

## Análise Química e Mineralógica de Solo Estabilizado com Lama de Cal

Gissele Souza Rocha

Engenheira Geotécnica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, Brasil, gisselerocha@hotmail.com

Dario Cardoso de Lima

Professor Adjunto, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, Brasil, declima@ufv.br

Matheus Vasconcelos Joviano dos Santos

Engenheiro Metalúrgico, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, Brasil, matheusjoviano1996@gmail.com

**RESUMO:** A estabilização ou melhoramento químico dos solos possui importante relevância na engenharia geotécnica. Modifica certas características dos solos tais como, teor de umidade, resistência mecânica, durabilidade, e outras, de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas. No entanto, para atender a estas solicitações, é necessário conhecer o comportamento químico e mineralógico que ocorre durante as reações de estabilização do solo. O objetivo desta pesquisa é entender o comportamento dos aspectos químicos e mineralógicos que ocorrem em um solo fino proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) tratado quimicamente mediante incorporação de lama de cal. Para tal, as análises químicas foram realizadas de acordo com os procedimentos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997) e a análise mineralógica do solo foi realizada via difração de raios X, utilizando duas frações de solo separadas pela peneira de 53  $\mu\text{m}$ . Como resultado comprovou-se a basicidade do estabilizante químico e quantificou-se as somas de bases responsáveis pelas reações de troca catiônica na mistura solo-lama de cal que visa promover a melhora da sua trabalhabilidade. Estes resultados destacam o potencial da estabilização com lama de cal como uma técnica eficaz para melhorar as propriedades do solo, tornando-o mais adequado para diversas aplicações em engenharia civil e geotécnica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilização Química, Lama de Cal, Mineralogia.

**ABSTRACT:** The chemical stabilization or improvement of soils holds significant relevance in geotechnical engineering. It modifies certain soil characteristics such as moisture content, mechanical strength, durability, among others, to enhance their behavior, enabling them to respond satisfactorily to anticipated demands. However, to meet these demands, it is necessary to understand the chemical and mineralogical behavior that occurs during soil stabilization reactions. The objective of this research is to comprehend the behavior of chemical and mineralogical aspects in a fine soil from the Water Treatment Plant (ETA) at the Federal University of Viçosa (UFV), chemically treated through the incorporation of lime-mud. For this purpose, chemical analyses were conducted following the procedures of the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA, 1997), and the soil's mineralogical analysis was performed using X-ray diffraction, employing two soil fractions separated by a 53  $\mu\text{m}$  sieve. The expected outcome is to confirm the alkalinity of the chemical stabilizer and quantify the sums of bases responsible for cation exchange reactions in the soil-lime-mud mixture, aiming to enhance its workability. These results highlight the potential of lime-mud stabilization as an effective technique to improve soil properties, making it more suitable for various civil and geotechnical engineering applications.

**KEYWORDS:** Chemical Stabilization, Lime-Mud, Mineralogy.

## 1 INTRODUÇÃO

Modificar as propriedades dos solos, mediante estabilização ou melhoramento, consiste na alteração de suas características de maneira a otimizar o seu comportamento, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas. Conforme definido por Palmeira (1990), estabilizar ou reforçar um solo é utilizar algum meio/procedimento físico ou químico com a intenção de alterar certas propriedades e condições do solo diante de diversos propósitos no âmbito da Geotecnia.

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é um dos mais antigos métodos de estabilização química conhecidos, tendo sido utilizado nas mais variadas aplicações. A cal interage com as partículas amorfas de argila por meio de reações endotérmicas, promovendo uma série de transformações de natureza físico-química, que resultam em maior capacidade de suporte e maior estabilidade da mistura face à ação da água (CRISTELO, 2001).

Em misturas solo-cal é comum se associar a melhoria na trabalhabilidade do solo às reações de troca catiônica com a consequente floculação-aglomeração das partículas finas, bem como o ganho de resistência mecânica à ocorrência de reações pozolânicas (LIMA, 1981).

A mineralogia dos solos argilosos estabilizados com lama de cal é influenciada pelas interações entre os argilo-minerais do solo e os componentes da lama de cal, como o óxido de cálcio e hidróxido de cálcio, que reagem com os minerais argilosos para formar novos compostos que melhoram as propriedades do solo (LIU et al., 2019).

Segundo Mishra et al. (2020), alguns dos efeitos da estabilização com lama de cal incluem: (i) melhoria da estabilidade estrutural com a adição de lama de cal promovendo a formação de agregados mais estáveis o que reduz a susceptibilidade do solo à erosão e à deformação; (ii) aumento da resistência mecânica, ou seja, a reação entre os componentes da lama de cal e os minerais argilosos pode aumentar a resistência do solo à compressão, cisalhamento e desgaste; (iii) redução da plasticidade, tornando o solo mais adequado para construção; e (iv) melhoria da durabilidade com o aumento da resistência do solo aos processos de intemperismo e degradação.

Considerando-se que o uso adequado de misturas solo-lama de cal em obras geotécnicas depende de um adequado conhecimento das suas propriedades de engenharia, o presente estudo se reveste de aplicabilidade e tem por objetivo analisar o tratamento de um solo fino proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), mediante incorporação de lama de cal, com ênfase nos aspectos químicos e mineralógicos desse procedimento, a partir da estabilização ou melhoramento químico de suas propriedades.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Neste estudo, utilizou-se um solo argiloso coletado em um talude de corte da rodovia que liga os municípios de Viçosa e Paula Cândido, localizado nas proximidades da ETA. As amostras foram extraídas entre 0,40 e 0,80 metros de profundidade. Trata-se de um solo residual de gnaiss maduro, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, representativo do manto superior maduro, horizonte B, bastante intemperizado (TRINDADE, 2006). É um solo poroso, bem drenado, com granulometria argilo-areno-siltosa e predominância de argilominerais 1:1, óxidos de ferro e alumínio (OLIVEIRA, 2015), de ocorrência na Zona da Mata de Minas Gerais.

Empregou-se como agente estabilizante do solo a lama de cal, resíduo sólido proveniente da clarificação do licor branco, durante o ciclo de recuperação da soda cáustica no processo de extração de celulose de madeiras de eucalipto. A lama de cal é constituída por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e 0,70%; hidróxido de sódio (NaOH), possui granulometria fina, é friável e de coloração acinzentada (MACHADO et al., 2007), sendo classificada como resíduo classe II A (material não inerte), segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10004 (ABNT, 1987).

## 2.2 Métodos

Este estudo investiga os efeitos da estabilização do solo com lama de cal na mineralogia e microestrutura do solo. Foram ensaiadas amostras de solo antes e após o tratamento com lama de cal. As análises químicas foram realizadas de acordo com os procedimentos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). A determinação do pH feita em água ( $H_2O$ ) por um potenciômetro, usando proporções de solo e solução de 1: 2,5 (volume / volume). Os cátions trocáveis,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  foram extraídos em KCl (1 mol / L) e determinados por espectrometria de absorção atômica. O  $Al^{3+}$  proveniente foi extraído também por KCl (1 mol / L) e determinou-se volumetricamente por titulação com solução de NaOH de 0,025 mol / L. A acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ) foi realizada pela extração com 0,5 mol / L-acetato de cálcio a pH 7,0 e depois titulado com a solução salina de NaOH. Os cátions  $K^+$  e  $Na^+$  foram extraídos pelo Extrator de Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama.

A mineralogia do solo foi realizada via difração de raios X, utilizando duas frações de solo separadas pela peneira de 53  $\mu m$ . A difratometria de raios-X foi efetuada pela varredura da amostra utilizando um tubo que produz radiação de  $CoK\alpha$  equipado com um filtro de níquel irradiado com cobalto.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a composição mineralógica apresentada por Oliveira (2015) o solo estudado apresenta predominância da fração argila, contendo minerais como, gibbsita, goethita e hematita, que podem ser observados no difratograma apresentado na Figura 1.

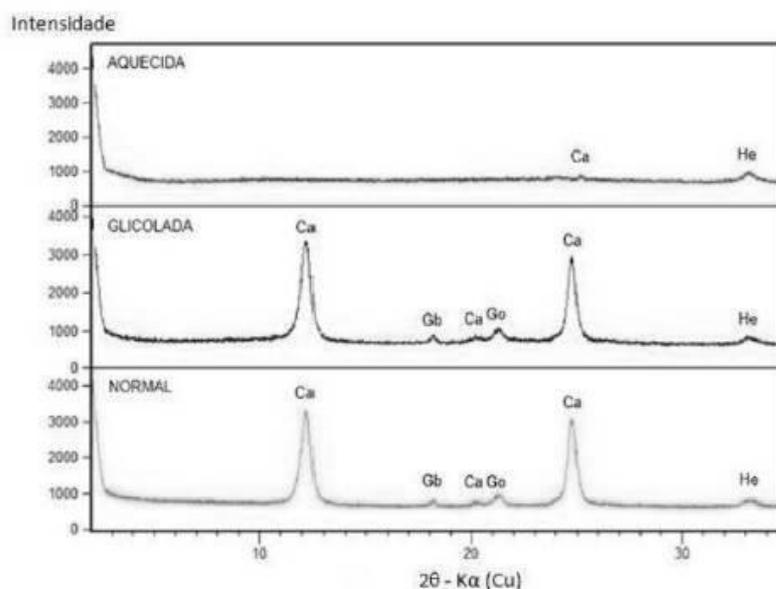


Figura 1 – Difratograma da fração argila do solo.  
Legenda: Ca - Caulinita; He – Hematita; Gb – Gibbsita; Go – Goethita.

A presença dos óxidos de ferro e alumínio, hematita, goethita e gibbsita, indicam o elevado grau de intemperismo químico do solo, no qual ratifica a sua classificação de solo tropical como Latossolo. Os óxidos de ferro possuem alta capacidade de troca catiônica (CTC) o que contribui para as reações de troca catiônica dos argilominerais com conseqüente floculação/aglomeração das partículas. Já a presença da caulinita, mineral mais presente nos solos brasileiros, na fração argila dos horizontes subsuperficiais deste solo se deve ao fato destes pedoambientes serem bastante ácidos.

As análises químicas e físico-químicas do solo e da mistura solo-lama de cal (Tabela 1) confirmam a classificação da mistura em relação ao pH, sendo o valor encontrado igual a 10,17. A mistura solo-lama de cal é alcalina e segundo a NBR 10004 (ABNT, 1987) situa-se na Classe II A, correspondente aos materiais não inertes. O solo, na sua condição natural, possui pH correspondente a 4,92 (ácido), no qual se enquadra entre

intermédio da faixa  $4,0 < \text{pH} < 5,5$  para solos tropicais. O pH em KCl menor que o pH em água indica predomínio de cargas superficiais líquidas negativas neste solo. Essas cargas negativas se devem a matéria orgânica do solo (MOS), uma vez que os teores de argila são baixos e não foram identificadas argilas mais ativas nos mesmos.

Tabela 1 – Análises químicas e físico-químicas do solo e da mistura solo-lama de cal.

Amostra \ Análise	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	pH CaCl <sub>2</sub>	P (mg/dm <sup>3</sup> )	K (mg/dm <sup>3</sup> )	Na (mg/dm <sup>3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )
Solo + Lama de Cal	10.17	-	-	40.60	36.00	1259.30	0.44	0.19
Solo	4.92	4.50	-	0.60	6.00	-	0.14	0.01

Amostra \ Análise	V (%)	m (%)	ISNa (%)	MO (Dag/Kg)	p-Rem (mg/L)	Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	Fe (mg/dm <sup>3</sup> )
Solo + Lama de Cal	100.00	0.00	88.31	1.14	4.50	0.32	8.20	0.30
Solo	22.10	0.00	-	0.13	3.60	0.31	0.80	21.40

Amostra \ Análise	Al <sup>3+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	H+Al (cmol/dm <sup>3</sup> )	SB (cmol/dm <sup>3</sup> )	t (cmol/dm <sup>3</sup> )	T (cmol/dm <sup>3</sup> )
Solo + Lama de Cal	0.00	0.00	6.20	6.20	6.20
Solo	0.00	0.60	0.17	0.17	0.77

Legenda: SB = Soma de Bases Trocáveis; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; m= índice de saturação por Alumínio; MO (Mat. Orgânica) = C.Org x 1,724 - Walkley-Black; P - Na - K - Fe - Zn = Mn - Cu - Cd - -Pb - Ni - Cr – Extrator Mehlich-1; S - Extrator – Fosfato monocálcico em ácido acético; N – N total – Digestão sulfúrica – Destilação Kjeldhal; H = Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0; t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; V= Índice de Saturação por Bases; ISNa – Índice de Saturação por Sódio; P-rem = Fósforo Remanescente.

Dentre as análises realizadas, a soma de bases é de extrema importância nas reações de troca catiônica nas misturas solo/lama de cal (CHEN et al., 2021). A soma de bases é obtida pelo somatório das bases trocáveis (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>) para a definição das capacidades de troca catiônica efetiva e potencial. Como pode se observar, a mistura solo-lama de cal possui um valor significativo de soma de bases indicando o número de cargas negativas dos colóides do solo que estão sendo ocupados pelos cátions básicos trocáveis. A troca catiônica ocorrida na permutação iônica através das reações com o cálcio (Ca<sup>2+</sup>) presente na lama de cal substitui os íons monovalentes tais como, sódio e hidrogênio na superfície das partículas de argila o que promove o fenômeno de floculação/aglomeração dos argilominerais melhorando suas propriedades.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, observou-se que a estabilização com lama de cal resultou em mudanças significativas na mineralogia do solo. Observou-se uma diminuição na quantidade de minerais argilosos e uma maior presença de novos compostos, indicando reações químicas entre a lama de cal e os minerais do solo. Além disso, a análise da microestrutura, revelou uma maior agregação do solo após o tratamento com lama de cal, sugerindo uma melhoria na estabilidade estrutural do solo.

A mineralogia da fração argila do solo identificou o alto grau de intemperismo deste solo no qual auxiliou na compreensão dos dados obtidos. Além disso, vale ressaltar que as caracterizações químicas corroboraram o efeito do processo de troca catiônica para a estabilização ou melhoramento deste solo.

Estes resultados destacam o potencial da estabilização com lama de cal como uma técnica eficaz para melhorar as propriedades do solo, tornando-o mais adequado para diversas aplicações em engenharia civil e geotécnica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1987). NBR 10004: *Classificação de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 63p.
- Chen, F., Xie, H., & Liu, F. (2021). *Influence of Quicklime and Slaked Lime on the Soil Microstructure and Engineering Properties*. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Infrastructure (pp. 86-94). Springer, Singapore.
- Cristelo, N. M. C. (2001) *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Minho, Portugal.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA – CNPS, 212p. (Documentos, 1).
- Lima, D.C. (1981) *Algumas Considerações Relativas à Estabilização dos Solos, em Particular à Estabilização Solo-Cal*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), São Carlos-SP, Escola de Engenharia de São Carlos-USP.
- Liu, F., Chen, F., & Wu, H. (2019). *Influence of Lime-Mud Stabilization on Soil Mineralogy and Microstructure*. In Advances in Materials Science and Engineering.
- Machado, C. C.; Pereira, R. S.; Trindade, T. P.; Lima, D. C.; Carvalho, C. A. B.; Santos, S. L. M. (2007) *Análise técnica e avaliação de trechos experimentais de misturas solo-lama de cal com vistas a aplicações em estradas florestais*. Rev. Árvore, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 265-274.
- Mishra, A. K., & Kumar, A. (2020). *Soil Stabilization Using Lime Mud: A Review*. In *Handbook of Research on Innovations in Civil Engineering* (pp. 193-205). IGI Global.
- Oliveira, F. S. D. (2015) *Utilização de resíduos de construção e demolição reciclados na sorção de Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup> e As<sup>5+</sup>*. 2015. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.
- Palmeira, E.M. (1990) *Estradas de Acesso*. Manual Técnico Geotêxtil Bidim, 30 p.
- Trindade, T. P. (2006) *Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental*. Viçosa, MG. 2006. 254p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.