



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

Paulo Costa Fernandes¹; Gisandra Faria de Paula²; Dan Imbroisi Brant Teixeira³; Rafael Cerqueira Silva⁴.

RESUMO

A formação mineralógica de latossolos, geralmente ácidos, são propícios para reagirem quimicamente com materiais básicos, como a cal, gerando novos minerais que melhoram as suas propriedades mecânicas e podem compor as subcamadas dos pavimentos flexíveis. Neste estudo, foi observada, em laboratório, a variação do potencial hidrogeniônico (pH) ao longo do tempo (1 a 200/243 dias), em H₂O e em KCl, de duas amostras de latossolos de regiões distintas do Distrito Federal, com 3% (S-2) e 5% (S-1) de cal adicionada. Verificou-se em ambas as amostras que a transição do pH passando pelo ponto de carga zero (PCZ) ocorreu em datas semelhantes (60 dias). O S-2, a partir do 60º dia, passou a ser um solo com capacidade de troca catiônica, enquanto o S-1 passou a ter a capacidade de troca aniônica. Verificou-se também uma tendência de diminuição no valor de pH com o passar do tempo para ambas as amostras, indicando uma provável reação química com os minerais no interior das agregações. Tal redução pode estar associada a reações químicas de cimentação causada pelos silicatos de cálcio hidratado ou aluminato de cálcio hidratado. Por fim, pela simplicidade, baixo custo e rapidez, sugere-se a adoção do ensaio de pH no controle de execução de obras em que o solo seja melhorado ou estabilizado com cal.

PALAVRAS-CHAVE: pH, PCZ, cal, latossolo, estabilização química.

ABSTRACT

The mineralogical formation of latosols, which are generally acidic, is conducive to them reacting chemically with basic materials such as lime, generating new minerals that improve their mechanical properties and can make up the sub-layers of flexible sidewalks. In this study, the variation in hydrogenionic potential (pH) over time (1 to 200/243 days) in H₂O and KCl of two samples of latosols from different regions of the Federal District, with 3% (S-2) and 5% (S-1) added lime, was observed in the laboratory. Both samples showed that the pH transition through the zero charge point (ZCP) occurred at similar times (60 days). From the 60th day onwards, S-2 became a soil with cation exchange capacity, while S-1 became one with anion exchange capacity. There was also a tendency for the pH value to decrease over time for both samples, indicating a probable chemical reaction with the minerals inside the aggregates. This reduction may be associated with chemical cementation reactions caused by hydrated calcium silicates or hydrated calcium aluminate. Finally, due to its simplicity, low cost and speed, it is suggested that the pH test be used to control the execution of works in which the soil is improved or stabilized with lime.

KEY WORDS: pH, PCZ, lime, latosol, chemical stabilization.

^{1, 2, 3} Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF): SAM Bloco C, Setor Complementares, Ed. Sede do DER/DF, CEP 70.620-030, Brasília, DF, Brasil, paulo.fernandes@der.df.gov.br; gisandra.paula@der.df.gov.br; dan.teixeira@der.df.gov.br.

⁴ Univers. de Brasília (UnB): Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil, rafael.silva@unb.br.



INTRODUÇÃO

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

Na tentativa de viabilizar uma obra de pavimentação, são utilizados materiais locais que, por vezes, apresentam propriedades e comportamentos que não cumprem os requisitos necessários à execução da estrutura de pavimento. Nestes casos, recorre-se, geralmente, à estabilização química e/ou granulométrica dos solos, por ainda ser esta uma alternativa atrativa, pois permite a utilização dos solos da própria região do empreendimento, diminuindo os custos em relação à distância de transporte, fator que onera o custo de uma obra.

Uma solução técnica que vem sendo constantemente adotada nos projetos e construções de estruturas de pavimentos não só do Distrito Federal, mas do Brasil, em particular em regiões com escassez de materiais pétreos, é o melhoramento ou estabilização química com cal e/ou cimento do solo local, geralmente, solos lateríticos finos. Entre os anos de 2018 e 2023, 83% das obras de pavimentação licitadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF) apresentaram como solução técnica a melhoria ou estabilização química da base e/ou sub-base (DER-DF, 2021).

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

Os resultados obtidos com a interação solo-cal dependem dos argilominerais constituintes do solo e de fatores como o potencial hidrogeniônico (pH) do solo, teor de matéria orgânica, grau de intemperismo, sulfatos solúveis e concentrações alumina-sílica (LITTLE, 1995), sendo o tempo de cura também considerado um fator preponderante na resposta solo-cal, pois tempos de cura maiores auxiliam no ganho de resistência do solo ao promoverem a ampliação das ligações entre as partículas solo-cal (ROCHA; REZENDE, 2016).

Assim, no presente artigo apresenta-se a análise de dois solos (latossolos) de regiões distintas do Distrito Federal (DF), considerando a variação do pH ao longo do tempo, em ambientes laboratoriais com umidade e temperatura controladas, de modo que as reações químicas entre o solo e a cal aconteçam em condições de contorno bem delimitadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, predominam dois tipos de cales, de acordo com a sua formação química: cal dolomítica, que apresenta óxido ou hidróxido de magnésio e cal calcítica, que apresenta óxido ou hidróxido de cálcio. A cal calcítica é comercializada virgem – CaO (óxido de cálcio) ou hidratada – Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) (SILVA, 2016). Segundo Herrin e Mitchell (1961), o óxido de cálcio provém de rochas carbonatadas e o processo de hidratação da cal é exotérmico. Silva (2016) apresenta, na Tabela 1, os tipos de cales facilmente obtidas no mercado nacional.

Com o objetivo de definir parâmetros de qualidade, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) publicou, normativa técnica (DNIT 419/2019 – ME) que especifica os parâmetros mínimos de exigência química e física para as cales calcíticas adotadas em obras rodoviárias e ferroviárias (solo-cal), visando a determinação do teor mínimo de cal calcítica para estabilizar o solo com fundamento no critério da medição de pH, objetivando atingir o pH de 12,4,



ponto em que ocorre a saturação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e, assim, promover a realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 1. Tipos de cales comercializadas no Brasil (Silva, 2016).

Composição química	Nomenclatura
CaO	Cal calcária virgem
CaO.MgO	Cal dolomítica virgem
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Cal calcária hidratada
$\text{Ca}(\text{OH})_2.\text{MgO}$	Cal dolomítica mono hidratada
$\text{Ca}(\text{OH})_2.\text{Mg}(\text{OH})_2$	Cal dolomítica bi hidratada

O pH permite identificar o grau de atividade de um ácido ou de uma base em termos da atividade iônica do seu hidrogênio. Seu valor é diretamente associado pela relação das concentrações de íons de hidrogênio $[\text{H}^+]$ e de íons de hidroxila $[\text{OH}^-]$. E, no solo, relaciona-se com a medida de acidez do solo (concentração de íons H^+) que, em função dos valores encontrados nas soluções, poderá ser classificado como ácido ($\text{pH} < 5,5$ – concentração de íons de H^+ é maior do que a concentração de íons OH^-), moderadamente ácido (pH entre 5,5 e 6,4), praticamente neutro (pH entre 6,5 e 6,9), neutro ($\text{pH} = 7$) e alcalino ($\text{pH} > 7$) (BIGARELLA *et al.*, 1996 citado por LIMA, 2003).

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2023), os solos brasileiros têm o seu pH entre 3,5 e 5,5, o que os caracterizam como levemente ácidos e constitui-se um parâmetro de fácil obtenção de resultados para caracterização do solo.

Em 1997 (atualizado em 2017), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) desenvolveu um método para a leitura do pH em suspensão, em meio aquoso, no qual adotava a proporção solo: água em 1:2,5. Em 2017, esta empresa suplementou a metodologia substituindo o H_2O por $\text{KCl } 1 \text{ mol.L}^{-1}$ (cloreto de potássio), mantendo-se a proporção descrita anteriormente.

Com esta nova metodologia, é possível determinar o valor do ponto de carga zero (PCZ), caracterizado pelo resultado onde os íons determinantes de potencial (H^+ e OH^-) são iguais e, consequentemente, a dispersão em meio aquoso é interrompida. Na Figura 1, Prado (2022) apresenta um solo em que o PCZ é identificado no pH 5,6.

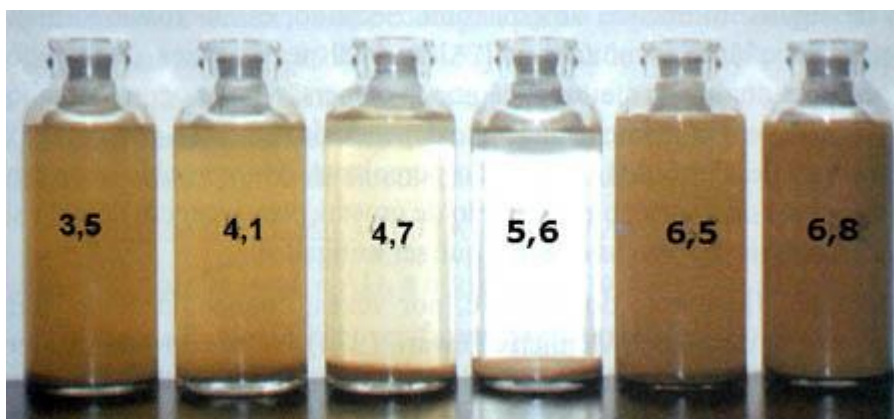


Figura 1. PCZ identificado no pH 5,6 (PRADO, 2022).



Prado (2022) também afirma que solos com pH em água menor que o PCZ são solos com capacidade de troca de ânions (CTA) e aqueles com pH em água maior que o PCZ apresentam capacidade de troca de cátions (CTC).

Keng e Uehara (1974) determinaram uma formulação para a obtenção do PCZ, conforme Equação 1.

$$PCZ = 2 * pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (1)$$

PCZ com valor positivo indica que a amostra tem predominância de óxidos-hidróxidos de ferro e alumínio e, para valores negativos, a grande presença de argilas silicatas (CARDOSO, 2002).

Quando o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ entra em contato com a argila, os íons Ca^{+2} e OH^- são facilmente dissociados na presença de água (CASTRO, 1995).

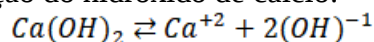
Volk e Jackson (1963, *apud* CASTRO, 1995) definiram em 5 faixas de pH as principais reações químicas:

- $pH < 4,0$: neutralização de hidrogênio trocável, via troca catiônica;
- $4,0 < pH < 5,6$: neutralização de H^+ e Al^{+3} pH- dependentes e hidrólise dos íons Fe^{+2} Fe^{+3} e Al^{+3} , via troca catiônica;
- $5,6 < pH < 7,6$: formação de hidroxí-polímeros de alumina e neutralização de grupamentos terminais aluminol, $Al(OH)_n$;
- $7,6 < pH < 11$: neutralização de grupos fracos - $Al(OH)$ e reação com grupamentos silanol, $SiOH$;
- $pH > 11$: início das reações pozolânicas, liberação de sílica e alumina com formação de compostos cimentantes.

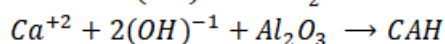
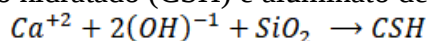
Prado (2016, atualizado em 2022) informa que o cálcio e o alumínio são cátions flocculantes (aglutinadores) e que o sódio é um cátion dispersante.

Com base nesta informação, o DNIT, em 2019, apresentou normatização (DNIT 419/2019 – ME) para determinar o teor mínimo de cal em solos melhorados/estabilizados quimicamente, por meio da elaboração da curva do pH x teor de cal em porcentagem, apresentando também as equações da reação da cal com os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio presentes no solo, conforme sequência a seguir:

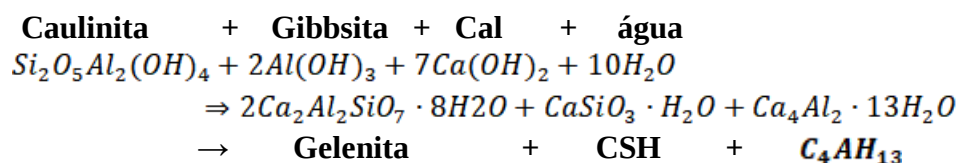
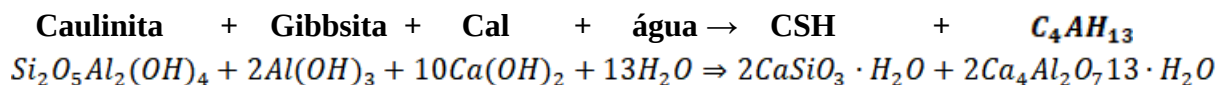
- 1) Em $pH \geq 12,4$ – Solubilização do hidróxido de cálcio:



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



Adiante, apresentem-se alguns exemplos das reações químicas que ocorrem quando cal é progressivamente adicionada a um solo até o $pH=12,4$. Toda a cal adicionada à suspensão de um solo, primeiramente, é utilizada nas reações de troca catiônica e de neutralização e depois se iniciam as reações químicas com a argila, que resultam na formação de compostos cimentantes que oferecem maior resistência mecânica à subcamada do pavimento (DNIT 419/2019):



DADOS DO ESTUDO

Solos Estudados

Para o presente estudo, foram selecionados latossolos em duas regiões distintas do Distrito Federal. O primeiro (S-1) provém do estudo realizado por Teixeira *et al.* (2019), o qual está localizado próximo à Estrada Parque Taguatinga (EPTG), rodovia distrital DF-085, na região de Águas Claras (coordenadas 15°49'47,9"S / 48°02'51,5"W). O segundo solo (S-2) foi coletado, a 3,0 m de profundidade, no Parque Rodoviário do DER-DF, próximo ao Km 0, da BR-020 (coordenadas 15°41'08,2"S 47°50'46,2"W), conforme Figura 2. A distância entre os dois solos é de, aproximadamente, 31 km e, ambos, configuram caixas de empréstimos de solos para utilização em obras rodoviárias do DER-DF.

Ensaio da Variação do pH em H₂O e em KCl com o Tempo

Para o solo S-2, após sua coleta em campo, o mesmo foi acondicionado em saco plástico, com resistência suficiente para não rasgar ao ser manuseado e conservado pois foi a mesma metodologia adotada por Teixeira *et al.* (2019).

Esta amostra teve a umidade de campo preservada, sendo adotado dois sacos plásticos para o acondicionamento e a armazenagem ocorreu em local sem a incidência de luz solar e com temperatura ambiente amena.

Antes da realização da determinação do pH realizou-se a determinação da umidade ótima e da densidade real dos grãos para a compactação em campo. Após isto foi realizada determinação do pH do solo natural tanto em H₂O quanto em KCl. Para a adição de cal adotou-se 3% de cal hidratada calcítica tipo CH-III em massa para o solo S-2. Para o solo S-1, a quantidade de cal utilizada foi de 5% em massa, conforme estudo de Teixeira *et al.* (2019). A escolha do valor da adição de cal para S-2 baseou-se em diretrizes de projetos de pavimento flexível do DER-DF, em que o uso deste solo integrou tal projeto (ciclovias), realizado em 2018.

Para as leituras do pH em H₂O e em KCl nos intervalos de tempo de dias: 0 (1h após a mistura), 1, 3, 8, 14, 24, 56, 90, 123 e 200, foi utilizado o equipamento Lucadema 210-P, um pHmetro portátil, com mala para transporte, autonomia de operação de 8h de funcionamento e com baterias recarregáveis, o que confere simplicidade, baixo custo e rapidez na realização do ensaio, conforme Figura 3.

Os resultados do Solo S-1 foram são oriundos do estudo de Teixeira *et al.* (2019) com metodologia de preparo e armazenamento similar, mas com leituras a 3, 164 e 245 dias tanto para o pH em H₂O quanto o pH em KCl.

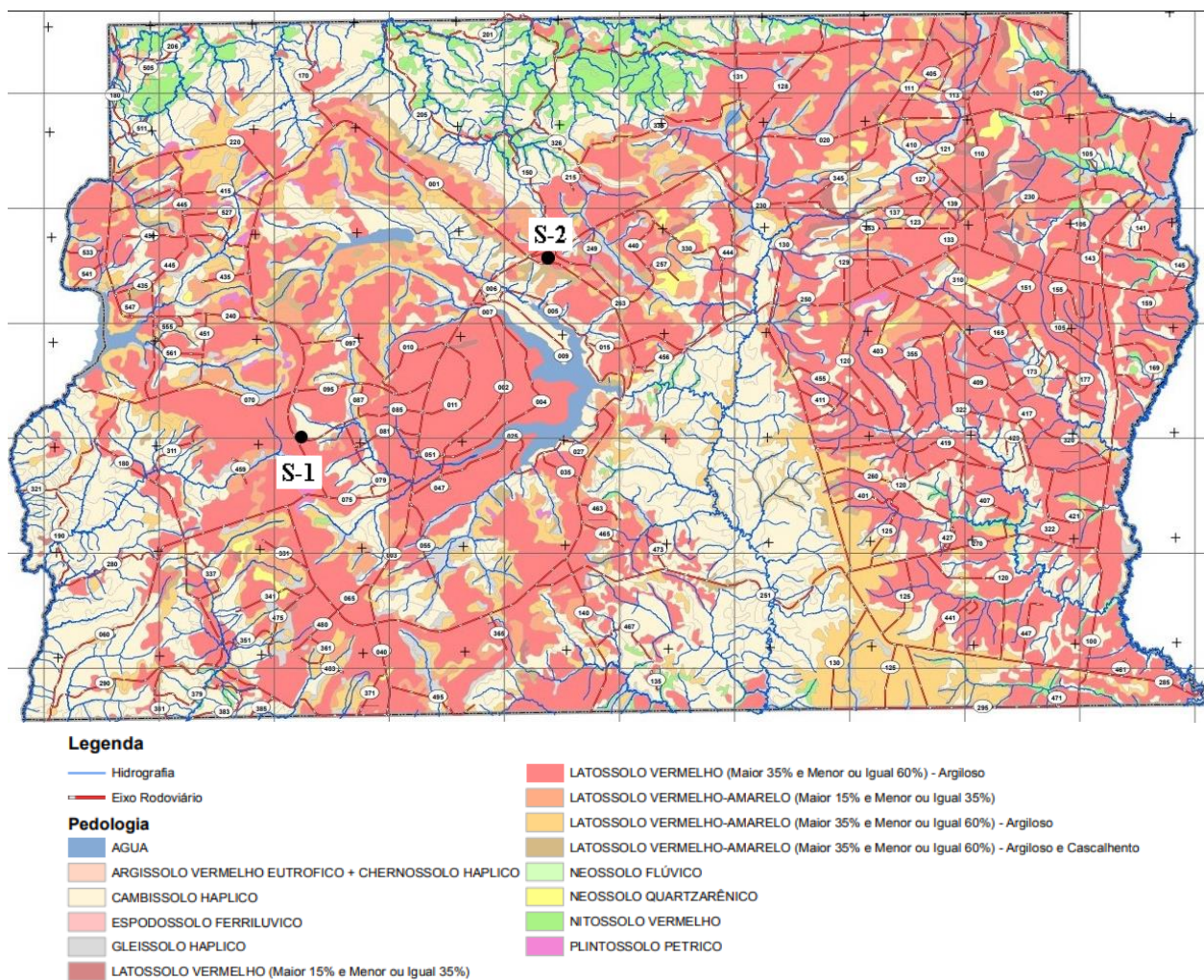


Figura 2. Localização dos solos S-1 e S-2 no mapa pedológico do DF (DER-DF, 2015).



Figura 3. Medidor de pH portátil do DER-DF.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2023), as partículas geralmente tendem a flocular em meio mais ácido ou próximo do PCZ, e a se desagregarem em meio mais alcalino do que o PCZ. Para os solos tropicais com pH inferior àquele correspondente ao PCZ, as partículas caminham para uma desagregação quando o pH aumenta passando pelo correspondente ao de carga zero, a qual se configura como uma considerável característica quando se realiza a estabilização química do solo.

A partir do cálculo do PCZ, conforme Equação 1, foram encontrados os valores descritos na Tabela 2, que indicam ser o PCZ tanto do solo *in natura* quanto do solo-cal próximos dos valores do pH do solo, situação em que não chegou a provocar a desagregação do solo com a adição da cal, pelo contrário, a cal promoveu a agregação do solo.

Tabela 2. PCZ do solo *in natura* e após a adição de cal (zero dias).

Solo <i>in natura</i>	G_s (g/cm ³)	w_{ot} (%)	pH H ₂ O	pH KCl	PCZ
S-1	2,724	27,7	5,85	5,97	6,09
S-2	2,699	27,3	5,30	4,85	4,40
Solo-cal (0 dias)					
S-1 (5% cal)	--	26,2	11,98	11,96	11,94
S-2 (3% cal)	2,748	25,9	12,78	12,09	13,25

Obs: G_s = densidade real inicial do solo; w_{ot} = umidade ótima.

Com a adição da cal ao solo, ocorreu um aumento do pH (em H₂O e em KCl) para o tempo de 0 dias, chegando a ultrapassar o PCZ do solo *in natura* para o S-1, conforme Figura 4.

Ao longo dos 200 dias de observação para o solo S-2, verificou-se uma redução nos valores de pH em água e KCl e do PCZ calculado. Esta redução foi de maior amplitude nos três primeiros dias para o pH em água e nos primeiros 14 dias para o pH em KCl e para o PCZ.

Decorridos estes períodos iniciais para o solo S-2, as variações se tornam pequenas até os 60 dias quando o pH em água e KCl e, por consequência, o PCZ tornam-se iguais. Para o solo S-1, as variações foram mais suavizadas, desde o tempo 0 até 60 dias de análise da mistura solo-cal e o ponto de equilíbrio entre o pH em H₂O e KCl e PCZ foi praticamente o mesmo para os dois solos analisados.

A partir dos 60 dias, para S-2, o pH em H₂O torna-se superior ao pH em KCl, tornando o PCZ inferior a ambos, sendo importante observar que as variações passam então a serem mais acentuadas nos três parâmetros. Já para S-1, o comportamento foi ao contrário: o pH em H₂O foi menor que o pH em KCl e o PCZ tornou-se superior a ambos.

Com o pH em H₂O ultrapassando o pH em KCl, o solo S-2, que tinha uma capacidade de troca aniônica, passou a ter o comportamento catiônico. A mudança do solo de CTA para CTC indica que a reação do hidróxido de cálcio (íons OH⁻) com o solo está gerando silicato ou aluminato de cálcio hidratado, e consequentemente, reduzindo o pH ao longo do tempo. Já para o solo S-1, o mesmo apresentou comportamento aniônico.

As variações ao longo do tempo com redução nos valores de pH apontam para a penetração de parte da química da cal nos agregados sendo provavelmente favorecida essa penetração após os 60 dias, conforme estudo realizado por Fernandes (2022). Esta observação é importante, pois esses elementos e/ou compostos químicos provenientes da cal ao penetrarem nos agregados poderão ampliar ou reduzir a estabilidade dos agregados a depender do solo, conforme resultados mostrados



por Ayala (2020) e Wanderley Neto (2020) para um solo laterítico, cujas agregações perderam estabilidade com o tempo em função, respectivamente, da presença de cal e de cimento Portland.

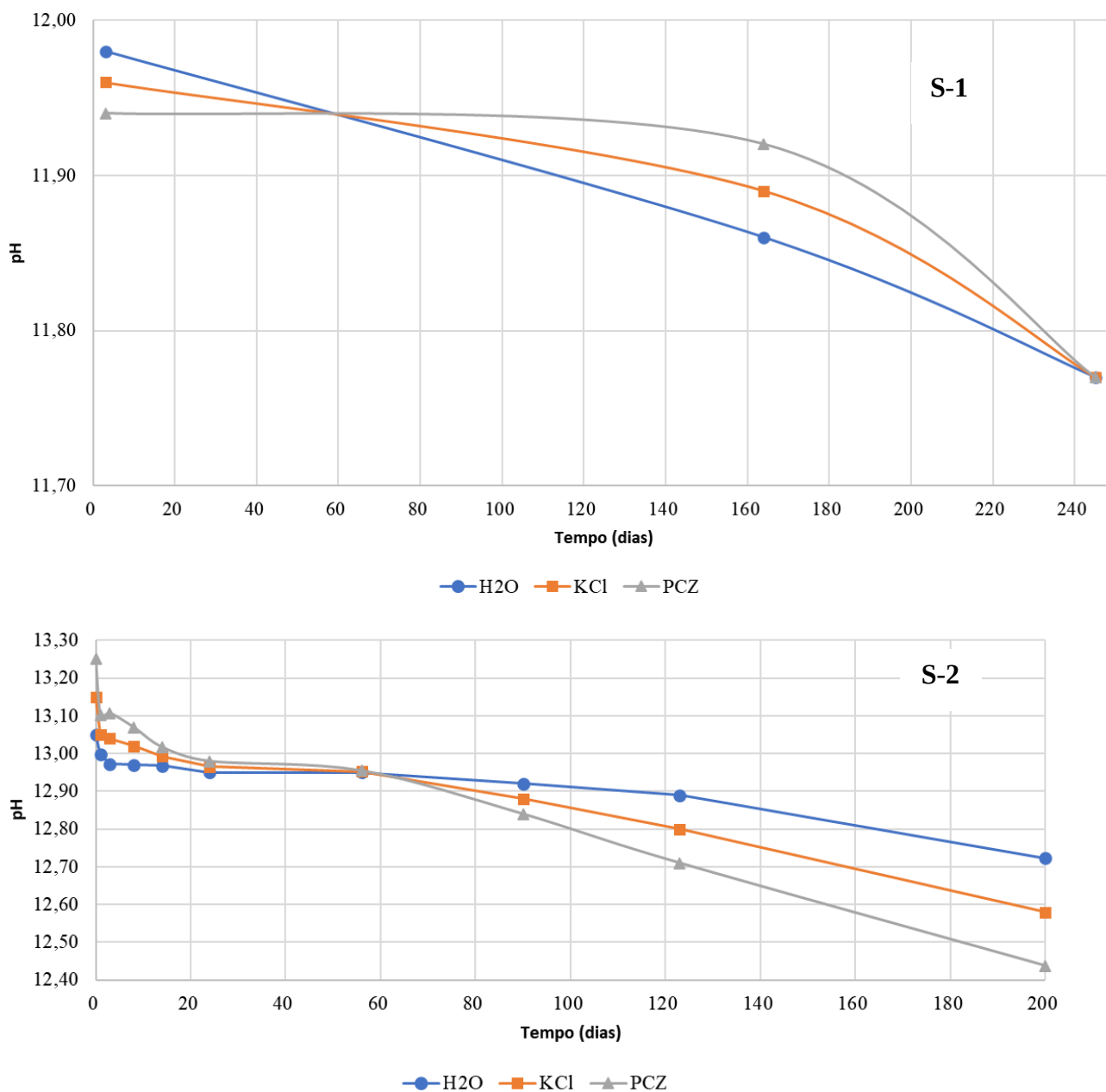


Figura 4. Variação do pH com o tempo para os solos S-1 e S-2.

Com o intuito de verificar a curva do teor ótimo de cal, conforme a norma DNIT 419/2019, foram elaboradas, para o solo S-2, as curvas do teor ótimo de cal da mistura solo-cal, na umidade ótima de campo, tanto em H₂O quanto em KCl, conforme Figura 5.



Observa-se uma estabilidade das leituras no meio aquoso após o teor de 2%, fato que só se observa no meio em KCl após 5%. Tal fato se justifica porque o meio em KCl é mais dissociativo para os íons de H^+ , sendo necessário saturar o meio com a cal para que haja a estabilização dos valores.

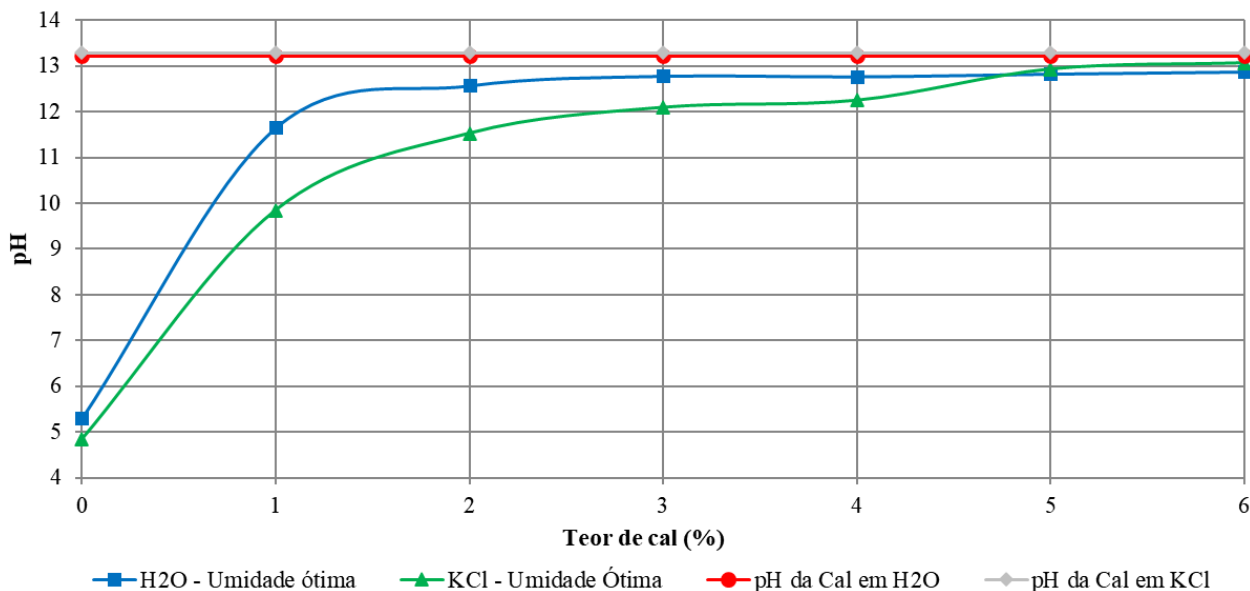


Figura 5. Curvas do teor de cal para S-2.

Os valores de pH obtidos da cal em H_2O (13,22) e em KCl (13,29) ficaram bem próximos, indicando proximidade da saturação dos íons H^+ no meio aquoso.

A alteração da curva do pH em KCl – umidade ótima indica que o teor de umidade pode influenciar nas leituras obtidas no pHmetro. Para teores de cal elevados (superiores a 5%), o pH em KCl e em H_2O convergem aos mesmos valores apontando um estado limite e saturação do material com o aditivo químico.

A adoção de 3% de cal em projeto para melhorar o solo S-2 foi, em princípio, assertiva, pois, em 2018, ano em que o solo estudado foi utilizado na implantação da ciclovia pelo DER-DF, não era normatizada a adoção de teores mínimos de cal pelo critério de pH. Porém, como pode ser observado, na Figura 5, os valores extraídos ficaram acima do valor previsto em norma (12,40), sendo obtido no material, na umidade ótima, valor de 12,78.

CONCLUSÕES

Segundo Prado (2022), a agregação torna-se máxima quando o pH coincide com o PCZ e passa a diminuir quando dele se afasta. Assim, a contextualização temporal das análises realizadas torna-se muito relevante, pois as mudanças ocorridas na química do meio darão origem a novos valores de pH em água e KCl, gerando novos PCZ.

Para os dois solos analisados, o ponto dissociativo entre o pH em H_2O e KCl e o PCZ ocorreu próximo de 60 dias, o que pode gerar comportamentos não esperados e, portanto, tais dados devem ser levados em consideração quando se realizar coletas de material da camada, após o término dos serviços.

Atingido o equilíbrio, estas novas condições se constituirão em referência para comportamentos que poderão advir de outras intervenções químicas no meio.



Cabe ainda destacar que, no caso de solos lateríticos contendo agregações, o equilíbrio químico entre o meio e a globalidade das partículas integrando o solo levará certo tempo, o que amplia a importância da presente análise da variação do pH da mistura solo-cal com o tempo (AYALA, 2020; FERNANDES, 2022).

Verifica-se também uma variação do pH para as amostras solo-cal estudadas, observando-se uma tendência de diminuição no valor de pH com o passar do tempo. Tal redução pode estar associada a reações químicas, bem como com a migração química para o interior dos agregados do solo o que, ocorrendo, requer maiores análises devido ao risco de solubilização dos oxi-hidróxidos de ferro.

Ao analisar variações do pH após longo tempo, faz-se necessário levar em consideração este decréscimo do pH. Fernandes (2022), ao comparar os resultados obtidos para o solo composto a base de uma ciclovía no DF, com incorporação de 3% de cal, após 2 e 3 anos de sua compactação *in situ*, verificou que as diferenças registradas para o mesmo solo com 3% de cal em laboratório colocam como uma das possibilidades muito prováveis a ocorrência de migração química da cal para as camadas inferiores e laterais da estrutura do pavimento.

Assim, as análises realizadas apontam para a necessidade de aprofundar os estudos sobre a evolução de parâmetros químicos como o pH e sobre a migração química que ocorre *in situ* quando da execução de uma camada contendo solo-cal, pois, com o passar dos anos, esta mudança de valores no pH pode ocorrer no sentido de sua diminuição, sendo necessário não somente analisar a camada que foi estabilizada quimicamente bem como as camadas adjacentes e o seu comportamento físico e mecânico.

Outro ponto importante é que, por sua simplicidade, baixo custo e rapidez, o ensaio de pH pode ser adotado no controle de execução de obras em que o solo seja melhorado ou estabilizado quimicamente com cal. A utilização de pHmetros portáteis garantirá, assim, maior confiabilidade na realização do controle tecnológico de camadas de pavimento em solo-cal.

Por fim, torna-se necessário estudos mais aprofundados em outros tipos de solos do DF e de outras regiões do país para esta verificação, bem como a influência do tipo de água adotada em campo face aos resultados obtidos em laboratório pelo estudo de Fernandes (2022).

AGRADECIMENTOS

À Diretoria de Estudos Tecnológicos (DITEC), unidade da Superintendência Técnica (SUTEC) do DER-DF, pela disponibilização do laboratório de solos para a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, R. J. L. (2020). Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Tese de doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 300p.
- Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, G. F. N.; Machado, S. L.; Mascarenha, M. M. A.; Silva Filho, F. C.; *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico (2023). Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS. São Paulo, SP, 2ª edição, 1082 p.
- Cardoso, F. B. F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central brasileiro. Tese de Doutorado, G.TD-009A/2002, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 407 p.
- Castro, F. J. C. O. (1995). Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização). Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 344 p.
- DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2015). Unidades pedológicas do Distrito Federal – Planta. Adaptado Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA). Obtido junto à



Diretoria de Meio Ambiente do DER-DF (DIMAM).

DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2021). Licitações Disponível em <<https://www.der.df.gov.br/licitacoes/>>. Acesso em 12 de outubro de 2021.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2019b). 419: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 3ª Ed. Rio de Janeiro, RJ. 574 p.

Fernandes, P. C. (2022). Estudo da migração química em solo laterítico melhorado com cal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 370/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

Grim, R. E. (1962). Applied Clay Mineralogy. McGraw-Hill, Califórnia, EUA. 422 p.

Herrin, M. & Mitchell, H. (1961). Soil lime mixtures. Highway Research Board, 99: 138 p.

Keng, J. C. W.; Uehara, G. (1974). Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. Proceedings of Soil Crop Science Society of Florida, v. 33, p.119-126.

Lima, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-17A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336 p.

Little, D.N. (1995). Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, United States of America, 244 p.

Prado, H. do. Pedologia Fácil (2022). 6ª Ed. Editora do autor. 271p.

Rocha, M. T. & Rezende, L. R. (2016). Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. Revista Matéria, 22(4): 1-25.

Silva, M. F. da (2016). Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico. Universidade de São Carlos, São Carlos, SP. 118 p.

Teixeira, D. B. I.; Marino, D. M., Paula, G. F., Camapum de Carvalho, J. (2019). Estudo da estabilização química de um solo tropical do Distrito Federal com adição de cal. 21º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Brasília, DF. 9 p.

Wanderley Neto, R. V. (2020). Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 344/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.