

Influência da estabilização com cal em um perfil de solo tropical

Danielli Miranda Marino

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, marino.geologia@gmail.com

José Camapum de Carvalho

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, camapumdecarvalho@gmail.com

RESUMO: Os solos tropicais abrangem a maior parte do território brasileiro e podem ser divididos em solos lateríticos e solos saprolíticos. Apesar de sua expressiva ocorrência, sua utilização está condicionada a atender os critérios estabelecidos em projeto, sendo comuns problemas com a variação de umidade e plasticidade. Logo, os métodos de estabilização do solo propiciam a adequação das propriedades dos solos a aquelas requeridas para realização das obras de engenharia. Portanto, este trabalho consiste na avaliação da estabilização com cal CH-I de solos provenientes de um perfil de solo tropical, que foi dividido em três intervalos: intervalo 1 (0,80 a 2,55m), intervalo 2 (2,55 a 4,32m) e intervalo 3 (4,32 a 7,02m). Cada intervalo foi submetido a ensaios de caracterização física, pH, classificação MCT, determinação do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima. Foram utilizados 2% e 5% de cal CH-I em tempos de cura de 1 e 28 dias, após cada tempo de cura realizou-se ensaios granulométricos e pH. Na maior parte dos resultados obtidos, verificou-se que a cal promoveu aumento da umidade ótima e diminuição do peso específico aparente seco máximo, elevou os valores de pH e proporcionou mais agregações com o aumento da porcentagem utilizada.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cal, granulometria, pH.

1 INTRODUÇÃO

Os solos tropicais além de terem origem relacionada aos processos geológicos e/ou pedológicos atuantes em clima tropical úmido, possuem peculiaridades do ponto de vista geotécnico (propriedades físico-químicas e comportamento hidromecânico) que muitas vezes os diferenciam dos solos formados em regiões de clima temperado. Podem ser classificados como solos lateríticos, com ocorrência superficial e elevado grau de intemperismo ou como solos saprolíticos, pouco intemperizados e com estruturas da rocha-matriz por serem formados pela alteração da mesma *in situ* (COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE, 1985; VILLIBOR et al., 2009).

Os solos lateríticos (latossolos e argissolos) abrangem cerca de 58% dos solos mais intemperizados do território brasileiro, estendem-se por espessura variável e possuem estrutura geralmente agregada, ou seja, as partículas distribuem-se de maneira a formar agregações, levando ao aparecimento de macroporos entre elas e microporos em seus interiores, figura 1 (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2012; SANTOS et al., 2018).

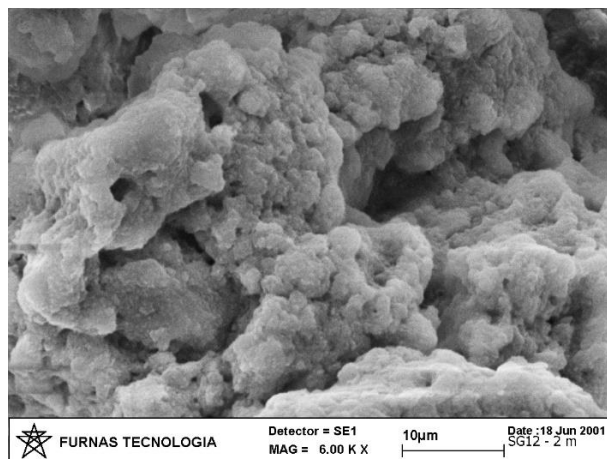


Figura 1. Estrutura de um solo laterítico. Fonte: CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2012.

Diante da significativa ocorrência dos solos tropicais no Brasil e da variabilidade vertical em suas propriedades provocada pelos diferentes graus de intemperismo sofrido, este artigo tem por objetivo analisar a ação da cal ao longo de um perfil de solo tropical, considerando-se diferentes teores e tempos de cura, a fim de promover o melhor entendimento

para o emprego dos solos tropicais em obras geotécnicas, como aterros e estruturas de pavimentos.

2 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

A Estabilização do solo consiste na utilização de meios físicos e/ou químicos para promover modificações na estrutura dos solos, com objetivo de melhorar seu comportamento no âmbito geotécnico (PALMEIRA, 1990). Os solos argilosos apresentam dificuldades para utilização, devido à sensibilidade a variações de umidade, contração, expansão e plasticidade.

A adição de meios estabilizadores pode, se bem analisada, além de promover a adequação destas características às requeridas para realização da obra de engenharia, proporcionarem economia de custos com transporte, uma vez que possibilita o aproveitamento dos solos locais. No entanto, as particularidades dos solos tropicais no que tange à composição químico-mineralógica e à estrutura agregada requerem cuidados e análises condizentes com cada realidade *in situ*.

2.1 Estabilização do solo com cal

Ao adicionar cal a um solo que contenha argilominerais e sob umidade determinada, podem ocorrer reações imediatas como as trocas catiônicas, floculação/defloculação, carbonatação e reações pozolânicas, que são de longo prazo (THOMPSON, 1966). Na troca catiônica há a substituição de parte dos cátions presentes na superfície dos argilominerais, como sódio (Na^+), magnésio (Mg^{2+}) e hidrogênio (H^+), pelos provenientes da cal, como o cálcio (Ca^{2+}), promovendo o agrupamento entre as partículas (MITCHELL e HOOPER, 1961). Um outro aspecto geralmente não lembrado, mas que assume grande relevância no caso dos solos tropicais é a desagregação proveniente das alterações do pH do meio assim como, não raro, consequentes solubilizações de agentes cimentantes como os oxihidróxidos de ferro e alumínio.

Segundo Guimarães (2002), a mistura solo-cal leva as seguintes alterações nas propriedades físicas do solo:

- Formação de agregações e consequente deslocamento da curva granulométrica em direção a materiais com maiores diâmetros;
- Diminuição do índice de plasticidade;
- Redução do peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima em ensaios de compactação utilizando a mesma energia;
- Aumento da resistência a esforços mecânicos;

- Redução de expansão e contração;

Delgado (2007), no entanto, ao estudar solos do Distrito Federal mostrou, por exemplo, que a cal pode gerar a desagregação e aumento da plasticidade do solo a depender do solo e do teor de cal utilizado. Ayala (2020) mostra ainda que a cura *in situ* pode não só promover a desagregação de certos solos como gerar migrações químicas suscetíveis de instabilizarem solos circundantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Solo

As amostras de solo utilizadas foram coletadas por meio de sondagem a trado manual em Sobradinho, Distrito Federal, com coordenadas $15^{\circ}41'42.12''\text{S}/47^{\circ}47'35.42''\text{O}$, como mostra a figura 2.

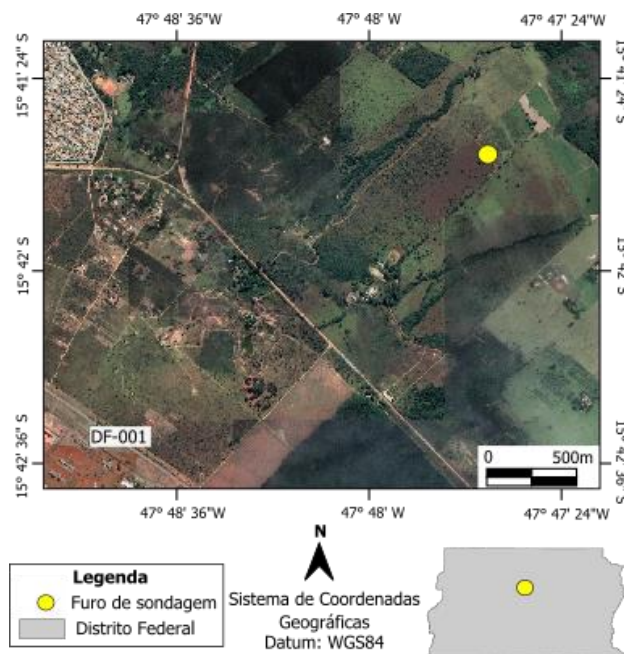


Figura 2. Mapa de localização da sondagem a trado.

Foram retiradas amostras de solo até 7,02 m de profundidade e divididas em três intervalos em razão das características do perfil de intemperismo e para obter a quantidade de solo necessária para realização dos ensaios.

Assim, os solos analisados são denominados como intervalo 1 (0,80 a 2,55 m), intervalo 2 (2,55 a 4,32 m) e intervalo 3 (4,32 a 7,02 m). Para melhor representação das condições originais encontradas no campo, a caracterização física de cada intervalo e os demais ensaios foram realizados a partir da umidade natural, ou seja, sem secagem prévia e de acordo com as seguintes normas:

- Análise Granulométrica: NBR 7181/16 (ABNT, 2016).
- Limite de Liquidez (w_l): NBR 6459/16 (ABNT, 2016).
- Limite de Plasticidade (w_p): NBR 7180/16 (ABNT, 2016).
- Peso específico dos grãos (γ_s): determinado seguindo as recomendações de ensaio do equipamento pentapicnômetro Pentapyc 5200e da marca Quantachrome Instruments.

A classificação dos solos foi realizada seguindo a Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) através da norma DNER-CLA 259/96 (DNER, 1996).

Para determinação do peso específico aparente seco máximo (γ_d) e da umidade ótima (w) utilizou-se a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994), sendo o ensaio de mini compactação executado utilizando-se a energia intermediária.

A análise química dos solos ocorreu por meio de ensaios de pH (potencial hidrogeniônico) em água destilada (H_2O) e em cloreto de potássio (KCl) seguindo Teixeira et al., (2017). De acordo com Keng e Uehara (1974) tais valores podem ser utilizados na determinação do ponto de carga zero (PCZ) e ΔpH através das equações 1 e 2:

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

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (2)$$

3.2 Solo-cal

Aos solos *in natura* foram adicionados 2% e 5% de cal hidratada CH-I Massical da marca Ical e determinados o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima também pela DNER-ME 228/94 (DNER, 1994). Com a obtenção das umidades ótimas, as amostras dos três intervalos do perfil de intemperismo foram submetidas a tempos de cura de 1 e 28 dias para avaliação da influência da cal na agregação do solo por meio dos ensaios granulométricos NBR 7181/16 (ABNT, 2016) e pH (TEIXEIRA et al., 2017).

Entretanto, como o objetivo deste trabalho consiste na análise do potencial da cal em promover agregações, realizou-se ensaios de granulometria apenas com água destilada e não com uso de defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio) nas amostras solo-cal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios realizados apenas no solo *in natura* dos intervalos 1, 2 e 3, podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios para o solo *in natura* de cada intervalo estudado.

Intervalos	w_l	w_p	IP	γ_s	Classificação MCT
1	44	32	12	2,70	LG'
2	44	33	11	2,72	LG'
3	54	42	12	2,75	LG'

4.1 Curvas de compactação

Nos intervalos 1 e 2, a incorporação de cal provocou redução considerável do peso específico aparente seco máximo, figuras 3 e 4. Passando de 16,59 kN/m^3 (solo *in natura*) para 16,22 kN/m^3 (solo-cal 2%) e 16,05 kN/m^3 (solo-cal 5%) no intervalo 1 e 16,47 kN/m^3 (solo *in natura*), 16,23 kN/m^3 (solo-cal 2%) e 16,30 kN/m^3 (solo-cal 5%) no intervalo 2.

Enquanto no intervalo 3 os resultados obtidos foram 15,14 kN/m^3 (solo *in natura*), 15,17 kN/m^3 (solo-cal 2%) e 15,02 kN/m^3 (solo-cal 5%), apresentando valores muito semelhantes para a condição sem cal e com 2% de cal e redução somente com o aumento da quantidade de cal adicionada, figura 5.

Quanto as umidades ótimas, houve aumento nos intervalos 1 e 2 devido a adição de cal, de 20,6% (solo *in natura*), 21,1% (solo-cal 2%) e 21,2 (solo-cal 5%) no intervalo 1 e 21,3% (solo *in natura*), 21,57% (solo-cal 2%) e 21,4% (solo-cal 5%) no intervalo 2. Já no intervalo 3, os valores para o solo *in natura* e solo-cal 2% aproximaram-se, sendo de 26,7% e 26,66%, respectivamente. Sendo verificado aumento da umidade ótima apenas para solo-cal 5% de 27%.

Em relação ao formato das curvas de compactação, nos intervalos 1 e 2 observa-se que a cal tendeu a propiciar a suavização da curva em torno da umidade ótima quando comparada às curvas obtidas para o solo natural, o que aponta para a redução da sensibilidade do comportamento mecânico do solo às variações de umidade. Já para o intervalo 3, o comportamento mostrou-se similar entre o solo com e sem a adição de cal.

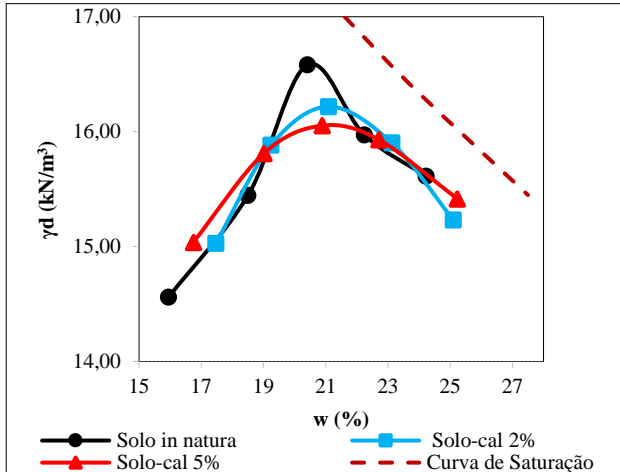


Figura 3. Curvas de compactação do intervalo 1.

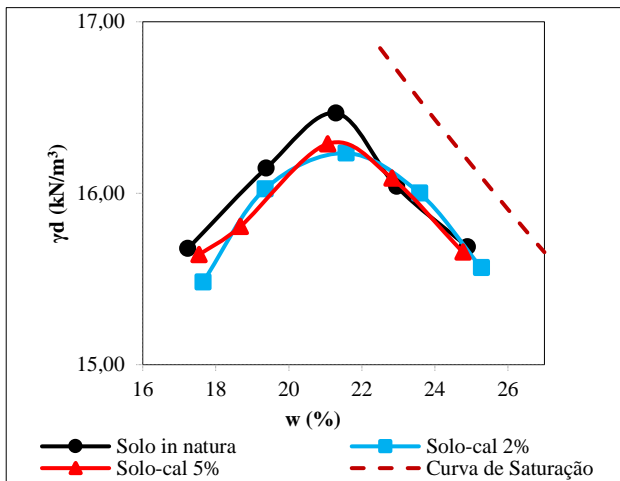


Figura 4. Curvas de compactação do intervalo 2.

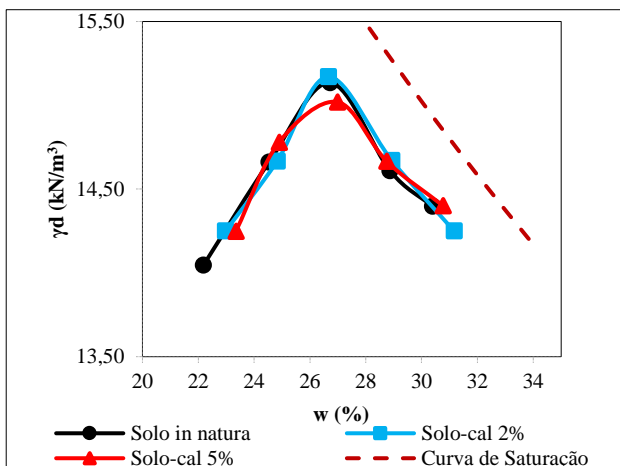


Figura 5. Curvas de compactação do intervalo 3.

4.2 Ensaios granulométricos

O posicionamento das curvas granulométricas com

defloculante à esquerda, ou seja, em direção à granulometrias menores, em relação aquelas sem defloculante, demonstra a natureza agregada de todos os solos estudados, figuras 6 a 8.

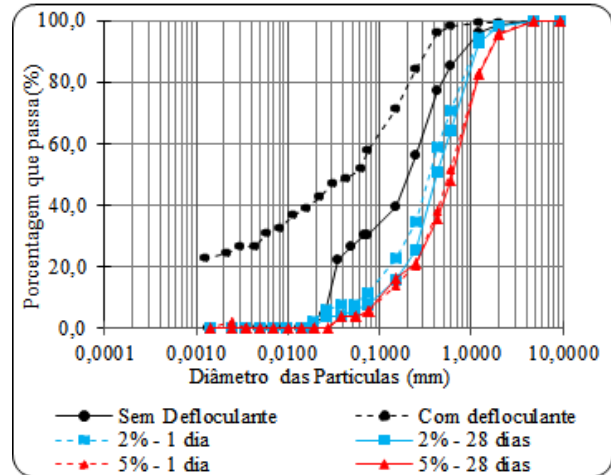


Figura 6. Curvas granulométricas do intervalo 1.

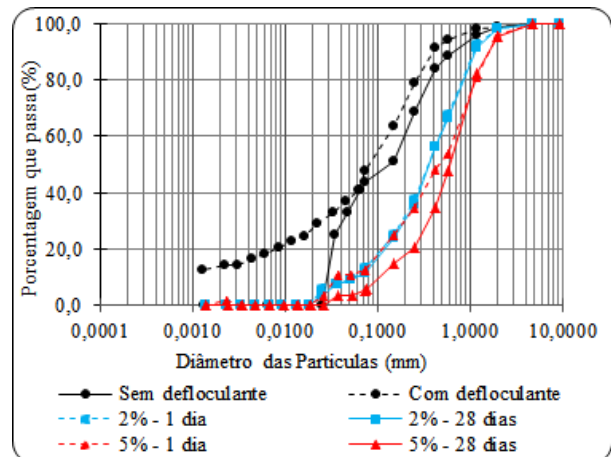


Figura 7. Curvas granulométricas do intervalo 2.

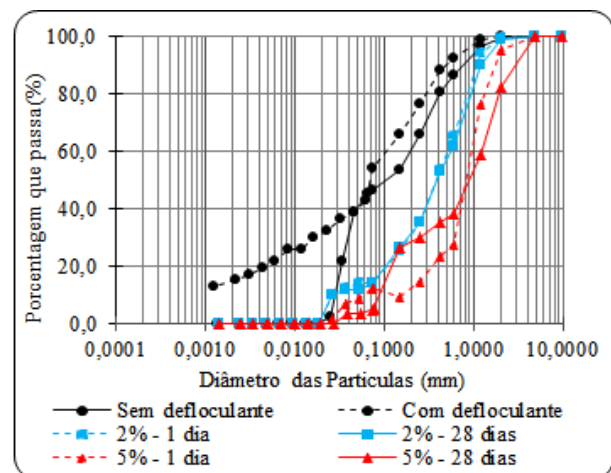


Figura 8. Curvas granulométricas do intervalo 3.

É possível notar visualmente o predomínio da dispersão das partículas para solução com defloculante, enquanto para soluções sem defloculante prevalece a precipitação do material no fundo das provetas, figura 9.

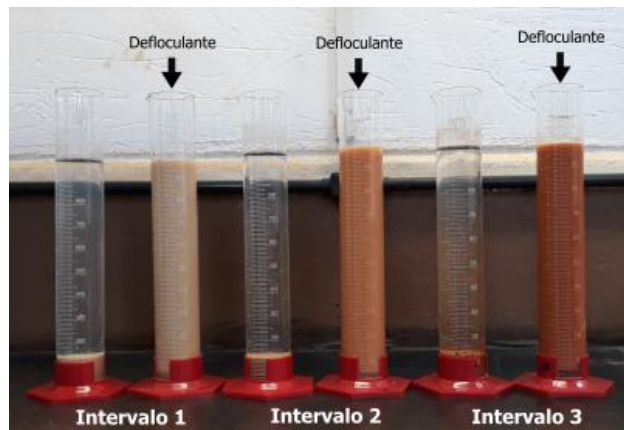


Figura 9. Ensaio de sedimentação do solo *in natura*.

A adição de 2% e 5% de cal provocou aumento de agregações, visto que todas as curvas granulométricas solo-cal tiveram deslocamento para a direita (em direção a maiores diâmetros) em relação as curvas de solo *in natura*.

Quanto ao tempo de cura, nota-se comportamentos semelhantes para as curvas solo-cal 2% de 1 e 28 dias. As curvas solo-cal 5% apresentaram valores coincidentes no intervalo 1, maior agregação com 28 dias do que com 1 dia no intervalo 2 e mais agregados até 1 mm com 28 dias do que com um 1 dia no intervalo 3.

Entretanto, entre diâmetros de 0,1 mm e 1 mm é observada inversão entre as curvas solo-cal 5% do intervalo 3, uma vez que com 28 dias houve menos agregações do que com 1 dia. O que indica instabilização de agregados, uma vez que a cal se mostrou eficiente para gerar maior agregação utilizando-se 5%, mas teve influência do tempo de exposição solo-cal.

4.3 pH

Segundo Bigarella et al., (1996), um solo é considerado ácido quando apresenta pH menor que 5,5, como é o caso do intervalo 1 (pH = 5,4) e moderadamente ácido de 5,5 a 6,4, onde inserem-se os intervalos 2 e 3 (pH = 5,9 e pH = 6, respectivamente), tabelas 2 a 4.

Para Camapum de Carvalho et al., (2015), ocorre uma tendência de floculação das partículas em meio mais ácido e de separação em meio com pH mais

alcalino. Quando o PCZ é superior ao pH do solo e o aditivo faz com que o pH do solo atinja o PCZ isso potencializa a desagregabilidade. No entanto, os resultados obtidos não levaram a essa situação para nenhum dos intervalos analisados.

A partir dos resultados de pH encontrados, nota-se que entre os intervalos analisados, o intervalo 3 apresenta o valor de pH (6) mais distante em direção a valores de pH mais alcalinos em relação ao PCZ (3), indicando maior possibilidade de desagregação que os demais intervalos.

A incorporação de cal ao solo, elevou os valores de pH em todos os intervalos, porcentagens utilizadas e tempos de cura.

Em relação ao ΔpH , Kiehl (1979) classifica que há predomínio de argilas silicatadas e alta troca de alumínio em solos com ΔpH negativo e predomínio de óxidos de ferro e alumínio e baixa quantidade de alumínio trocável em solos com ΔpH positivo. Os resultados obtidos apontam portanto, para o predomínio de argilas silicatadas nos intervalos analisados.

Tabela 2 – Resultados de pH, ΔpH e PCZ para o solo *in natura* e misturas solo-cal do intervalo 1.

Intervalo 1	H ₂ O	KCl	ΔpH	PCZ
Solo <i>in natura</i>	5,4	4,9	- 0,5	4,40
Solo-cal 2% 1 dia	12,13	12,13	0	-
Solo-cal 2% 28 dias	12,2	11,93	-0,27	-
Solo-cal 5% 1 dia	13,22	13,38	0,16	-
Solo-cal 5% 28 dias	13	13,27	0,27	-

Tabela 3 – Resultados de pH, ΔpH e PCZ para o solo *in natura* e misturas solo-cal do intervalo 2.

Intervalo 2	H ₂ O	KCl	ΔpH	PCZ
Solo <i>in natura</i>	5,9	4,7	-1,2	3,50
Solo-cal 2% 1 dia	12,18	12,16	-0,02	-
Solo-cal 2% 28 dias	12	11,91	-0,09	-
Solo-cal 5% 1 dia	13,21	13,07	-0,14	-
Solo-cal 5% 28 dias	12,89	12,95	0,06	-

Tabela 4 – Resultados de pH, ΔpH e PCZ para o solo *in natura* e misturas solo-cal do intervalo 3.

Intervalo 3	H ₂ O	KCl	ΔpH	PCZ
Solo <i>in natura</i>	6	4,5	-1,5	3
Solo-cal 2% 1 dia	11,86	11,59	-0,27	-
Solo-cal 2% 28 dias	11,94	11,58	-0,36	-
Solo-cal 5% 1 dia	13,03	12,98	-0,05	-
Solo-cal 5% 28 dias	12,74	13,11	0,37	-

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos conclui-se para o perfil de solo analisado que:

- Quanto maior a quantidade de cal utilizada, maior o potencial agregador da mesma, já que há maior disponibilidade de íons provenientes da cal para a troca catiônica e assim, maior floculação cabendo destacar, no entanto, que ao se passar de 2% para 5% de cal a agregação foi proporcionalmente inferior à ocorrida ao se passar de 0% para 2% de cal em especial para os intervalos 1 e 2;

- O maior tempo de interação solo-cal, pode resultar na instabilização dos agregados, decorrente da migração dos compostos químicos presentes na cal para o interior dos mesmos;

- Deve-se considerar não apenas o pH do solo sob influência da cal para análise da efetividade de agregação, mas também o pH do solo sem cal;

Uma observação de grande relevância a ser feita é quanto à similaridade em cada intervalo da umidade ótima para os três teores de cal (0, 2 e 5%), o que corresponde, como a porosidade global está a aumentar a tendência de valores de grau de saturação ótimo diminuindo com a ampliação do teor de cal. Como a umidade ótima ocorre em consequência da oclusão da fase ar isso aponta para a redução da porosidade interagregado. Isso indica que mesmo a porosidade global aumentando o comportamento mecânico em consequência da adição da cal poderá ser, considerando-se aqui apenas o aspecto físico, melhor.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB) pela disponibilização do Laboratório de Geotecnia, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. 13 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. 5 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. 3 p.

Ayala, R.J.L. (2020). *Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola*. Universidade de

Brasília, Programa de Pós-graduação em Geotecnia. 300 p.

Bigarella, J.J., Becker, R.D., Passos, E. (1996). *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Editora da UFSC: Florianópolis, v. 1, 875 p.

Camapum de Carvalho, J., Gitirana JR, G.F.N., Leão Carvalho, E.T. (2012). *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*. Faculdade de Tecnologia: Brasília, v. 4, 644 p.

Camapum de Carvalho, J., Rezende, L.R., Cardoso, F.B.F., Lucena, L.C.F.L., Guimarães, R.C., Valencia, Y.G. (2015). Tropical soil for highway construction: peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, 5 (1) 3-19.

Committee on Tropical Soils of ISSMFE (1985). *Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils*. ABMS: São Paulo, 124 p.

Delgado, A.K.C. (2007). *Estudo do comportamento mecânico dos solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária*. Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Geotecnia. 210 p.

Departamento Nacional de estradas de Rodagem (1994). DNER 228/94: *Solos compactados em equipamento miniatura – mini-MCV*. 14 p.

Departamento Nacional de estradas de Rodagem (1996). DNER-CLA 259/96: *Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura*. 6 p.

Guimarães, J.E.P. (2002). *A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil*. Pini: São Paulo, 2ª ed, 341 p.

Keng, J.C.W., Uehara, G. (1974). Chemistry, mineralogy and taxonomy of oxisols and ultisols. *Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida*, 33 (1) 119-126.

Kiehl, E.J. (1979). *Manual de edafologia: Relações solo-planta*. Agronômica: São Paulo, 262 p.

Mitchell, J.K., Hooper, D.R. (1961). Influence of time between mixing and compaction on properties of lime stabilized expansive clays. *Highway Research Board*, 304 (1) 14-31.

Palmeira, E.M. (1990). *Melhoria de Solos*. Publicação GA 001A/90. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 255 p.

Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumbreiras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Araújo Filho, J.C., Oliveira, J.B., Cunha, T.J.F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. EMBRAPA: Brasília, 5ª ed, 356 p.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A. Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. EMBRAPA: Brasília 3ª ed, 573 p.

Thompson, M.R. (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal the Soil Mechanics and Foundations Divisions ASCE*, 92 (6) 67-92.

Villibor, D.F., Nogami, J.S., Cincerre, J.R., Serra, P.R.M., Zuppolini Neto, A. (2009). Pavimentos de baixo custo para Vias Urbanas. *Arte & Ciência: São Paulo*, v. 2, 196 p.