aditivados quimicamente vão estar diretamente relacionadas à fração ativa que o solo apresenta, ou seja, fração argila ou silte mais argila.

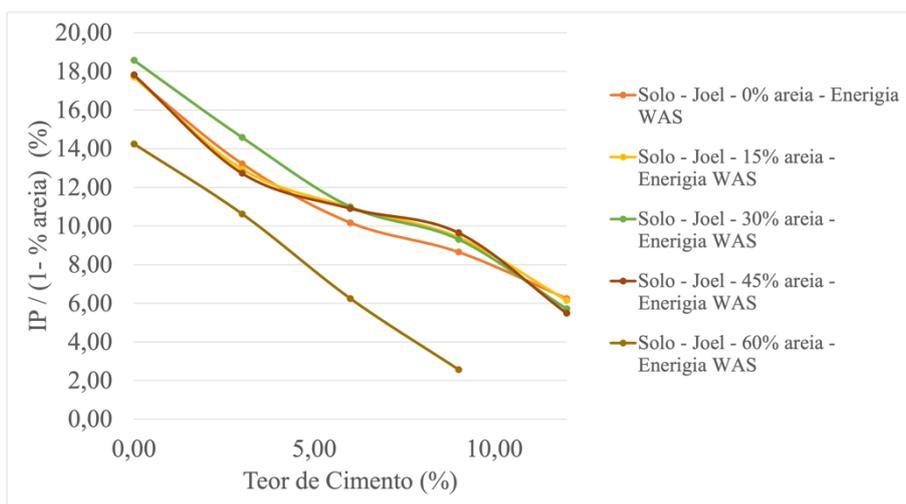


Figura 4.35 – Variação  $IP / (1 - \% \text{ areia})$  em função do teor de cimento.

Um fator importante e que não foi encontrado nos trabalhos analisados no contexto dessa dissertação, diz respeito à variação do pH do solo e do sistema solo-cimento a exemplo do que se verifica nos estudos voltados para o sistema solo-cal.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, com a análise simples do pH em água, seria possível a verificação se as condições de hidratação do silicato tricálcico (C3S) e do silicato dicálcico (C2S), estariam em circunstâncias ideais para formação do silicato de cálcio hidratado (C3S2HX), que é um agente cimentante mais forte e que, após essa reação química, apresenta um subproduto denominado hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Além das reações cimentícias, outra observação que se poderia obter com o pH é a propensão na solubilização da sílica e da alumina, presentes no solo, que reagiram com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  disponibilizado pela reação de hidratação principal, fornecendo, assim, ao solo incrementos na sua resistência.

Entretanto, outros fatores ainda podem ser analisados. A variação da massa específica, aparente seca com a variação no teor de cimento é apresentado na Figura 4.36. Nessa figura, também pode ser observado a variação da massa específica em função da energia de compactação. Os Solos – Joel foram compactados em energia (PN) Proctor norma e na energia (WAS) *West African Standard*, ou seja, o nível de energia padrão da África Ocidental.

Dessa forma, é possível tecer a análise em função da variação no teor de cimento, bem como com a variação na energia de compactação.

Assim, ao se observar a Figura 4.36, o Solo ASD – Horpibulsuk sofre um grande aumento na sua MEAS, quando o teor de cimento sai de 0% e vai para 3%. Esse grande aumento ocorre tanto quando o solo foi compactado na energia Proctor normal como quando na energia Proctor modificado. Esse grande aumento gerado pode ser explicado pela desagregação do solo, ocorrendo um melhor preenchimento dos espaços vazios. É importante observar que a análise dada com o olhar voltado para o limite de liquidez e para o limite de plasticidade já indicavam essa possível desagregação nesse sistema solo cimento, nesse teor de aditivo. Após esse teor de 3% de cimento, a MEAS desse solo sofreu um ligeiro aumento, até o seu teor máximo estudado. Como esperado, o solo compactado na energia Proctor modificado apresentou maior MEAS quando comparado ao solo compactado na energia Proctor normal.

A adição de areia ao Solo – Joel mostrou o mesmo paralelismo de comportamento, já observados nos limites de Atterberg. Uma exceção foi verificada nesse solo adicionado de 45% de areia e 12% de cimento, no qual foi observado uma grande elevação na MEAS. Os limites de Atterberg, para esse solo nessa porcentagem de areia e nesse teor de cimento, apontam para a melhoria desse solo e uma possível agregação. Esse expressivo aumento na MEAS tem uma explicação provável, dada pela energia de compactação

aplicada (WAS), na qual os grãos do sistema solo-areia estavam bem mais próximos e seus poros foram preenchidos pelos géis do cimento de uma maneira mais eficiente.

A Figura 4.37 mostra que a resistência à compressão simples dos solos aumentou com a elevação dos teores de cimento, assim como com o teor de areia. O aumento com o teor de cimento está em conformidade com Bezerra (1976), o qual afirmou que quanto maior a quantidade de cimento, maior será a resistência da mistura.

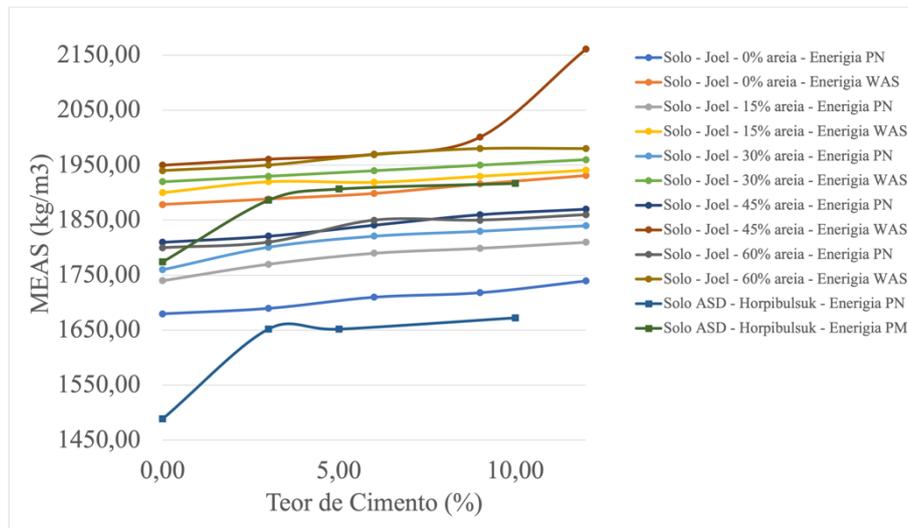


Figura 4.36 –Variação da MEAS em função do teor de cimento e energia de compactação.

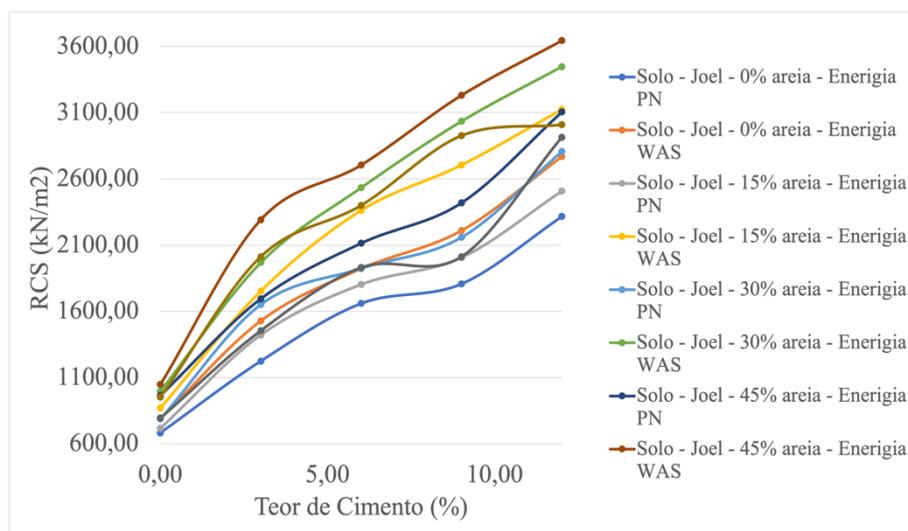


Figura 4.37 – RCS, não saturado, Solo – Joel (Joel, 2011).

Da mesma forma em que a MEAS para o solo com adição de 60% de areia ficou menor, quando comparado ao solo com adição de 45% de areia, a resistência à compressão simples também diminuiu mostrando, assim, que se soma em importância ao teor de cimento a menor porosidade da mistura. A ampliação da resistência à compressão

simples com o aumento do teor de areia mostra, ainda, a relevância da granulometria do solo para o seu comportamento mecânico nas misturas com cimento.

Ao se fazer uma análise de solos, deve-se entender que sua resistência sofre variação com o teor de umidade, não a umidade em que esse solo foi compactado, mas a umidade que varia nesse sistema solo-cimento, durante e após a sua cura, devido a diversos fatores, tendo como principal fator, o clima. A atuação da sucção nos solos não saturados eleva a sua resistência e faz com que ela diminua em consequência da saturação. A Figura 4.38 obtida fazendo-se os cálculos das RCS a partir dos coeficientes redutores indicados pelo autor do estudo mostra, se comparada à Figura 4.37, a perda de resistência para as misturas solo-cimento estudadas quando da saturação.

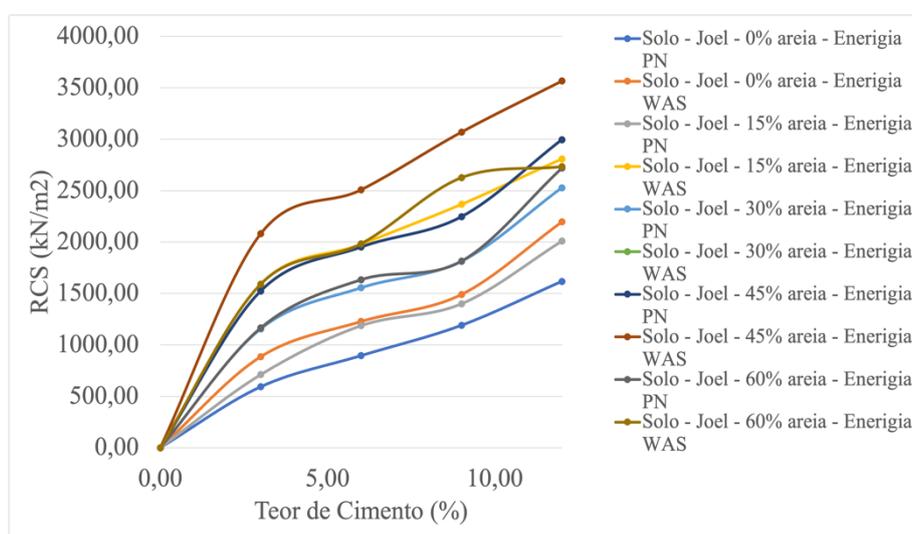


Figura 4.38 – RCS, saturado, Solo – Joel (Joel, 2011).

Para uma melhor visualização do impacto da sucção sobre o comportamento das misturas solo-cimento aqui analisadas, a Figura 4.39 apresenta a variação da resistência à compressão simples em consequência da saturação ao se comparar os resultados apresentados nas Figuras 4.37 e 4.38 para as misturas contendo 12% de cimento. Cabe, no entanto, destacar que o ideal seria conhecer a curva característica de retenção de água do sistema solo-cimento e a umidade e grau de saturação em que a mistura se encontra para uma melhor avaliação do impacto da sucção no comportamento mecânico de modo a viabilizar uma melhor previsão de comportamento.

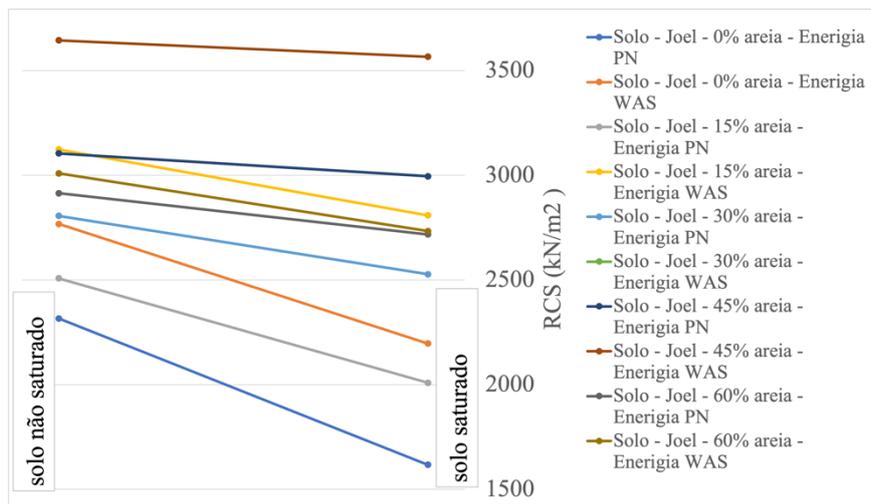


Figura 4.39 – Redução da RCS devido à saturação, Solo – Joel.

O CBR ainda é um parâmetro de referência em se tratando do uso dos solos, e muitas normas rodoviárias ainda utilizam esse parâmetro para o dimensionamento dos pavimentos. Porém, em laboratório, quando se estuda o solo, o CBR, devido a questões normativas, é apurado de forma saturada. Essa saturação, como já foi descrita anteriormente, elimina a sucção, ou parte dela, e por consequência, levando à apuração de um menor valor do CBR que aquele que atuará *in situ*. Assim, de maneira similar ao apresentado na Figura 4.39, na avaliação do impacto da saturação, nos resultados de RCS, as misturas contendo 12% de cimento, é apresentado na Figura 4.40 a variação do CBR desses solos, porém sem uso do cimento, devido, assim, apenas à variação da condição não saturada, para a condição saturada.

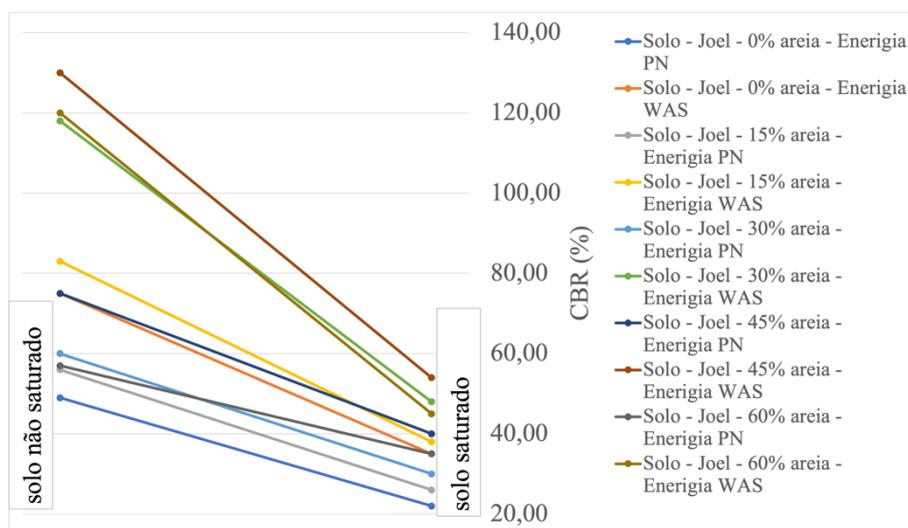


Figura 4.40– Redução da CBR devido à saturação, Solo – Joel.

Fica evidente, ao se observar a figura, que existiam quatro misturas de solo com areia, que, para parâmetro de CBR no Brasil ( $CBR > 80\%$ ), poderiam ser utilizadas como camada de base, caso a condição não saturada fosse adotada. Esses mesmos quatro solos, quando saturados, tiveram seu CBR reduzidos para valores abaixo de 60% e, dessa forma, com vistas somente ao parâmetro CBR, serviriam apenas como sub-base, reforço ou até mesmo subleito o que certamente levou aos estudos complementares envolvendo o uso adicional do cimento.

Esse conjunto de resultados mostra a importância da realização de estudos o mais completos possível, envolvendo inclusive a análise do impacto da sucção no comportamento mecânico do solo, seja ele estabilizado quimicamente ou não, cabendo destacar a relevância de estudar também a sucção osmótica, nesse caso específico.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

O processo de estabilização química dos solos ainda é um processo complexo e que continua necessitando de estudos.

Os solos, ao longo do seu processo de formação, sofrem os mais variados tipos de intemperismo naturais que, juntamente com os processos antrópicos, tendem a agregar um conjunto de particularidades e informações que deve ser conhecido e entendido. A finalidade desse conhecimento e entendimento é o de poder ter uma primeira impressão do solo e diante de sua classificação pedológica e classificações geotécnicas, ter uma decisão mais assertiva sobre o tipo de estabilizante a ser utilizado, o que de maneira nenhuma exclui os ensaios geotécnicos específicos, cabendo destacar que, em especial, no caso da estabilização química muito ainda se tem a acrescentar aos estudos e técnicas de ensaios convencionais.

A análise textural é uma primeira análise que busca avaliar se um solo é mais intemperizado, por meio da relação silte/argila presente no solo, porém essa análise, para os solos desta pesquisa, não apresentou um relacionamento direto com a classificação proposta por Nogami e Villibor.

Além dos ensaios tradicionais já realizados, CBR, MEAS, RCS, fica claro, neste estudo, que para as análises voltadas à estabilização química, principalmente, dos solos tropicais, novas óticas devem ser abordadas e compreendidas, com o objetivo de se ter o entendimento das modificações físico-químicas geradas.

Cabe destacar, que o potencial hidrogeniônico, pH, quando realizado em água destilada, fornece indicativos de potenciais de solubilização de minerais, fornecendo íons ao sistema e, assim, quando certos minerais, como a sílica e a alumina, são solubilizados podem gerar reações, denominadas de reações Pozolânicas, com íons de cálcio que estarão disponíveis, seja pela estabilização com a cal, seja pela a estabilização com o cimento ou, até mesmo, disponíveis no solo pela gênese ou ações antrópicas. Além dessas possíveis solubilizações de minerais, o pH em água é um indicativo do potencial dessas reações ocorrer, tendo em vista que pH em água, abaixo de 12,4, geralmente, não propiciam essas reações. No caso dos solos tropicais, no entanto, em especial aqueles profundamente intemperizados, como é o caso dos solos lateríticos, os óxi-hidróxidos de

ferro e alumínio, que atuam como agentes cimentante naturais, podem, com a elevação do pH, passarem por processos de solubilização comprometendo a estabilidade dessas agregações. Um fator complicador que merece maiores análises é fato de que a química introduzida no solo modificando o seu pH levará um certo tempo para adentrar-se nessas agregações.

Além do pH em água, deve-se obter o pH em cloreto de potássio, KCl. Conforme descrito neste trabalho, esses dois pH's, fornecem parâmetros importantes para a análise química e elétrica dos solos. Um destes parâmetros é o  $\Delta\text{pH}$  e o outro é o PCZ.

Com o  $\Delta\text{pH}$ , é possível apurar o equilíbrio de cargas elétricas variáveis no solo, fornecendo a informação se existe o predomínio de argilas silicatadas ou de óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Esse estudo também mostrou que o  $\Delta\text{pH}$  pode ser um possível parâmetro para a obtenção do teor de cal recomendado para a melhoria do solo, quando se procura o maior grau de floculação/agregação.

O PCZ que é o indicativo de qual será o valor de pH do solo, em que o sistema solo-aditivo tenderá a ter uma carga elétrica zero, e que quando o pH atingir este valor a floculação/agregação do solo tenderá a ser máxima.

Os limites de Atterberg e o índice de plasticidade, geralmente, são indicativos de comportamento dos solos, apesar de suas limitações quando aplicados aos solos tropicais.

O parâmetro  $w_L$ , como descrito neste estudo, está relacionado com a resistência ao cisalhamento do solo e, assim, sendo como foi observado, é um parâmetro que pode fornecer uma tendência de desagregação/defloculação do solo ou agregação/floculação, apontando para possíveis variações da MEAS, e do comportamento do solo.

Da mesma forma o parâmetro  $w_p$ , que se relaciona com a resistência à tração, também pode fornecer essa tendência de desagregação/defloculação do solo ou agregação/floculação com reflexos no comportamento mecânico das misturas.

A saturação dos solos fez os solos estudados apresentarem uma queda na sua resistência, seja em termos de CBR, seja em termos de RCS. Essa perda de resistência, de maneira geral, foi gerada pela perda da parcela da resistência dada pela sucção mátrica, merecendo, no entanto, maior atenção ao que se passa com a sucção osmótica, pois nos casos de estabilizações químicas ela passará por alterações em relação ao solo em estado natural.

O índice de atividade de Skempton, que é um indicativo de atividade coloidal da fração argila do solo, revelou-se como um parâmetro importante a ser considerado quando se estuda a estabilização química dos solos. Nesse estudo, ele apresentou, de uma maneira geral, reduções com a adição da cal, reduções estas que podem estar atreladas às trocas

iônicas, à mineralogia e às alterações texturais sofridas pelo solo quanto à agregação/desagregação ou floculação /defloculação.

Diante do exposto nessa pesquisa, sugere-se que os estudos de estabilização química de solos contemplem, além das análises tradicionais que visam apenas ao comportamento mecânico, ensaios que forneçam parâmetros complementares, tais como:

- o pH em água e o pH em KCl, em todos os teores de aditivo utilizados e em vários períodos de cura;
- relação da variação do PCZ com o comportamento mecânico e com a variação textural em vários períodos e condições de cura;
- os limites de Atterberg, de amostras curadas em vários períodos e condições de cura;
- a análise mineralógica do solo em amostras curadas em vários períodos e condições de cura;
- granulometria, MEAS, umidade de amostras em todos os teores de aditivos e em vários períodos e condições de cura;
- obtenção da densidade dos grãos em todos os teores de aditivo utilizado e em vários períodos e condições de cura;
- obtenção da sucção dos solos em todos os teores de aditivos utilizados e em amostras curadas em vários períodos e condições, visando, também, aos parâmetros que forneçam o entendimento do comportamento mecânico e químico desse solo, durante uma possível perda ou ganho de umidade, devido à exposição da amostra ao meio ambiente;
- devem ser analisadas a umidade e a porosidade do solo nas condições de ruptura em relação às condições de compactação.

Observa-se ao longo dessas sugestões apresentadas que sempre se colocou a condição de cura, pois esta particularidade, apesar de sua grande relevância, quando se estuda a estabilização química dos solos é pouco lembrada, senão, completamente esquecida. Aqui, o destaque para a condição de cura tem por objetivo remetê-la à cura *in situ*, pois lá se estará a atuar, pelo menos parcialmente, as condições que se terá em campo em função do clima e das interações solo-atmosfera incluindo-se as migrações químicas a partir do solo que se busca estabilizar.

## 5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Verificar se existe uma correlação textural com a metodologia MCT-M, proposta por Vertamatti.
- Realizar análises de pH em água e pH em KCl, de solos com vários teores de cal, buscando quebrar as agregações dos solos, com o uso de ultrassom, com o objetivo de entender, a variação elétrica que possa surgir, devido à interação entre a solução aquosa presente nos poros e o interior da agregação natural.
- Realizar estudos de longo prazo, para avaliação dos limites de Atterberg, pH em água e pH em KCl, e análises mineralógicas, buscando correlações com MEAS, resistências mecânicas, variações granulométricas e por parâmetros mecanísticos.
- Realizar análise do pH e análises químicas da água em que o solo aditivado for colocado para saturação, com o objetivo de se observar a perda de aditivo devido à saturação do corpo de prova.
- Realizar estudos que visem verificar a variação da densidade específica dos grãos, como a variação do teor do aditivo químico.
- Estudar o comportamento mecânico dos solos, em que o pH do solo variará abaixo e acima do PCZ.
- Realizar esses estudos em condições de cura de laboratório e de campo para averiguar a relação entre os resultados que, geralmente, obtém-se em laboratório e aqueles que estará presentes em campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Dosagem das misturas de solo-cimento; normas de dosagem e métodos de ensaios. 3.ed. atual. revisada pelo Eng. Márcio Rocha Pitta. São Paulo, 1986. 57p. (ET-35)
- Aflitos, A.O. (1981) – A Influência de Aditivos Químicos em Propriedades Seleccionados e de Engenharia de Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil – Universidade Federal da Paraíba, Orientador: Heber Carlos Ferreira, Campina Grande, 1981, 266 p.
- Aguiar, L.A. (2014). Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados e Estabilizados Quimicamente para uso em Barragens. Tese de Doutorado, Publicação G.TD- 093/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 281p.
- Alleoni, L.R.F., Mello, J.W.V & Rocha, W.S.D (2019) – Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo – Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações / Editores Vander de Freitas Melo, Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni. – Viçosa MG : SBCS, 2019, pp. 766-825
- Alleoni, L.R.F., Camargo, O.A., Casagrande, J.C., Soares, M.R. (2019) – Química dos Solos Altamente Intemperizados – Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações / Editores Vander de Freitas Melo, Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni. – Viçosa MG: SBCS, 2019, pp. 1.077-1.143.
- Antunes, F.S., Salomão, F.X.T. (2018). Geologia de Engenharia e ambiental, Volume 2: Métodos e Técnicas / Editores: Antônio Manoel dos Santos Oliveira, João Jerônimo Monticeli – São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Engenharia e Ambiental, 2018, pp. 71-85.
- Balbo, J. T. (2007) – Pavimentação asfáltica : materiais, projetos e restauração/José Tadeu Balbo. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2007.
- Balduzzi, F., Mayor, P.A. (1981). La classification des sols rouges tropicaux à l'aide de l'essai Moisture Condition – Rapport interne J 341/2 – Zurich – 1981.
- Basso, R., V., Ferraz, R. L., Belincanta, A., Ramos, F dos. S. (2003) – Aplicação do Método Físico-Químico de Dosagem de Misturas Solo-Cimento aos Solos Típicos do Noroeste do Paraná – ENTECA 2003, IV Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Estadual de Maringá/Departamento de Engenharia Civil/Maringá/PR, 10 p.
- Bento, P.F. (2006) – Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Jose Camapum de Carvalho.
- Bessaim, M. M., Bessaim, A., Missoum, H., Bendani, K. (2018) – Effect of quick lime on physicochemical properties of clay soil - MATEC Web of Conferences 149, 02065 (2018), 5 p.
- Bezerra, R. L. (1976) – A Durabilidade de Solos Lateríticos Estabilizados com Cimentos e Aditivos – Orientador J. G. Cabrera – Campina Grande, Paraíba (1976), 96 p.
- Bhattacharja, S., Bhatti, J., I.; and Todres, H. A. (2003) – Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime - A Critical Review of Literature, PCA R&D Serial No. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois USA, 2003, 60 pages.
- Brito, L.C., Paranhos, H.D.S. (2017) – Estabilização de Solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01., setembro de 2017. ISSN:2448-0959, pp. 425-438.

- Camapum de Carvalho, J.; Guimarães, E. M.; Lima, M.C. ; Ribeiro, M. O. . Variação no Comportamento Térmico de Caulinitas de uma Cobertura Superficial no Distrito Federal. In: XII COBRAMSEG, 2002, São Paulo. Anais do COBRAMSEG. São Paulo - SP: ABMS, 2002. v. 1. p. 537-546.
- Camapum de Carvalho, J., Barbosa, M.C., Mendonça, R.M.G., Farias, W.M. e Cardoso, F.B.F. (2015) – Propriedades Químicas, Mineralógicas e Estruturais de Solos Naturais e Compactados – Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico – Organizadores: José Camapum de Carvalho, Gilson de Farias Neves Gitirana Junior, Sandro Lemos Machado, Márcia Maria dos Anjos Mascarenha e Francisco Chagas da Silva Filho – São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e engenharia Geotécnica, 2015, pp. 39-78.
- Camapum de Carvalho, J., Silva, F.C., Barreto, P.N.M., Pérez, A.C., Guimarães, R.C., & Oliveira, R.B. (2019). Aspectos químico-mineralógicos e as propriedades e comportamento dos solos expansivos. In Anais do II GeoBASE - II Seminário Geotécnico Bahia/Sergipe (pp. 277-286). São Paulo, Brasil: ABMS.
- Camapum de Carvalho, J., Gitirana Jr, G.F.N. (2021) – Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks*, ISSN 1980-9743, ISSN-e 2675-5475, 25 p.
- Carvajal, H.E.M., Camapum de Carvalho, J. & Fernandes, G. (2005). Influência da desagregação nos limites de Atterberg. Proc. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiânia, Brasil. UFG, 217-225. <https://gecon.eec.ufg.br/p/18785-publicacoes>
- Coelho, J. A., Aquino, S. C. N. & Camapum de Carvalho, J. (2016). Análise da influência da qualidade da água na compactação de solos tropicais. Proc. 45ª RAPV, 19º ENACOR. Brasília. 1-13
- Consoli, N. C., Lopes Jr, L. da S., Heineck, K, S. (2009) – Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils – *Journal of Materials in Civil* © ASCE / MAY 2009, 7 p.
- Dalla Rosa Johann, A., (2013) – Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura / Amanda Dalla Rosa Johann. -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS-2013. 271 p.
- Delgado, A. K. C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado, G.TD-045/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 392p.
- Dutra, S.V.M (2014). Estado da Arte sobre a Utilização de Solos Lateríticos em Pavimentos Rodoviários. Sônia Vanessa Meneses Dutra. Dissertação de Mestrado – Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2013/2014 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014, 81 p.
- DNIT DNER-ME 030/94 – Solos – Determinação das Relações Sílica-Alumina e Sílica-Sesquióxidos em Solos – Norma Rodoviária – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Atual DNIT).
- DNIT DNER-ME 203/94 – Solo-cimento – determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem – Norma Rodoviária – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Atual DNIT).
- DNIT DNER-EM 036/95 – Cimento Portland - recebimento e aceitação – Norma Rodoviária – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Atual DNIT).
- DNIT 414/2019-ME – Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físico- química de solo-cimento – Método de ensaio – Norma Rodoviária – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.

- DNIT 418/2019-EM – Pavimentação – Solo-Cal – Cal Virgem e Cal Hidratada – Especificação de material– Norma Rodoviária – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- DNIT 419/2019-ME – Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio – Norma Rodoviária – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- Eades, J. L., Grim, R. E., (1966) – A Quicktest to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization. Highway Research Record, Washington, D.C., n.139, p.61-72. 1966.
- Espindula, C.R., Daniel, L.A. (2008) – Lateria e Solos Lateríticos no - Carlos Roberto Espindola e Luiz Antônio Daniel – Boletim Técnico da FATEC-SP - BT/ 24 maio / 2008), pp. 21-24.
- Ferro, J. G. O. (1976) – A influência da cal nas propriedades de engenharia de solos lateríticos. Tese de Doutorado, UFPB, Campina Grande, PB, 1976, 118 p.
- Fortes, R.M., Ferreira, R.C. (2018). Geologia de Engenharia e ambiental, Volume 2: Métodos e Técnicas / Editores: Antônio Manoel dos Santos Oliveira, João Jerônimo Monticeli – São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Engenharia e Ambiental, 2018, pp. 53-69.
- Freitas, J.E. de (2018) - Uso de Cinza da Casca de Arroz na Estabilização de Solos para uso em Pavimentos Rodoviário. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, . Orientador: Jose Camapum de Carvalho.
- Fujii, L.M.T – Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias 2012 – Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, 137p.
- Gidigasú, M.D. (1976) – Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles - Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Gidigasú, M. D. Laterite Soil Engineering (Developments in geotechnical engineering) (p. IV). Elsevier Science. Edição do Kindle.)
- 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.
- Guimarães, J. E. P., (2002) – A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil / José Eptácio Passos Guimarães. - 2ª ed. - São Paulo: Pini, 2002.
- Gurjão, C. M. C. (1994) – Estudo Comparativo entre Solo-Cimento, Solo-Cimento-Vermiculita e Solo-Cimento Plástico – Campina Grande, Paraíba, 1994, 113p.
- Grim, R.E. (1962). Applied clay mineralogy. McGraw-Hill.
- Hilt, G. H.; Davidson, D. T., (1960) – Lime Fixation in Clayey Soils. Highway Research Board, Washington, D.C., n.262, p.20-32, 1960. I
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., Suddepong, A., (2010) – Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations - Construction and Building Materials 24 (2010), 11 p.
- Llanque Ayala, R. J., 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 2018 – 28 de agosto a 01 de setembro, Salvador, Bahia, Brasil, ABMS, 2018, 9p.
- Llanque Ayala, R. J. (2020) – Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola vi, 300 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2020) Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- Lepsch, Igo F. (2010). Formação e Conservação dos Solos – Igo F. Lepsch. – 2ª edição – São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 216 p.
- Lepsch, Igo F. (2011). 19 lições de pedologia – São Paulo: Oficina de Textos, 2011, 456 p.
- Lima, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336 p.
- Macêdo, M., M. de (2004) – Solos modificados com cimento - efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos / Mirtes Maria de Macêdo. - Recife : O Autor, 2004, 289 p.
- Marino, D. M., Teixeira, D. I. B, Paula, G. F. & Camapum de Carvalho, J. Estudo do efeito agregador da cal em um solo tropical do Distrito Federal. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Campinas, SP, 7 p. No prelo 2022.
- Marson, M. (2004) – Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais. 2004. 216f. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Mascarenha, M.M.A., Cordão Neto, M.P., Matos, T.H.C., Chagas, J.V.R., Rezende, L.R. (2018) – (Effects of the Addition of Dihydrate Phosphogypsum on the Characterization and Mechanical Behavior of Lateritic Clay – Soils and Rocks, 2018, 14p.
- Massad, Faiçal (2016) – Mecânica dos solos experimental – Faiçal Massad – 1ª Edição – São Paulo: Oficina de Textos, 2016, 287 p.
- Molina Junior, W. F (2017) – Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas [recurso eletrônico] / Walter Francisco Molina Júnior. - - Piracicaba : ESALQ/USP, 2017, 223 p. : il.
- Mota, A.C.V., Melo, V.F. (2019) – Química dos Solos Ácidos – Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações / Editores Vander de Freitas Melo, Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni. – Viçosa MG: SBCS, 2019, pp. 1.009-1.076.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1981) Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: Simpósio Brasileiro Sobre Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: [s.n.], 1981. p. 30-41.
- Osula, D.O.A., (1991) – Lime modification of problem laterite. Engineering Geology, 30 (1991), 141-154
- Paula, G.G., Teixeira, D.I.B, Fernandes, P.C., Pereira, J.I.S., Camapum de Carvalho, J. (2020) – Classificação MCT-M: Estudo de caso para um solo tropical do Distrito Federal – Cobranseg (2020), 8p.
- Pessoa, F.H.C. (2004). Análises dos Solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário. Dissertação de mestrado, G.DM-117/2004, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.
- Pessoa, F.H.C. (2012) - Avaliações Funcional e Estrutural de Trechos de Rodovias no Distrito Federal Construídos com Diferentes Materiais - Tese de Doutorado – Universidade de Brasília (UnB) – Orientador: José Camapum de Carvalho, 2012.
- Prado, H. do (2016) – Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais – 5ª edição – Piracicaba-SP, 271p
- Portelina, F. H. M. (2008) – Efeitos da Cal e do Cimento na Modificação dos Solos para fins Rodoviários: Mecanismos de Reação, Parâmetros de Caracterização Geotécnica e Resistência Mecânica – Magister Scientiae – Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Orientador: Dário Cardoso de Lima, 2008.
- Pu, S., Zhu, Z., Huo, W. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled gypsum stabilized soil in geotechnical engineering: A comprehensive review – Elsevier, 31p.

- Rezende, L.R. (1999) – Técnicas alternativas para a construção de Base de Pavimentos Rodoviários. UnB. 169p.
- Rezende, L.R. (2003) – Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis – Tese de Doutorado – Universidade de Brasília (UnB) – Orientador: José Camapum de Carvalho, 2003
- Rezende, L.R., Curado, T.S. e Silva, M.V. e Mascarenha, M.M.A. e Metogo, D.A.N. e Cordão Neto, M.P. e Bernucci, L.L.B. (2017) - Laboratory Study of Phosphogypsum, Stabilizers, and Tropical Soil Mixtures – *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 16p.
- Rocha, M.T. (2016) – Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação – Mirella Talitha Rocha – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás, Escola de engenharia Civil, 2016.
- Rogers, C. D. F., Glendinning, S., Roff, T. E. J. (1977) – Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, v. 125, p. 242-249, 1997.
- Sales, A., W., Ribeiro, D. D., Nery, K. D. (2017) – Efeitos da Adição de Cimento e de Cal em um solo da Região de Curitiba para Fins de Pavimentação – UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curitiba, Paraná, 93 p.
- Senaha, S.C.F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>.
- SIBICS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- Silva, M.V., de Rezende, L.R., Mascarenha, M.M.d.A. e de Oliveira, R.B (2019) – Phosphogypsum, tropical soil and cement mixtures for asphalt pavements under wet and dry environmental conditions – Elsevier, 14p.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A. & Teixeira, W.G. Manual de Métodos de Análise de Solo. EMBRAPA, Brasília, DF, 2017. 574 p.
- Thompson, M. R., (1966) – Lime Reactivity of Illinois Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, v.92, p.67-92.1966.
- TRB (1987) - Transportation Research Board, National Research Council, State of the Art Report 5, Reactions, Properties, Design, and Construction. Washington, DC, 1987
- Villibor, D.F., Alves, D.M.L. (2019) – Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: Projeto e Construção: Novas Considerações – Douglas Fadul Villibor e Driely Mariane Lancarovici Alves – 1ª edição – Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019, 544p.
- 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, Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo do Curso de Pesquisa Operacional e Transporte, Instituto Tecnológico de Aeronáutica / ITA, São José dos Campos, SP, 300 p.
- Vaz, L.F., Gurgueira, D.U. (2018). Geologia de Engenharia e ambiental, Volume 2: Métodos e Técnicas / Editores: Antônio Manoel dos Santos Oliveira, João Jerônimo Monticeli – São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Engenharia e Ambiental, 2018, pp. 39-52.
- Wanderley Neto, R.V. (2020). Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados [Master's dissertation, University of Brasília]. University of Brasília's repository. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>.

## ANEXO

### ANEXO 1

- Solo HB7- Delgado, observa-se na curva granulométrica uma desagregação gerada no solo quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 0,02 mm e 0,001 mm, com fração de material com diâmetro menor que 0,002 em torno de 7%. Nesse primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  teve um aumento de carga elétrica negativa, aumentando o desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais alcalino que o PCZ dessa mistura solo-cal. Olhando os limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, indicando uma possível desagregação do solo. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se, nos mesmos parâmetros, que o  $\Delta pH$  sofre uma inversão de carga, tornando-se positivo, ficando mais próximo do equilíbrio de cargas, e que o pH em água fica ligeiramente ácido em relação ao PCZ desse novo sistema solo adicionado com 6% de cal. Com foco nos limites de Atterberg, ocorreu a redução do  $w_L$  e  $w_P$  em relação ao solo com 2% de cal, indicando uma agregação. Em relação à granulometria, é observada uma maior retenção granulométrica entre as peneiras 0,6 mm e 0,02 mm, nas quais frações menores que 0,002 mm passaram a representar uma fração menor do que 2% da composição do solo com 6% de cal.
- Solo HB10-Delgado, observa-se na curva granulométrica, uma desagregação gerada no solo, quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material com diâmetro entre 0,05 mm e 0,005 mm, com fração menor que 0,002 em torno de 8%. Nesse primeiro momento verifica-se que o  $\Delta pH$ , mostrou uma inversão de cargas, predominando agora cargas positivas, apresentando um pequeno desequilíbrio de cargas e o pH em água está ligeiramente mais ácido que o novo PCZ. Olhando os limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, passando o solo a apresentar plasticidade, indicando uma desagregação. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se

que o  $\Delta\text{pH}$  aumentou positivamente e que o pH em água continua ligeiramente ácido em relação ao PCZ. Com foco nos limites de Atterberg, ocorreu um discreto aumento no  $w_L$  e uma discreta diminuição no  $w_P$  em relação ao solo com 2% de cal, indicando uma possível agregação. Em relação à granulometria é observada uma maior retenção granulométrica de material com diâmetro entre 0,5 mm e 0,02 mm, e frações menores que 0,002 mm representam algo em torno de 2% da composição do solo com 6% de cal.

- Solo HB12-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma desagregação gerada no solo quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 0,04 mm e 0,001 mm, com fração de partículas com diâmetro menor que 0,002 em torno de 8%. Esse solo também apresentou uma agregação entre partículas de diâmetro entre 1,0 mm e 0,04mm. Nesse primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta\text{pH}$  apresentou uma redução de cargas negativas, mostrando, ainda, um desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais alcalino que o novo PCZ dessa mistura solo-cal. Em relação aos limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, indicando uma desagregação. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se no parâmetro  $\Delta\text{pH}$  uma redução de cargas negativas e que o pH em água fica ligeiramente ácido em relação ao PCZ desse sistema solo com cal. Com 6% de cal adicionada, ocorreu uma discreta redução do  $w_L$  e  $w_P$ , em relação ao solo com 2% de cal, indicando uma possível agregação. Em relação a granulometria, é observada uma maior retenção granulométrica de partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 0,05 mm, uma desagregação de partículas com diâmetro entre 0,035 mm e 0,02 mm e frações de diâmetros menores que 0,002 mm representam menos de 2% da composição do solo com 6% de cal.
- Solo HBR1-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma desagregação gerada no solo, quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 1,5 mm até partícula com diâmetros menores 0,001 mm, com fração de partículas com o diâmetro menor que 0,002 em torno de 9%. Neste primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta\text{pH}$  mostrou uma inversão de cargas, predominando agora cargas positivas, apresentando um desequilíbrio de

cargas e o pH em água está relativamente mais ácido que o novo PCZ. Olhando os limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  reduziram, sendo um indicativo de agregação, porém ocorreu uma desagregação. Esse comportamento pode estar ligado mais fortemente com o desequilíbrio de cargas verificado. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se que o  $\Delta pH$  reduziu, diminuindo o desequilíbrio de cargas, e que o pH em água continua relativamente mais ácido em relação ao PCZ desse novo sistema solo adicionado de 6% de cal. Com foco nos limites de Atterberg, ocorreu uma redução no  $w_L$ , indicando uma possível agregação e um discreto aumento no  $w_P$  em relação ao solo com 2% de cal. Em relação à granulometria é observada uma maior retenção granulométrica de material com diâmetro 1,5 mm e 0,001 mm e frações com diâmetro menores que 0,002 representam algo em torno de 1% da composição do solo com 6% de cal.

- Solo HBR2-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma desagregação gerada no solo quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 2 mm até partícula com diâmetros menores 0,001 mm, com fração de partículas com o diâmetro menor que 0,002 em torno de 14%. Neste primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  apresenta carga negativa, e o pH em água está relativamente mais alcalino que o novo PCZ. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se que o  $\Delta pH$  não mudou e que o pH em água continua levemente mais alcalino em relação ao PCZ desse novo sistema solo adicionado de 6% de cal. Com foco nos limites de Atterberg, ocorreu uma redução no  $w_L$  e no  $w_P$ , indicando uma possível agregação, em relação ao solo com 2% de cal. Em relação a granulometria, é observada uma maior retenção granulométrica de material de diâmetro 2,0 mm e 0,001 mm, na qual frações com diâmetro menores que 0,002 representam valores menores que 1% da composição do solo com 6% de cal.
- Solo ZM3-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma leve desagregação gerada no solo, quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 0,2 mm e 0,01 mm, com fração de partícula de diâmetro menor que 0,002 em torno de 3%. Neste primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  apresentou uma inversão de cargas, predominando cargas positivas, mostrando ainda

um aumento no desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais ácido que o novo PCZ dessa mistura de solo cal. Em relação aos limites de Atterberg, o solo foi classificado como não plástico. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se no parâmetro  $\Delta pH$  uma redução no desequilíbrio de cargas elétricas e que o pH em água continuava ácido em relação ao PCZ desse sistema solo com cal. Com foco nos limites de Atterberg, não houve alteração, continuando a ser classificado como não plástico. Em relação à granulometria é observada uma desagregação em partículas de diâmetro entre 0,2 mm e 0,015 mm e uma maior retenção granulométrica de partículas de diâmetro menores que 0,015 mm e frações de diâmetros menores que 0,002 representam menos de 1% da composição do solo com 6% de cal.

- Solo ZM6-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma desagregação gerada no solo, quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 1,5 mm e 0,02 mm, com fração menor que 0,002 em torno de 5%. Neste primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  mostrou uma inversão de cargas, predominando agora cargas positivas, apresentando um sutil desequilíbrio de cargas e o pH em água está relativamente mais ácido que o novo PCZ. Olhando os limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, sendo um indicativo de desagregação. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se que o  $\Delta pH$  sofreu uma elevação, aumentando sutilmente o desequilíbrio de cargas e que o pH em água continua relativamente mais ácido em relação ao PCZ deste novo sistema solo adicionado de 6% de cal. Com foco nos limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, sendo um indicativo de desagregação, em relação ao solo com 2% de cal, o que não ocorreu. Essa desagregação não ocorreu provavelmente devido ao equilíbrio de cargas elétricas observadas no parâmetro  $\Delta pH$ , bem como a predominância de óxidos de ferro e alumínio favorecem a floculação ou a cimentação do solo (Prado, 2016 citando Wambeke, 1992). Em relação à granulometria, é observado uma maior retenção granulométrica de material de diâmetro 1,5 mm e 0,02 mm, na qual frações com diâmetro menores que 0,002 representam algo em torno de 2% da composição do solo com 6% de cal.

- Solo SF2-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma desagregação gerada no solo quando da adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 0,05 mm e 0,02 mm, com fração de partícula de diâmetro menor que 0,002 em torno de 5%. Esse solo também apresentou uma agregação entre partículas de diâmetro entre 2,0 mm e 0,05mm. Nesse primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  apresentou uma inversão de cargas, predominando cargas positivas, mostrando ainda um desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais ácido que o novo PCZ desta mistura de solo cal. Em relação aos limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, indicando uma desagregação. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se no parâmetro  $\Delta pH$  uma discreta redução no desequilíbrio de cargas elétricas e que o pH em água continuava ácido em relação ao PCZ desse sistema solo com cal. Com foco nos limites de Atterberg, ocorreu um aumento do  $w_L$  e  $w_P$  em relação ao solo com 2% de cal, indicando uma possível desagregação. Essa desagregação não ocorreu provavelmente devido a um melhor equilíbrio de cargas elétricas observadas no parâmetro  $\Delta pH$ , bem como a predominância de óxidos de ferro e alumínio favorecem à floculação ou à cimentação do solo (Prado, 2016 citando Wambeke, 1992). Em relação à granulometria é observada uma maior retenção granulométrica de partículas de diâmetro entre 2,0 mm e 0,001 mm e frações de diâmetros menores que 0,002 representam menos de 1% da composição do solo com 6% de cal.
- Solo SF4-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma variação entre agregação e desagregação, na adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra bastante similar, considerando a variação dada pela repetibilidade do ensaio, com fração de partícula de diâmetro menor que 0,002 em torno de 2%. Nesse primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  apresentou uma inversão de cargas, predominando cargas positivas, mostrando ainda um pequeno desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais ácido que o novo PCZ desta mistura de solo cal. Em relação aos limites de Atterberg, tanto o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentaram, indicando uma desagregação. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se no parâmetro  $\Delta pH$  um equilíbrio de cargas elétricas e que o pH em água se iguala ao PCZ desse sistema solo com cal. Com 6% de cal adicionada, ocorreu um aumento do

$w_L$  e  $w_P$  em relação ao solo com 2% de cal, indicando uma possível desagregação. Esta desagregação não ocorreu provavelmente devido ao equilíbrio de cargas elétricas observadas no parâmetro  $\Delta pH$ , bem como a predominância de óxidos de ferro e alumínio favorecem a floculação ou a cimentação do solo (Prado, 2016 citando Wambeke, 1992). Em relação à granulometria é observada grande similaridade, considerando a variação dada pela repetibilidade do ensaio, e frações de diâmetros menores que 0,002 representam menos de 2% da composição do solo com 6% de cal.

- Solo SF8-Delgado, observa-se na curva granulométrica uma leve desagregação gerada ao solo, na adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 0,2 mm e 0,01 mm, com fração de partícula de diâmetro menor que 0,002 em torno de 4%. Nesse primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  apresentou uma inversão de cargas, predominando cargas positivas, mostrando ainda um leve desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais ácido que o novo PCZ dessa mistura de solo cal. Em relação aos limites de Atterberg, o solo foi classificado como não plástico. Ao se analisar o solo com a adição de 6% de cal, observa-se no parâmetro  $\Delta pH$  uma redução no desequilíbrio de cargas elétricas e que o pH em água continuava ácido em relação ao PCZ desse sistema solo com cal. Com foco nos limites de Atterberg, não houve alteração, continuando a ser classificado como não plástico. Em relação à granulometria é observada uma maior retenção granulométrica de partículas de diâmetro menores que 0,025 mm e frações de diâmetros menores que 0,002 representam menos de 1% da composição do solo com 6% de cal.
- Solo SF13-Delgado, observa-se na curva granulométrica, variação entre desagregação, na adição de 2% de cal. A curva granulométrica mostra uma ampliação do material de diâmetro entre 0,6 mm e 0,2 mm, com fração de partícula de diâmetro menor que 0,002 em torno de 5%. Nesse primeiro momento, verifica-se que o  $\Delta pH$  apresentou uma inversão de cargas, predominando cargas positivas, mostrando ainda um desequilíbrio de cargas e o pH em água está mais ácido que o novo PCZ desta mistura de solo cal. Em relação aos limites de Atterberg, o solo, antes classificado como não plástico, apresentou tanto valores para o  $w_L$  quanto o  $w_P$  aumentados, indicando uma desagregação. Ao se analisar o solo com a

adição de 6% de cal, observa-se no parâmetro  $\Delta pH$  uma discreta redução no desequilíbrio de cargas elétricas e que o pH em água está mais ácido em relação ao PCZ desse sistema solo com cal. Com 6% de cal adicionada, ocorreu um aumento do  $w_L$  e  $w_P$  em relação ao solo com 2% de cal, indicando uma possível desagregação. Esta desagregação não ocorreu, provavelmente, devido à predominância de óxidos de ferro e alumínio que favorecem a floculação ou a cimentação do solo (Prado, 2016, citando Wambeke, 1992). Em relação à granulometria é observada uma maior retenção granulométrica de partículas de diâmetro menores que 0,02 mm, e frações de diâmetros menores que 0,002 representam menos de 1% da composição do solo com 6% de cal.

- Solo – Osula, não foi observada a desagregação do solo com a adição dos teores de cal. Nesse caso, a cal apenas atuou como agente agregador/floculador. A curva granulométrica mostra uma redução do material de diâmetro entre 0,6 mm até partículas com fração de partícula de diâmetro menor que 0,002 em torno de 35% com 1% de cal, 28% com 2% de cal e 24% com 3% de cal. Em relação aos limites de Atterberg, observa-se que cada incremento de cal promove a redução, tanto nos valores para o  $w_L$  quanto o  $w_P$ , indicando a agregação do solo a cada incremento de cal ao solo estudado.