

ESTUDO QUÍMICO E GEOTÉCNICO DAS REAÇÕES DE SOLO TROPICAL COM CAL HIDRATADA

Niiso BARELLI*

■ **RESUMO:** Nas regiões tropicais e subtropicais – onde os solos altamente intemperizados predominam – há falta de informações sobre o tratamento do solo com cal, particularmente as reações químicas envolvidas e/ou os produtos formados. No presente trabalho, selecionamos três solos com características mineralógicas e morfológicas diferentes, os quais foram submetidos à reação com cal calcífica em diferentes proporções. Os corpos de prova, compactados na umidade ótima empregando-se o método Proctor, foram submetidos aos testes de resistência à compressão simples, análise química (dosagem da cal reagida), difração de Raios X e microscopia eletrônica de varredura para verificação dos efeitos da adição de cal nos solos. Com relação à resistência à compressão simples e ao consumo de cal, os solos têm comportamento semelhante, mas os produtos formados nas reações são diferentes tanto do ponto de vista químico quanto morfológico.

■ **UNTERMOS:** Estabilização de solos; reação solo-cal; silicatos; aluminatos; cal; solo.

Introdução

A literatura mostra que a estabilização de solos com cal já foi usada por muitos anos e que a maior parte das investigações está relacionada a solos de regiões temperadas (Eades et al.¹, Orsmy & Kinter², Perret³ e Carvalho⁴).

Há falta de informações sobre tratamento de solos tropicais com cal. A estabilização de solos tropicais com cal para uso em construções de pavimentos pode, além de beneficiar as propriedades geotécnicas do solo, ser economicamente utilizável. Em alguns casos, entretanto, não existe conhecimento suficiente para avaliar os prováveis efeitos da estabilização do solo com cal sem um extensivo teste do solo individualmente. Esta situação é particularmente prevalente nas regiões tropicais e subtropicais, onde as pesquisas sobre estabilização de solos com cal são muito limitadas.

* Departamento de Química Tecnológica e de Aplicação do Instituto de Química – UNESP – 14800 – Araraquara – SP.

As investigações realizadas no Brasil (Ziolkowsky⁵, Nardé⁶, Chauvel & Nobrega⁷ e Lima⁸) tratam principalmente dos efeitos da cal nas propriedades da resistência à compressão simples, mas nada é registrado com relação às reações químicas envolvidas e/ou aos produtos formados. Dados disponíveis com relação à reatividade de solos altamente intemperizados são conflitantes, indicando uma lacuna nas investigações sistemáticas dos fatores que significativamente influenciam a estabilização com cal de tais solos. A utilização de materiais *in loco* para fins de construção mostra rapidez e economia do ponto de vista do desenvolvimento de rodovias, aeroportos e outras facilidades requeridas nas operações de transporte e sistemas de suprimento.

Material e métodos

Solos

O primeiro dos solos estudados é o chamado terra roxa. Nas condições tropicais e subtropicais, rochas basálticas (ricas em minerais como olivina, augita e feldspatos plagioclásicos) submetidas ao intemperismo originam solos argilosos com altos teores de óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio, manganês e titânio. Estas substâncias podem ser formadas tanto como materiais amorfos quanto como minerais bem cristalizados como hematita e goeita, dependendo do grau de evolução e das condições de drenagem. Os óxidos de ferro, em virtude de sua abundância e diversidade nos graus de cristalinidade, apresentam considerável influência nas propriedades químicas e físicas de tais solos (Pombo et al.⁹).

A terra roxa é um solo vermelho, composto principalmente pelo argilo mineral gibsitá e uma grande quantidade de óxidos hidratados de ferro amorfos e magnetita. Este solo quando umedecido é conhecido pelo nome "pó de café" (9,0% SiO₂, 12,3% Al₂O₃, 33,4% Fe₂O₃). É um solo espesso e muito alterado e, do ponto de vista micromorfológico, é caracterizado por uma estrutura microgranular apresentando um sistema de microagregados, os quais se juntam formando porções maiores, separadas por vazios (Figura 1). Este solo é encontrado em vastas áreas do sudeste do Brasil e foi tratado com 3, 5, 7, 8, 12 e 15 gcal/100g solo.

O chamado solo arenoso fino (10,7% SiO₂, 13,1% Al₂O₃ e 9,0% Fe₂O₃) cobre largas áreas do Estado de São Paulo. De acordo com dados disponíveis no Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, o solo arenoso fino está certamente associado a formações geológicas de rochas sedimentares. Entre estas formações, destaca-se a Formação Bauru, Formação Botucatu-Pirambóia, Formação Caiuá, Grupo Tubarão e Cenozóico. A fração areia (quartzó), isto é, aquela que passa na peneira de 2,00 mm e é retida na de 0,075 mm, excede 50% em peso. A fração argila é composta principalmente de caolinita e hidróxido de ferro (gibsitá e algumas vezes encontrada

em pequena quantidade). A microestrutura desta fração fina é caracterizada pela ausência de cristais isolados, sendo composta por uma massa de pequenas partículas (1/10 m). Estas são interligadas formando uma massa, separada por vazios, chamada de "pipoca" (Figura 2). Este solo foi tratado com 3, 5, 7, 9, e 12 g cal/100 g solo.



FIGURA 1 - Fotomicrografia de varredura do solo Terra Roxa, 6.000X.



FIGURA 2 - Fotomicrografia de varredura da amostra de Solo Arenoso Fino, 6.000X.

O termo saprolítico é utilizado para um material que preservou a textura e o aspecto estrutural da rocha matriz, mas perdeu a resistência devido à dissolução dos feldspatos com formação de caolinita.

A mineralogia dos solos saprolíticos não é muito diferente daquela dos solos lateríticos; a principal diferença reside na organização dos elementos. Nos solos lateríticos, os constituintes mineralógicos da fração argila estão intimamente associados (plasma argilo-férrico) e organizados como unidades estruturais. Nos solos saprolíticos, os constituintes estão isolados, sem organização particular além daquela inerente à rocha matriz. Assim, o plasma formado no saprolítico é constituído por argilominerais formados diretamente de um dado mineral primário, tanto por transformação como por neoformação, ocupando lugar e formato do mineral (pseudomorfose).

O solo saprolítico deste trabalho (16,5% SiO_2 , 2,2% Al_2O_3 e 15,60% Fe_2O_3) apresenta, por difratometria de Raios X, os argilominerais caolinita e gibsitá, além de hematita e grande quantidade de quartzo. A microestrutura deste solo é uma associação dos argilominerais em forma de massa cimentada com muitos vazios (Figura 3). Este solo foi tratado com 3, 5, 7 e 9 g cal/100 g solo.

Foi usada neste trabalho uma cal calcítica com não menos que 95% em $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Periodicamente foi executada uma análise para certificar-se do grau de carbonatação e se a mesma qualidade de cal estava sendo usada no decorrer do trabalho.

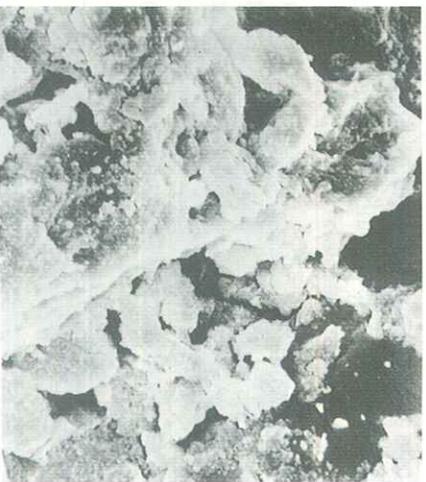


FIGURA 3 - Fotomicrografia de varredura do Solo Saprolítico, 6.000X.

Preparação dos corpos de prova

A relação densidade seca em função da umidade para os solos não-tratados e para as misturas solo-cal (após passarem pela peneira de 2,00 mm) foi determinada com uso de equipamento especial (Hilt & Davidson¹⁰, Pinto¹¹). As determinações foram efetuadas para corpos de prova compactados em moldes e em uma única camada.

Para cada corpo de prova do solo puro ou em mistura foram dados cinco golpes por um peso de 2,75 kg que cai de uma altura de 50 cm; o molde era invertido e mais cinco golpes eram dados. Corpos de prova de 50 x 50 mm foram obtidos e a energia de compactação é equivalente àquela dada pelo método de Proctor normal. Os corpos de prova eram selados em plástico para prevenir a perda de umidade e a carbonatação da cal.

Preparação das misturas

Uma quantidade predeterminada de cal era adicionada a uma amostra pesada do solo seco ao ar e a mistura era homogeneizada em um saco plástico (Orsmy & Kinter¹²). Após esta operação adicionava-se água destilada em quantidade apropriada e a mistura era novamente homogeneizada dentro do saco plástico para evitar-se a carbonatação e a perda de umidade. A homogeneização final era inspecionada visualmente e por contato manual.

Resistência à compressão simples

Este teste foi usado para mostrar os efeitos da cal hidratada no comportamento da resistência dos solos. A carga vertical foi aplicada a uma velocidade de 1,27 cm/min. Tomando-se como base os resultados da densidade seca x umidade, dezesseis réplicas para cada quantidade de cal foram preparadas e divididas em quatro conjuntos de corpos de prova, os quais foram submetidos ao ensaio. Os valores para a resistência à ruptura são altamente dependentes das condições do teste e dos corpos de prova. Os resultados deste trabalho só podem ser vistos como uma indicação relativa dos efeitos na resistência e não como valor absoluto pertencente a um particular corpo de prova (Willoughby et al.¹²).

Determinação da cal reagida

No final do período de cura e após o ensaio de ruptura, empregava-se o método de LeDuc (Perret³) para determinar-se a quantidade de cal não reagida com o solo. Uma amostra de 1,5 g pesada com aproximação de mg era agitada por 30 minutos em um erlenmeyer vedado com 20 ml de uma solução de sacarose a 20% w/v. O líquido sobrenadante, após a precipitação do material sólido, era decantado sobre um papel de filtro, deixando no erlenmeyer a maior quantidade possível de sólido. A operação era repetida mais uma vez usando outros 20 ml de solução de sacarose. O precipitado e líquido eram colocados no filtro, que era lavado várias vezes com água

destilada. O filtrado e os volumes de lavagem eram recolhidos em um balão volumétrico de 100 ml que tinha seu volume final completado com água destilada. Uma alíquota desta solução era titulada com solução 0,0100N de H_2SO_4 , usando como indicador uma mistura de verde de bromocresol a 0,1% e fenolftalina a 0,5%, ambos em etanol e misturados na proporção volumétrica de 1:2. A cal reagida foi obtida por diferença.

Difratometria de Raios X

As amostras para difração de Raios X eram tomadas ao acaso dos quatro corpos de prova previamente submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples ao final do tempo de cura. Os difratogramas foram obtidos tanto pelo método de Debye-Scherrer em câmaras de 114,6 mm, usando-se radiação $MoK\alpha$ ($\lambda = 0,710 \text{ \AA}$) com 30 Kv e 20 mA de potência e 20 h de exposição, como pelo método difratométrico em um arranjo de Bragg-Brentano, usando-se radiação $CuK\alpha$ ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) com 38 Kv e 20 mA e potência, com contador proporcional e discriminador de altura de pulso. Os d_{hkl} obtidos eram comparados com padrões ASTM¹³. Foram efetuados difratogramas das misturas de todas as composições.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura é excepcionalmente adequado para o estudo da morfologia, textura e arranjo dos argilominerais dos solos, assim como para o dos produtos das reações que ocorrem porque oferece uma visão tridimensional ampliada e com grande profundidade de foco da superfície não modificada da amostra. No estudo de argilominerais, onde se procura observar a morfologia do argilomíneral (topografia das partículas em forma, porosidade, microestrutura, textura e associações), torna-se imediatamente aparente que certos argilominerais são mais fáceis de se examinar que outros, dadas suas dimensões, cristalinidade e morfologia (Barelli¹⁴).

As amostras para MEV foram tomadas como aquelas para Raios X, colocadas em um suporte, coladas com esmalte de unhas e recobertas sucessivamente por carbono e ouro em um evaporador de alto vácuo. Após esta operação as amostras foram examinadas em um MEV modelo JSM-P15.

Resultados e discussão

A condução desta investigação consistiu em fazer-se análise química, difratometria de Raios X e resistência à compressão simples, assim como exame por

microscopia eletrônica de varredura do solo natural, para comparação de suas peculiaridades após tratamento com cal, curado por períodos variando de 3 a 31 dias em temperaturas de 23-28°C. Os efeitos de tal tratamento foram avaliados através dos seguintes estudos:

- Densidade seca em função do teor de umidade (Figuras 4, 5 e 6). Para os três solos estudados o que apresenta menor teor de umidade, tanto para o solo puro quanto para o tratado, é o arenoso fino. Para o solo terra roxa a umidade ótima decresce com o aumento de cal, discordando dos resultados da literatura (Perret³ e Carvalho⁴). Para os três solos, a densidade seca diminui com o aumento do teor de cal, fato atribuído à agregação/floculação das partículas argilosas, aumentando o número de vazios (Barelli¹⁵).

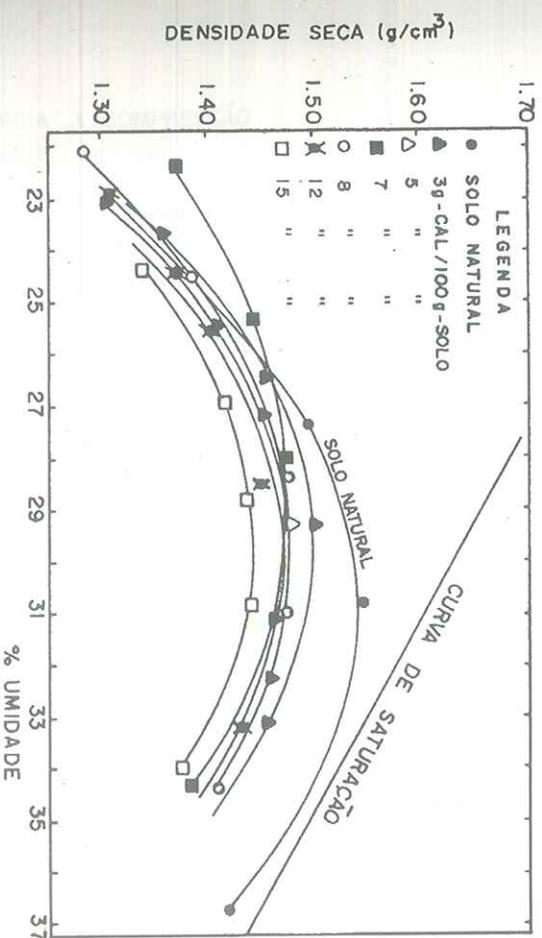


FIGURA 4 - Relação da densidade seca em função da umidade para o solo natural e com os teores de cal - Terra Roxa.

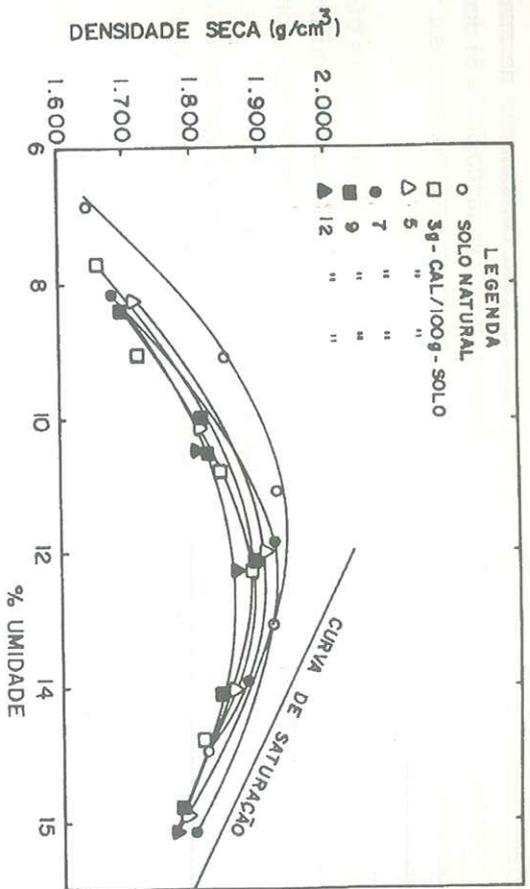
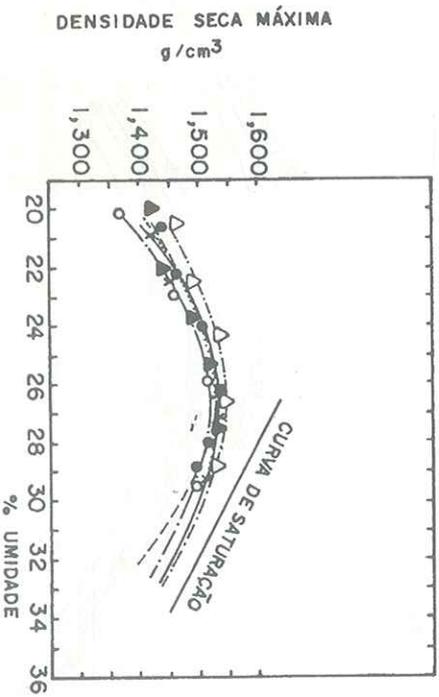


FIGURA 5 - Relação da densidade seca em função da umidade para o solo natural e com os teores de cal - Solo Arenoso Fino.



LEGENDA

| | | | |
|---|------------------|---------------|---------------|
| x | SOLO NATURAL | $d_s = 1,535$ | $H_2O = 27\%$ |
| ● | 3g CAL/100g SOLO | $d_s = 1,525$ | $H_2O = 26$ |
| △ | 5g CAL/100g SOLO | $d_s = 1,545$ | $H_2O = 27$ |
| ▲ | 7g CAL/100g SOLO | $d_s = 1,535$ | $H_2O = 26,5$ |
| ○ | 9g CAL/100g SOLO | $d_s = 1,515$ | $H_2O = 27$ |

FIGURA 6 - Relação da densidade seca em função da umidade para o solo natural e com os teores de cal - Solo Saprolítico.

b) Relação de resistência à compressão simples x tempo de cura em dias (Figuras 7, 8 e 9). Nos três solos estudados, vê-se que há um ganho na resistência dos mesmos. Para o solo arenoso fino, as curvas enfileiram-se todas com a mesma inclinação, seguindo em termos gerais a mesma lei e alcançando um valor máximo de 60 kgf/cm² para o 31º dia de cura. É interessante notar que, na terra roxa, há uma inversão de valores na resistência à compressão simples quando se passa de 12 gcal/100 g de solo para 15 gcal/100 g de solo, o mesmo acontecendo para os valores de 3 gcal/100 g de solo e 7 gcal/100 g de solo, para o solo saprolítico.

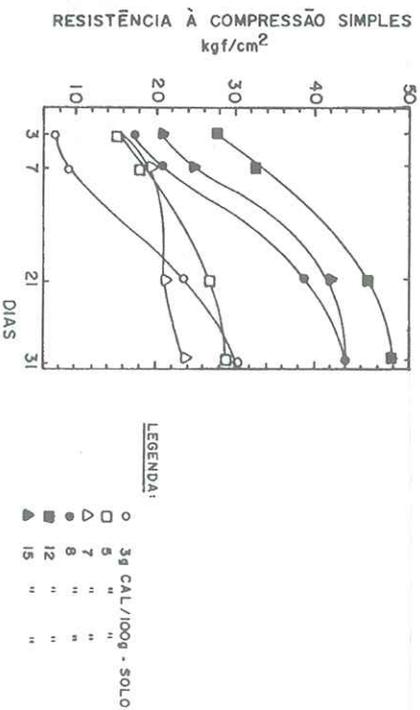


FIGURA 7 - Resistência à compressão simples em função do tempo de cura - Terra Roxa.

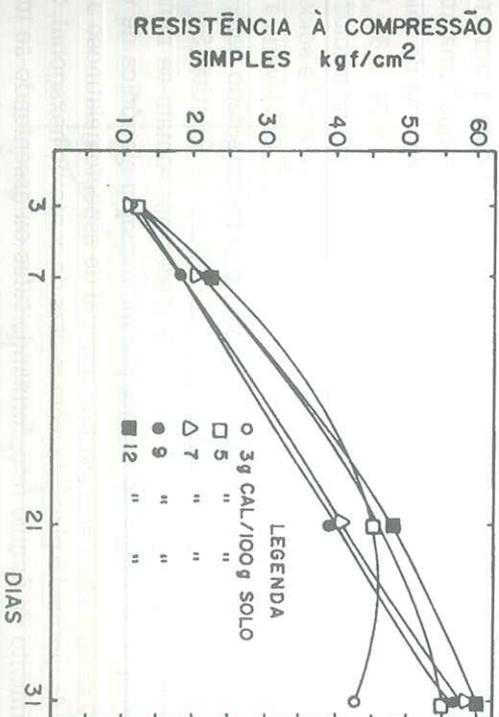


FIGURA 8 - Resistência à compressão simples em função do tempo de cura - Solo Arenoso Fino.

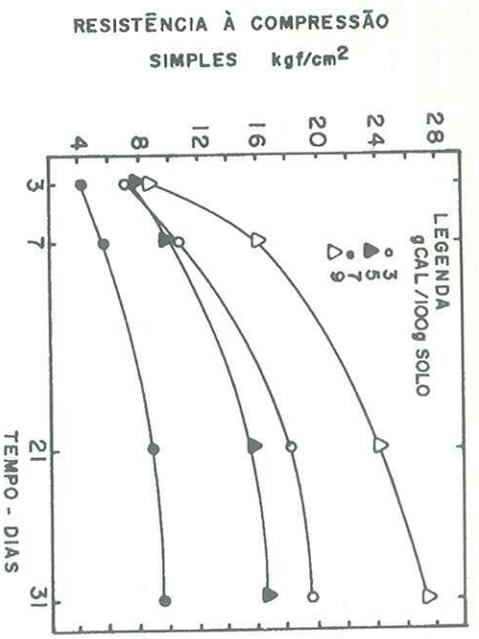


FIGURA 9 - Resistência à compressão simples em função do tempo de cura - Solo Saprolítico.

c) Relação do consumo de cal em função do tempo de cura (Figuras 10, 11 e 12). Para os três solos estudados o consumo de cal varia em função dos teores de cal adicionada. Provavelmente isto se deva aos diferentes teores de óxidos e hidróxidos de ferro que recobrem as partículas dos argilominerais dos solos, consumindo cal para formação de gel férrico (Barrelli¹⁵).

d) Microscopia eletrônica de varredura. Um produto de reação com morfologia discreta ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ - aluminato tricálcico hexahidratado) (Figura 13), foi detectado por difratometria de Raios X da reação da cal com a terra roxa. Este produto apresenta uma morfologia interessante, apresentando uma rosa, ou a explosão de uma bolha. A difratometria de Raios X para o sistema do solo arenoso fino mostra alguns picos novos, em 12,19; 10,28; 6,23; 4,38; 3,79; 2,86; 2,41; 2,20 e 2,16 Å. A primeira vista, este material poderia ser um silicato de cálcio hidratado, o qual é reportado como o principal produto da reação entre a cal e solos tropicais (Cabrera & Nwakanma¹⁶). O aquecimento deste material a 800°C levaria à formação de wolastonita (Taylor¹⁷). Este último composto não foi detectado para o sistema de wolastonita (Taylor¹⁷). Por outro lado, identificou-se anortita. Seria então a nova fase um silico-aluminato hidratado. Os dados aproximam-se muito dos da literatura (Taylor¹⁸). A Figura 14, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostra todo o campo recoberto por um material de aspecto gelatinoso avermelhado. A morfologia do material é placóide, com muitas de contorno hexagonal, crescendo em entrelaçamento de ângulo reto, formando tufos ou assentando-se umas sobre as outras. Esta morfologia é característica da gelenita ou silico-aluminato-dicálcico octahidratado, descrito anteriormente.

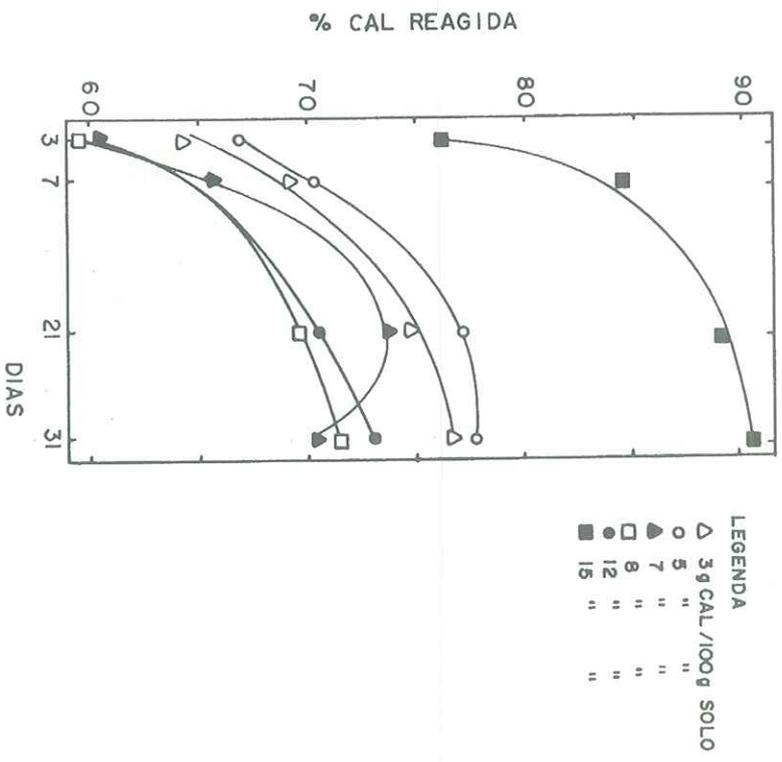


FIGURA 10 - Teor de cal reagida em função do tempo de cura - Terra Roxa.

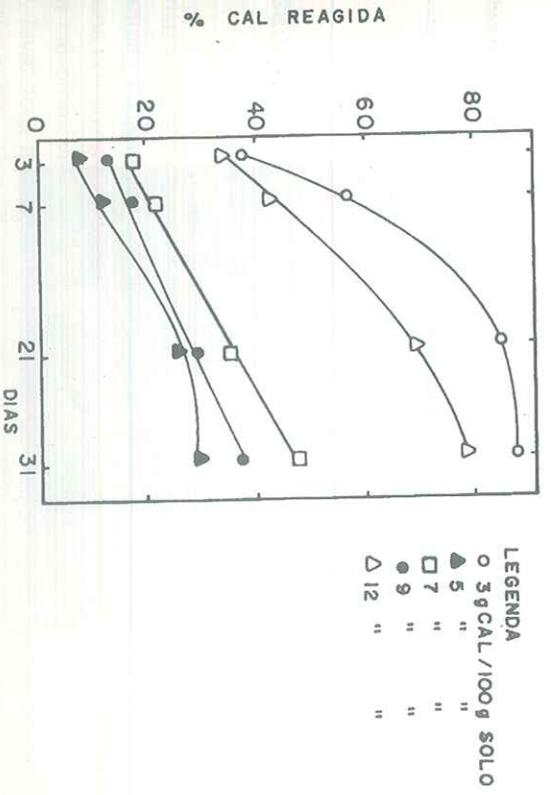


FIGURA 11 - Teor de cal reagida em função do tempo de cura - Solo Arenoso Fino.

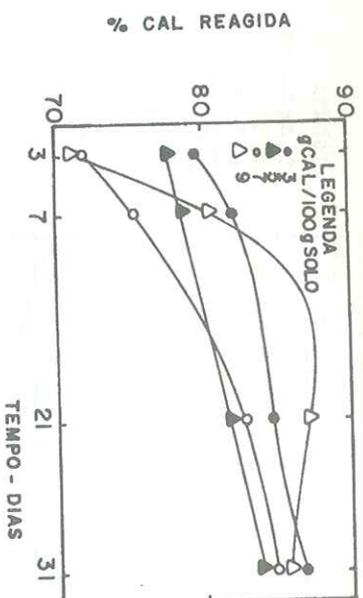


FIGURA 12 – Teor de cal reagida em função do tempo de cura – Solo Saprolítico.

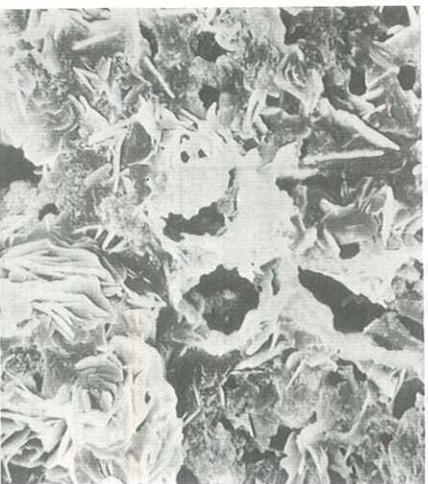


FIGURA 13 – Microscopia eletrônica de varredura do produto da reação entre Terra Roxa e Cal Hidratada – 6.000X.



FIGURA 14 – Microscopia eletrônica de varredura do produto da reação entre Solo Arenoso Fino e Cal Hidratada – 6.000X.

Para o solo saprolítico, aparecem na difratometria de Raios X dois novos picos, com d_{hkl} situados em 7,44 e 3,01 Å. A identificação desta nova fase, que aparece como produto da reação, tornou-se algo difícil, pois estes dados não se aproximam dos dados cristalográficos para a gellanita hidratada ou de um silicato hidratado do grupo das tobermoritas (Turiziani¹⁹). Existe, contudo, uma boa aproximação entre os dados obtidos e os dados da girolita ($2CaO.3SiO_2.2H_2O$) e da xonotlita ($6CaO.6SiO_2.H_2O$). O aquecimento do material do sistema solo saprolítico-cal, a 800°C por 2 horas, – que a princípio poderia fornecer um produto anidro com possibilidades de identificação –, levou à amorfização completa do complexo. Apesar do aparecimento de picos de material cristalino, a microscopia eletrônica de varredura (Figura 15) não mostra qualquer material com morfologia distinta, e o que se nota é o recobrimento total da amostra por um material branco de aspecto aveludado.

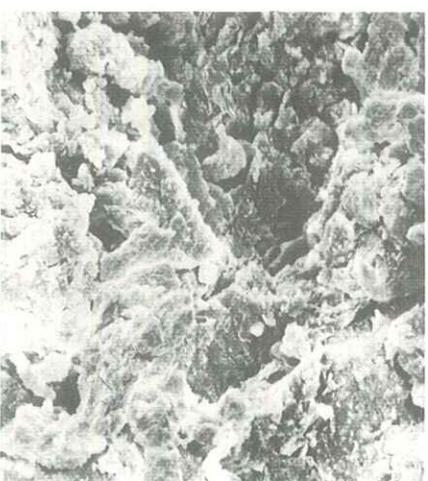


FIGURA 15 – Microscopia eletrônica de varredura do produto da reação entre Solo Saprolítico e Cal Hidratada – 6.000X.

Conclusão

Os dados deste trabalho revelam apoio a dados previamente publicados (Cabrera & Nwakanna¹⁶ e Carvalho²⁰), os quais apontam para o fato de que os argilominerais encontrados nos solos são os responsáveis pela estabilização; o alto pH criado pela adição da cal promove a quebra da estrutura cristalina dos argilominerais em seu contorno, levando à formação de produtos de reações pozolânicas (produtos com características cimentantes), os quais são responsáveis pelo ganho de resistência dos solos tratados com cal.

Agradecimentos

Ao CNPq, pelo suporte financeiro (Proc. 300575/86-6).

BARELLI, N. Chemical and geotechnical study of reactions of tropical soil with hydrated lime. *Ecl. Quim.*, São Paulo, v. 17, p. 25-39, 1992.

■ **ABSTRACT:** There is lack of information about soil-lime treatment, particularly in tropical and subtropical regions, where the weathering is favoured by climate and rain fall conditions. The investigations carried out in Brazil dealt mainly with the results in compressive strenght development but nothing is said about the reactions involved or the products formed. In the present work three tropical soils were selected to react with varying amounts of hydrated calcitic lime with the main purpose of investigating how they react with hydrated calcitic lime and which products are formed.

■ **KEYWORDS:** Soil stabilization; soil-lime reaction; silicates; aluminates; lime; soil.

Referências bibliográficas

1. EADES, J. L., NICHOLS, F. P., GRIM, R. E. *High. Res. Board Bull.*, v. 335, p. 122, 1962.
2. ORSMBY, W. C., KINTER, E. B. *Public Roads*, v. 37, n. 4, p. 136, 1973.
3. PERRÉ, P. *Thèse de Docteur - Ingenieur, Institute National des Sciences Appliquées de Rennes, France, 1977.*
4. CARVALHO, J. B. O. *PhD. Thesis. Department of Civil Engineering, The University of Leeds, England, 1979.*
5. ZOLKOWSKY, J. C. *Publicação Técnica. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1977.*
6. NARDE, J. V. *Publicação Técnica. - Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina, Florianópolis, 1979.*
7. CHAUVEL, A., NOBREGA, M. T. *IV Reunião Aberta da Indústria da Cal, 1980 (Boletim n. 12, p. 122).*
8. LIMA, D. C. *Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1981.*
9. POMBO, L. C. A., KLAMT, E., KUNRATH, I., GIANLUPI, D. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, v. 6, p. 13, 1982.
10. HILT, H. G., DAVIDSON, D. T. *High. Res. Board Bull.*, v. 262, p. 20, 1960.
11. PINTO, S. C. *I Simpósio sobre Equipamentos Rodoviários, Rio de Janeiro, 1965.*
12. WILLOUGHBY, D. R., GROSS, K. A., INGLE, O. G., SILVA, S. R., SPIERS, V. M. *Aust. Road Res. Board Proc.*, v. 4, (part 2), p. 1386, 1968.

13. ASTM. *The Powder Diffraction File. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Philadelphia Pa., 1967.*
14. BARELLI, N. *Ecl. Quim.*, v. 7, p. 22, 1982.
15. BARELLI, N. *Tese de Livre-Docência. Instituto de Química de Araraquara-UNESP, 1988.*
16. CABRERA, J. G., NWAKANMA, C. *Trans. Res. Rec.*, p. 702, 1982.
17. TAYLOR, H. F. W. *J. Chem. Soc.* p. 3.682, 1950.
18. TAYLOR, H. F. W. *La Química de los Cementos. Umno S.A. de Ediciones, Bilbao, Espanha, 1978, (vol. II, Apendice I: Tabla de dados cristalográficos, 432).*
19. TURRIZIANI, R. *La Química de los Cementos. Umno S.A. de Ediciones, Bilbao, Espanha, 1978, cap 6.*
20. CARVALHO, J. B. O. *Proceedings of the 10th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, 1981, Session 12, p. 761.*

Recebido em 15.1.1992.

Aceito em 10.3.1992.