

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE DOSAGEM DO PH E DE THOMPSON PARA A ESTABILIZAÇÃO COM CAL DE DOIS SOLOS TROPICAIS

Alisson Alberto de Lima Medeiros

Matheus Francisco da Silva

Ana Paula Furlan

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo da dosagem de cal para a estabilização de dois solos tropicais do estado de São Paulo. Foram utilizados dois solos argilosos com comportamentos laterítico e não laterítico. Esses solos foram misturados à duas cales dolomíticas (CH-I e CH-III) e submetidos aos métodos de dosagem do pH e de Thompson. Adicionalmente, foram realizados ensaios para a caracterização microscópica e mineralógica dos solos (MEV, EDS e DRX). Dos resultados, foi possível concluir que: (i) os métodos de dosagem não indicaram teores de cal confiáveis que possibilitariam a formação dos compostos cimentantes de forma a garantir o aumento de resistência das misturas, (ii) a utilização desses métodos deve ser adaptada quando aplicadas a solos de regiões tropicais úmidas e (iii) existe a necessidade de mais estudos que objetivem a normalização de um método de dosagem brasileiro de solo-cal para a consolidação da prática.

ABSTRACT

This paper presents a study of lime dosage for stabilizing two tropical soils from the state of São Paulo. For this research, were used two clayey soils with lateritic and nonlateritic behavior. These soils were mixed with two dolomitic limes (CH-I and CH-III) and subjected to pH and Thompson dosing methods. In addition were carried out (SEM, EDS and XRD) tests aiming the microscopic and mineralogical characterization of soils. From results, it was possible to conclude that: (i) the dosage methods did not indicate reliable lime contents that would allow the formation of cementing compounds in order to guarantee the strength gain of mixtures, (ii) the use of these methods should be adapted when applied to soils of humid tropical regions and (iii) there is a need for further studies aiming to standardize a Brazilian soil-lime dosage method to consolidate the practice.

1. INTRODUÇÃO

Melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos locais com adição de cal é uma alternativa prática, sustentável e de baixo custo em obras de pavimentação. No Brasil, de maneira geral, a dosagem do teor de cal a ser incorporado ao solo é feita de modo empírico ou se baseia em experiências bem-sucedidas com solos de classes semelhantes.

Inicialmente, a cal atua nos solos por meio de reações de intercâmbio iônico e floculação/aglomeração. A partir desses mecanismos, a cal pode modificar a granulometria e reduzir a plasticidade do solo original, melhorando a trabalhabilidade e facilitando a compactação. Com tempo e em condições ambientais favoráveis, reações pozolânicas ocorrem, promovendo a cimentação das partículas com consequente aumento da resistência da mistura.

Os métodos de dosagem para a estabilização de solos são geralmente baseados em análises do efeito de teores pré-fixados de cal sobre determinadas características e propriedades do solo (plasticidade, expansão, resistência e durabilidade). Devido às diversas condições ambientais, os critérios de dosagem desenvolvidos para uso com um determinado objetivo e para um determinado tipo de solo não devem ser aplicados para solos que apresentem gênese e/ou propriedades diferentes sem estudos prévios (Little, 1995).

Os Departamentos de Estradas de Rodagem de São Paulo e do Paraná possuem especificações

técnicas de serviços e materiais que regulamentam a construção de bases e sub-bases de pavimentos de solo-cal (DER/PR, 2005; DER/SP, 2006), porém não recomendam um procedimento de dosagem do teor de cal para a estabilização de solos. A falta da consolidação de um método de dosagem de cal no âmbito nacional justifica a necessidade de pesquisas que busquem compreender melhor os fatores influentes no processo de estabilização entre os solos tropicais e o aditivo.

Muito usado no Brasil, o método de dosagem do pH, proposto por Eades e Grim (1966), consiste em adicionar cal suficiente ao solo até que a mistura atinja um pH de 12,4. O meio de pH alcalino solubiliza a sílica e a alumina das superfícies das argilas, deixando-as disponíveis para reagir com o cálcio livre (Ca^{++}) fornecido pela cal. A reação não cessa enquanto houver disponibilidade de Ca^{++} e sílica no solo. Outro método bastante aplicado é o desenvolvido por Thompson (1970). Esse método inicialmente compara a resistência à compressão simples (RCS) do solo natural com a da mistura solo+cal curada. Se o aumento de RCS for maior que 345 kPa, o solo é classificado como reativo à cal, caso o contrário, o solo é classificado como não reativo.

Os métodos de dosagem têm como objetivo indicar a quantidade necessária do aditivo para promover as reações químicas características da estabilização com cal. No entanto, métodos distintos podem resultar em quantidades diferentes de cal. Nesse sentido, é importante destacar o estudo de Behak (2011), que avaliou a estabilização de um solo A-7-6 com adição de 3 e 5% de cal dolomítica para a utilização como base de pavimentos. A dosagem pelo método do pH resultou em um teor ótimo de cal de 4% e pelo método de Thompson, o teor ótimo foi de 3%.

Pode-se dizer que a dificuldade de consenso na determinação da quantidade de cal a ser adicionada ao solo está relacionada com a complexidade das interações e influências inerentes ao processo de estabilização. São diversos os fatores que afetam as reações e, consequentemente, o ganho de resistência da mistura solo-cal. Como observado por diversos autores, a composição química do solo e da cal e a mineralogia da fração argila do solo têm grande influência nas reações que ocorrem no processo de estabilização e no desempenho mecânico da mistura solo-cal (Ormsby e Kinter, 1972; Bell, 1996; Bhattacharja et al., 2003; Kolay et al., 2011).

Para De Carvalho (1988), a grande concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Fe e Al) presente nos solos lateríticos torna a análise das reações solo-cal um processo ainda mais complexo. Não há consenso na literatura sobre como o Fe atua nas reações. A influência da presença de Fe depende de como ocorrem nos solos, assim, se ocorrer recobrindo as superfícies do argilomineral ou como agente cimentante, seu efeito será negativo porque a presença de sesquióxidos nas superfícies do argilomineral inibe as reações entre o cálcio e a sílica. Porém, se o Fe ocorrer como partículas discretas, sua presença não influenciará negativamente.

Castro (1995) afirmou que é possível que óxi-hidróxidos de ferro e matéria orgânica bloqueiem parcial ou totalmente a superfície dos cristais dos argilominerais, ocasionando perda de reatividade à cal. Alcântara et al. (1995) estudaram a estabilização de três tipos de solo com 10% de cal cálcica e constatou que o solo com maior teor de argila, maior porcentagem de Fe_2O_3 e de matéria orgânica apresentou os menores valores de resistência e rigidez nos ensaios mecânicos.

No que se refere ao tipo de cal, Lovato (2004), estudando a estabilização de um solo argiloso laterítico (classe A-6) com uma cal calcítica e outra dolomítica, constatou que a RCS aumentou linearmente para os teores de 3, 4 e 5% de cal, porém as misturas com cal calcítica alcançaram maiores valores de resistência que as misturas com cal dolomítica, devido a maior concentração de óxido de cálcio (CaO) presente nesse tipo de cal.

Na tentativa de entender o efeito do teor de cal nas misturas solo-cal, Eren e Filiz (2009) estabilizaram um solo argiloso com teores crescentes de cal dolomítica. Os resultados do ensaio de compactação na energia normal mostraram que o solo sem adição apresentou umidade ótima (w_{ot}) de 15,0% e massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) de 1,85g/cm³. Já para as misturas solo+cal, os resultados de w_{ot} foram: 18,0%, 18,0%, 19,2% e 19,5%; e os resultados de $\rho_{dm\acute{a}x}$ obtidos foram: 1,69g/cm³, 1,67g/cm³, 1,65g/cm³ e 1,65g/cm³; com adição de 4, 6, 8 e 10% de cal, respectivamente. Os resultados do ensaio de compactação são condizentes com os encontrados na literatura técnica (aumento de w_{ot} e redução de $\rho_{dm\acute{a}x}$), mas, é interessante destacar que apesar da w_{ot} continuar aumentando, houve uma desaceleração na redução de $\rho_{dm\acute{a}x}$, o que pode ser um indício de que a cal em excesso pode prejudicar a resistência das misturas.

Algumas questões ainda não foram respondidas com relação à influência da composição mineralógica na dosagem do teor de cal para a estabilização de solos tropicais. A experiência com solo-cal tem direcionado esse tipo de estabilização para os solos argilosos, mas, mesmo dentro dessa classe podem ocorrer variações importantes de mineralogia que podem atuar positiva ou negativamente na estabilização. Klinsky et al. (2014) estudaram a estabilização de dois solos, A-6 e A-7-5, com diferentes teores de cal CH-I (3, 5, e 7%) e constataram aumento nas propriedades de resistência após a adição de cal. Nesse estudo, o solo A-7-5 apresentou maior ganho de resistência que o solo A-6. Segundo os autores, o solo A-7-5 foi mais reativo à cal por conta da maior superfície de contato dos grãos.

A composição mineralógica dos solos é um fator que não é diretamente tratado nos métodos de dosagem. Medeiros (2017), estudando a estabilização de dois solos coletados de um mesmo perfil, mas em profundidades diferentes, encontrou resultados interessantes nesse sentido. Os sistemas de classificação de solos tradicionais (USCS e AASHTO) enquadraram-nos numa mesma classe (A-7-5 ou MH), contudo, a classificação MCT os distinguiu em LG' e NG'. Essa diferenciação foi muito importante para entender os comportamentos mecânicos particulares das misturas produzidas e, mais uma vez, levantou questões sobre a inadequação da dosagem solo-cal para solos tropicais. Os resultados de Medeiros (2017) mostram que os solos argilosos classificados como não reativos podem ser, sim, melhorados com cal e obter ganhos satisfatórios de resistência, porém necessitam de teores maiores e períodos de cura mais longos devido a sua lenta atividade pozolânica.

A adequação do projeto de estabilização também pode ser discutida focalizando o processo de cura, tanto no que se refere ao tempo quanto às condições do ambiente. Negawo et al. (2017) estudaram a estabilização de um solo argiloso de classificação A-7-5 com 5, 7 e 9% de cal. As amostras foram curadas a uma temperatura de 40°C durante 7 dias. O método do pH apontou o teor de 9% como sendo o teor ótimo de cal para a estabilização desse solo. No entanto, após a realização dos ensaios mecânicos com os demais teores, os autores concluíram que a adição de 7% de cal ao solo já era suficiente para alcançar valores de resistência e rigidez satisfatórios. Segundo Negawo et al. (2017), esse resultado pode ser (i) um reflexo do método

de dosagem, cujo enfoque se baseia puramente em aspectos químicos (pH) e não avalia o ganho de resistência da mistura, ou (ii) a cura acelerada, proporcionada pelo aumento da temperatura, pode ter intensificado e/ou antecipado as reações pozolânicas que levam ao ganho de resistência.

Por essas questões levantadas, esse artigo apresenta um estudo da estabilização de dois solos de naturezas diferentes, usando dois tipos de cal (CH-I e CH-III), dosados a partir dos dois métodos mais aplicados em projetos de estabilização no Brasil (pH e de Thompson) e discute a problemática da dosagem de misturas solo-cal, considerando aspectos mecânicos, químicos e microestruturais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Solos

Dois solos característicos do interior do Estado de São Paulo foram utilizados nessa pesquisa. Os solos foram coletados no km 8 da Rodovia SP-207 (em São Sebastião da Gramma/SP) e preparados de acordo com a norma NBR 6457. Após a execução dos procedimentos de ensaio da metodologia MCT (DER/SP M196-89) foi verificado que um solo apresentava comportamento laterítico (LG') e o outro um comportamento não laterítico (NG'). As propriedades físicas e as classificações dos solos são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físicas e classificação

Norma	Propriedade	Solo 1	Solo 2
ABNT NBR 7181	Passa na #200 (%)	75	78
ABNT NBR 6459	Limite de liquidez (%)	62	53
ABNT NBR 7180	Limite de plasticidade (%)	38	37
ABNT NBR 7180	Índice de plasticidade (%)	24	16
ABNT NBR 6508	Massa específica dos solos (g/cm ³)	2,785	2,909
DER/SP M13-71	Umidade ótima (%)	26,3	21,9
DER/SP M13-71	Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,479	1,591
DER/SP M53-71	Índice de suporte Califórnia (CBR) (%)	17	6
DER/SP M53-71	Expansão (%)	0,28	3,14
Classificação USCS		MH	MH
Classificação da AASHTO		A-7-5	A-7-5
Classificação MCT		LG'	NG'

Os dois solos apresentaram propriedades e comportamento de solos de regiões tropicais úmidas. A grande quantidade de partículas finas e o alto valor do índice de plasticidade (IP) são indicadores de solos de má trabalhabilidade e baixa capacidade de suporte, o que foi apontado pelas classificações USCS e da AASHTO. O solo LG', quando compactado na umidade ótima, apresentou valores de CBR e expansão adequados para ser usado como subleito. Já o solo de comportamento não laterítico (NG') pode ser utilizado apenas como corpo de aterro de rodovias, segundo as especificações brasileiras (DNIT, 2006; DNIT, 2009). Esse tipo de distinção só foi possível após a execução do método de classificação MCT, uma vez que os outros sistemas de classificação (AASHTO e USCS) não levam em consideração características resultantes dos processos de formação dos materiais que influenciam no seu comportamento mecânico.

2.2. Cales

As duas cales dolomíticas utilizadas nessa pesquisa atendem aos requisitos da norma NBR 7175. O teor de óxido de cálcio (CaO) nas cales foram de 40% (cal tipo CH-I) e menor que 15% (cal tipo CH-III). O resultado da composição química das duas cales obtido pela técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização química das cales

Concentração (%)						
Cal	Mg	Al	Si	Ca	O	Total
CH-I	20,8	0,2	0,8	45,4	32,9	100,0
CH-III	23,7	0,0	0,0	43,4	32,9	100,0

Na composição química da cal CH-I são encontrados Mg e Ca, provenientes dos óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO). Ainda foi observada a presença de Al e Si, derivados do óxido de alumínio (Al_2O_3) e da Sílica (SiO_2) que podem estar presentes nesses materiais em pequenas quantidades. Na cal CH-III foram encontrados apenas Mg e Ca.

2.3. Dosagem do teor de cal

Dois métodos de dosagem de solo-cal foram empregados nessa pesquisa: (i) o método de Eades and Grim (1966), ou método do pH, e (ii) o método proposto por Thompson (1970). Esses métodos foram selecionados por serem bastante utilizados em projetos de estabilização no Brasil e por usarem procedimentos de ensaios e critérios distintos para determinar o teor de cal a ser adicionado ao solo.

2.3.1. Método do pH

Para a execução do método, 5 amostras equivalentes a 25 gramas de solo seco (passado na #0,425 mm) foram acondicionadas em frascos. Em seguida, foram adicionadas porcentagens pré-determinadas de cal (2%, 3%, 4%, 5% e 6%) e 100 ml de água destilada. Os frascos foram agitados por 30 segundos a cada 10 minutos durante o período de 1 hora. O pH das amostras foi medido logo em seguida. De acordo com o método, o teor ótimo para a estabilização do solo é a porcentagem de cal da amostra que primeiro atingir um pH de 12,4. Se nenhuma amostra atingir o pH de 12,4 e duas amostras consecutivas apontarem o valor de 12,3; a menor porcentagem que atingir esse valor será o teor ótimo de cal. Caso nenhuma amostra alcance o pH desejável, devem ser testados maiores teores. A dosagem foi realizada de acordo com a norma ASTM D 6272-99. Para isso foi utilizado um medidor de pH portátil da marca KASVI, modelo K39-0014PA, com resolução de pH de 0,1 e temperatura de 0,1°C.

2.3.2. Método de Thompson

Inicialmente, o método compara a resistência à compressão simples (RCS) do solo natural com a da mistura solo-cal curada. Os corpos de prova de solo-cal são compactados na umidade ótima (w_{ot}) e massa específica seca máxima (ρ_{dmax}). A porcentagem de cal incorporada ao solo nessa etapa pode ser a indicada pelo método do pH, caso esse método tenha sido realizado previamente, ou 5% de massa de cal em relação ao solo seco.

Segundo Thompson (1970), a cura pode ser realizada a uma temperatura de aproximadamente $24^\circ C \pm 1^\circ C$ por 28 dias ou $49^\circ C \pm 1^\circ C$ por um período de 2 dias. Visto que o aumento da temperatura acelera as reações, o autor considera essas duas condições de cura equivalentes. Após a cura são determinados os valores de RCS para observar a reatividade do solo à cal. Se o aumento de RCS for maior que 345 kPa, o solo é classificado como reativo, caso o

contrário, o solo é classificado como não reativo. Para o caso de solo reativo, a determinação do teor ótimo de cal é baseada em uma análise dos resultados de RCS para diferentes teores de cal no solo. Para os solos classificados como não reativos, o teor ótimo de cal da mistura é determinado pela avaliação do efeito de diferentes teores de cal no índice de plasticidade (IP) do solo.

Para não haver influência dos resultados do método do pH, na primeira etapa foi adotado o teor de 5% de cal para ser adicionado ao solo. O ensaio de compactação Proctor foi realizado na energia normal (DER/SP M13-71) nas misturas de solo + 5% de cal, para a obtenção dos parâmetros de compactação (w_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$). Para avaliar as condições equivalentes de cura propostas por Thompson (1970), um estudo prévio foi realizado a fim de comparar a RCS de misturas submetidas à cura convencional (25°C por 28 dias) com a RCS de misturas submetidas à cura acelerada (50°C por 2 dias). Foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura de solo-cal. Os resultados da média de RCS em kPa, do desvio padrão (σ) e do coeficiente de variação (cv) para cada mistura são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: RCS 25°C-28D/50°C-2D

Condição de cura	LG'						NG'					
	CH-I			CH-III			CH-I			CH-III		
	RCS	σ	cv	RCS	σ	cv	RCS	σ	cv	RCS	σ	cv
25°C - 28 dias (a)	546	4	0,01	491	10	0,02	373	8	0,02	247	24	0,10
50°C - 2 dias (b)	493	8	0,02	360	12	0,03	344	5	0,01	277	16	0,06
T_{RCS}	(a)/(b)			1,11			1,36			1,08		
										0,89		

Observa-se dos resultados (Tabela 3) que, no geral, a taxa de RCS (T_{RCS}) é próxima de 1, exceto para a mistura LG'+CH-III onde a RCS apresentada pelo processo de cura convencional foi 35% maior que a RCS a cura acelerada. Esses resultados foram similares aos encontrados por Al-Mukhtar et al. (2010a) e (2010b). Visto isso, os valores de RCS após 2 dias à 50°C foram considerados compatíveis com os valores de RCS após 28 dias a uma temperatura de 25°C. Portanto, para o andamento dessa pesquisa foi adotado o processo de cura acelerada. De modo que, foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura. Os corpos de prova foram compactados de maneira estática em uma prensa hidráulica, embalados em filme plástico e curados em uma estufa ventilada a 50°C por 2 dias antes do ensaio de RCS. O ensaio de RCS foi realizado sob deformação controlada a uma taxa de deformação de 1,27 mm/min em uma prensa com capacidade de carga de 50 kN.

2.4. Análises microestruturais

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas a fim de observar os efeitos que a adição de cal provoca na microestrutura do solo. Adicionalmente foram realizados ensaios de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) a fim de qualificar os elementos químicos que compõem os solos para um melhor entendimento dos resultados dos métodos de dosagem. Para as análises de MEV e EDS, as amostras foram recobertas com uma camada de carbono (processo de evaporação) e o equipamento utilizado foi o FEI Inspect F-50. A técnica de difração de raios X (DRX) foi empregada para a identificação qualitativa dos argilominerais que constituem o solo. Para o DRX, as amostras foram peneiradas na peneira de abertura 0,074 mm e ensaiadas na condição orientada normal, o campo de varredura adotado foi de 3° a 50° e a velocidade de varredura de 1°/min. Foi utilizado o difratômetro

Rigaku Rotaflex, modelo RU200B.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Dosagem do teor de cal

3.1.1. Método do pH

Os resultados do método do pH indicaram que: (i) para a estabilização do solo LG' foi necessário 7% de cal CH-I e 3% de cal CH-III, (ii) para a estabilização do solo NG' foi necessário 5% de cal CH-I e 3% de cal CH-III. As misturas com cal CH-I necessitaram de maiores teores de cal que as misturas com cal CH-III para atingir o pH de 12,4. O resultado obtido pelo método pode ser justificado pela maior concentração de hidróxidos presentes na cal CH-III, como demonstrado no resultado da composição química das cales. Como o pH de uma solução é medido pela concentração de H^+ livre, a concentração de Ca^{++} não interfere no resultado, pois o equipamento de medição não é sensível a esse elemento. Portanto o método mostrou-se limitado em não diferenciar cales de teores diferentes de CaO. No que diz respeito a solos tropicais, o método do pH pode não conduzir a teores confiáveis de cal para a estabilização (Hardy, 1970; Silva et al., 2016). Como o método é fundamentado somente na estabilização do pH, é aconselhável que ensaios complementares de resistência das misturas sejam realizados.

3.1.2. Método de Thompson

Os parâmetros de compactação das misturas são mostrados na Tabela 4. Os resultados mostram uma tendência de aumento na w_{ot} e diminuição da $\rho_{dm\acute{a}x}$. O aumento na w_{ot} ocorre devido às reações de floculação e aglomeração que acontecem assim que a cal é misturada ao solo. Logo após a adição de cal o material passa a se comportar como um solo granular. As partículas se aglutinam formando partículas maiores e com isso aumentam o número de vazios, necessitando assim de mais água para atingir a umidade ótima.

Tabela 4: Parâmetros de compactação usados no método de dosagem de Thompson

Mistura	w_{ot} [%]	$\rho_{dm\acute{a}x}$ [g/cm ³]	Mistura	w_{ot} [%]	$\rho_{dm\acute{a}x}$ [g/cm ³]
LG'	26,3	1,479	NG'	21,9	1,591
LG' + 5% CH-I	28,0	1,433	NG' + 5% CH-I	29,2	1,402
LG' + 5% CH-III	27,7	1,406	NG' + 5% CH-III	28,1	1,405

Com os parâmetros de compactação conhecidos, os corpos de prova foram moldados, levados para cura (2 dias a 50°C) e ensaiados à RCS. Os corpos de prova de solo sem adição de cal não passaram pelo processo de cura. Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos ensaios de RCS. Observa-se que nenhuma das misturas de solo+cal apresentou um aumento de RCS maior que 345kPa em relação ao solo sem adição de cal. No geral, as misturas apresentaram valores de RCS menores que o solo sem adição de cal. Somente a mistura LG'+5%CH-I mostrou um aumento de resistência de 118 kPa, equivalente a 31% em relação ao solo sem adição de cal. As misturas com cal CH-I apresentaram maiores valores de RCS após a cura. Esses resultados são compatíveis com os de Lovato (2004) e Negawo et al. (2011) e podem ser atribuídos ao maior teor de CaO presente nesse tipo de cal.

Tabela 5: Avaliação da RCS com adição de cal

Teor de cal	LG' [RCS (kPa)]	NG' [RCS (kPa)]
-------------	-----------------	-----------------

(%)	CH-I	CH-III	CH-I	CH-III
0		375		612
5	493	344	360	277

De acordo com Thompson (1970), os solos utilizados nessa pesquisa são classificados como solos não reativos à cal. Portanto, para a segunda etapa do método, foi avaliado o efeito de diferentes teores de cal no índice de plasticidade dos solos. Os ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez das misturas solo+cal foram realizados de acordo com as normas NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente, 1 hora após o solo ter sido misturado à cal. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Avaliação do IP com adição de cal

Teor de cal	LG' (IP)		NG' (IP)	
	CH-I	CH-III	CH-I	CH-III
0%		24		16
2%	13	11	NP	NP
4%	NP	NP	-	-

As misturas de solo NG' + 2% de cal apresentaram comportamento não plástico para ambas as cales. Portanto, segundo o método de Thompson, o teor de cal para a estabilização desse solo é 2%. Para o solo LG', com a adição de 2% de cal CH-I houve uma redução do índice de plasticidade de 46% em relação ao solo LG' sem adição de cal. Quando o solo LG' foi misturado à cal CH-III essa redução foi de 55%. Com 4% de cal as misturas com solo LG' não apresentaram limite de plasticidade. Foi observado que o tipo de cal não teve influência significativa nos índices físicos dos solos e o teor apontado pelo método foi o mesmo para as duas cales. A Tabela 7 apresenta os teores de cal obtidos pelos métodos (pH e de Thompson).

Tabela 7: Teores de cal segundo os métodos de dosagem aplicados

Solo		Método de dosagem	
		pH	Thompson
LG'	CH-I	7%	4%
	CH-III	3%	4%
NG'	CH-I	5%	2%
	CH-III	3%	2%

Observa-se da Tabela 7 que os teores apontados pelos métodos não convergiram, assim como observado em Behak (2011). Isso se deve ao fato de que os dois métodos selecionados usam procedimentos e critérios distintos para a dosagem de cal. O método de dosagem do pH apresentou maior sensibilidade com relação à cal utilizada, porém o resultado não foi consistente com a literatura, ou com as indicações de projeto. Já o método de Thompson não apontou diferenças entre cales e sim nas características dos solos.

3.2. Análises microestruturais

3.2.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 1 mostra o solo LG' sem adição de cal e as misturas LG'+5%CH-I e LG'+5%CH-III após dois dias de cura. A Figura 2 mostra o solo NG' sem adição de cal e as misturas

NG'+5%CH-I e NG'+5%CH-III após dois dias de cura. Todas as imagens foram feitas com aumentos de 1000x, a fim de identificar mudanças na matriz do material após a adição de cal.

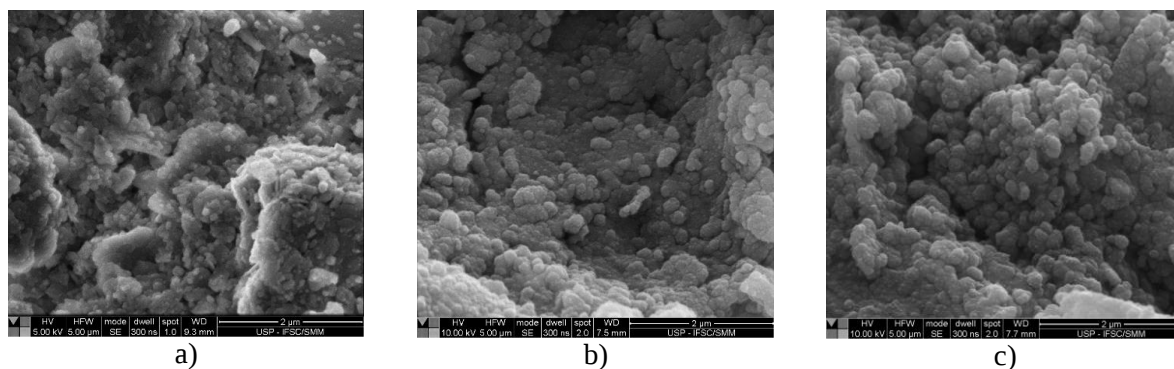


Figura 1: Imagens MEV: a) LG', b) LG' + 5%CH-I e c) LG' + 5%CH-III

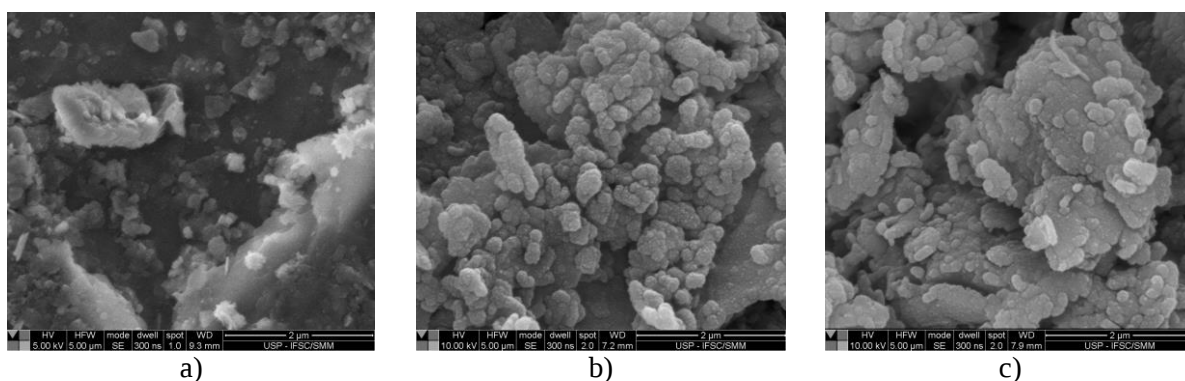


Figura 2: Imagens MEV: a) NG', b) NG' + 5%CH-I e c) NG' + 5%CH-III

Analisando as imagens, observa-se que na Figura 1a (solo LG' sem adição de cal) os grãos individuais de argila não são identificados facilmente. Os grãos aparecem aglutinados, formando grandes flocos que deixam a microtextura com aspecto de pipoca. Segundo Nogami e Vilibor (1995), quanto menos laterizado for o solo, mais facilmente são identificados os grãos individuais dos argilominerais. É possível observar com mais facilidade os grãos individuais de argila na Figura 2a, que apresenta um solo de comportamento não laterítico sem adição de cal (NG'). Observa-se uma mudança na matriz de ambos os solos após a adição de cal, que agora se apresentam de forma granular com grãos mais arredondados. Essa mudança pode ser atribuída às reações de floculação e aglomeração. Nesse estágio ainda não foi possível observar nenhuma indicação de formação dos compostos cimentantes. É provável que para esses solos as reações aconteçam de forma mais lenta ou para maiores teores de cal. Isso explica a diminuição da RCS nas amostras após a adição de cal.

3.2.2. Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

O resultado do EDS dos solos é apresentado na Figura 3. Os elementos químicos encontrados nos dois materiais foram: Alumínio (Al), Ferro (Fe), Oxigênio (O), Silício (Si) e Titânio (Ti). A porção analisada do solo NG' apresentou uma concentração maior de Fe que o solo LG'. A concentração de Fe presente no solo NG' pode estar recobrindo as partículas de argila e dificultando a ocorrência das reações com a cal, o que explicaria a redução do valor de RCS para esse solo (Alcântara, 1995). Portanto, seriam necessários maiores teores de cal e/ou período de cura para o aumento de RCS do material. Os elementos Al e Si foram encontrados em maior quantidade na porção de solo LG', o que indica uma maior capacidade de formação

de silicatos hidratados de cálcio (CSH) e aluminatos hidratados de cálcio (CAH), compostos responsáveis pelo aumento de resistência das misturas solo-cal.

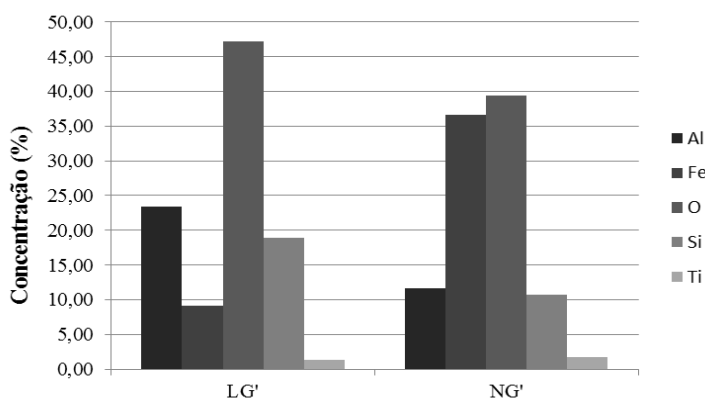


Figura 3: Composição química (LG' e NG')

3.2.3. Difratometria de raios-X (DRX)

A técnica de DRX foi realizada nos solos sem adição de cal com o objetivo de identificar os minerais presentes na fração argila. Os resultados são mostrados nos difratogramas da Figura 4. Os resultados de DRX do solo LG' (Figura 4a) indicaram a presença dos seguintes minerais: caulinita (C), hilebrandita (H) e quartzo (Q) como os minerais constituintes da porção analisada. Na porção de solo NG' (Figura 4b) foram identificados os minerais: caulinita (C), hilebrandite (H), quartzo (Q) e kilchoanita (K). Característico de solos lateríticos e podendo também estar presente em solos de comportamento não laterítico, o argilomineral encontrado em maior quantidade nos dois solos foi a caulinita. Por ser um argilomineral muito estável e de baixa atividade coloidal, solos ricos em caulinita podem apresentar uma reatividade lenta a cal. Desta forma, tem-se mais um indício de que o tempo de cura foi insuficiente para que as misturas apresentassem aumentos significativos de RCS.

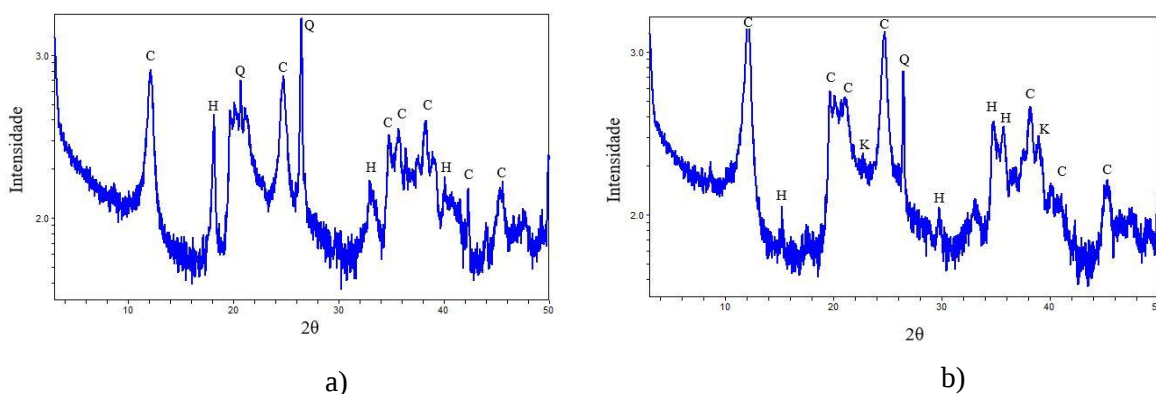


Figura 4: Difratomogramas dos solos: a) LG' e b) NG'

4. CONCLUSÕES

Esse artigo propôs um estudo sobre a dosagem solo-cal focando aspectos mecânicos, químicos e microestruturais. Com base nos resultados, pode-se concluir que:

- Os métodos do pH e de Thompson sem adaptações podem não ser adequados para a dosagem de solos tropicais, vale uma melhor avaliação e adaptação dos parâmetros;

- Os teores de cal indicados pelos dois métodos de dosagem são baixos e, considerando a alta plasticidade dos solos estudados, podem não ser suficientes para a formação de compostos cimentantes;
- A adição de 5% de cal não promoveu o ganho mínimo de RCS (345 kPa) nos solos. Sendo, para fins de dosagem, considerados solos não reativos (método de Thompson);
- Na dosagem pelo método de Thompson, a cal CH-I é mais eficiente que a cal CH-III, contrariamente ao observado no método do pH;
- As análises microestruturais ajudam a avaliar e visualizar as mudanças provocadas pela cal no solo e, com isso, interpretar o tipo de reações ocorridas. Mostrando-se, assim, necessárias em projetos de estabilização de solos.

Por fim, ainda que no Brasil a estabilização de solos com cal seja uma prática bastante conhecida e muito praticada desde os anos 1980, não há um protocolo brasileiro normalizado para a dosagem do teor ótimo de cal. A ausência de normas e especificações dificulta a tomada de decisão quanto à seleção de materiais e, desta forma, aumenta a incerteza e a insegurança em investimentos, porque, mesmo com a experiência acumulada, ainda não foram aferidas a viabilidade técnica e as vantagens econômicas e ambientais das misturas solo-cal.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a) *NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984b) *NBR 6508 – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984c) *NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984d) *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1986) *NBR 6457 – Amostras de solo: Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2003) *NBR 7175 – Cal Hidratada para Argamassas – Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Alcântara, M. A. M.; D. C. Lima; B. S. Bueno e L. M. Costa (1995) Considerações sobre o Uso de Aditivos Químicos em Regiões Tropicais. *Anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPV, Cuiabá, p. 99-110.
- Al-Mukhtar, M.; A. Lasledj e J. F. Alcover (2010a) Behavior and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 20° C. *Applied clay science*, v. 50, n.2, p. 191-198.
- Al-Mukhtar, M.; A. Lasledj e J. F. Alcover (2010b) Behavior and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 50° C. *Applied clay science*, v. 50, n.2, p. 199-203.
- ASTM (2006) *D6276-99a – Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- Behak, L. (2011) Performance of Full-Scale Test Section of Low-Volume Road with Reinforcing Base Layer of Soil-Lime. *Transportation Research Record*, v. 2204, p. 158-164.
- Bell, F. G. (1996) Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, v. 42, n. 4, p. 223-237.
- Bhattacharja, S.; J. I. Bhatta e H. A. Todres (2003) Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature. *PCA R&D Serial*, n. 2066, p. 60.
- Castro, F. J. C. de 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 – Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- De Carvalho, J. B. Q. (1988) Propriedades e comportamentos de solos lateríticos estabilizados com cal. 23ª

- Reunião Anual de Pavimentação*, ABPV, Florianópolis, v. 1, p.690-706.
- DER/PR (2005) *ES-P 14/05 – Pavimentação: Solo-cal-cimento*. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, Curitiba.
- DER/SP (1971a) *M13-71 – Ensaio de Compactação de Solos*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- DER/SP (1971b) *M53-71 – Índice de Suporte Califórnia (CBR)*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- DER/SP (1989) *M196-89 – Classificação de Solos Tropicais Segundo a Metodologia MCT*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- DER/SP (2006) *ET-DE-P00/005 – Sub-base ou base de solo-cal*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, São Paulo.
- DNIT (2006). *Manual de Pavimentação*. (3ª ed.). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2009) *108/2009-ES: Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviços*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Eades, J. L. e R. E. Grim (1966) A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization. *Highway Research Record*, n. 139, p. 61-72.
- Eren, Ş. e M. Filiz (2009) Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods to the Consolid System Used as an Alternative Admixture Matter in Isparta Daridere Material. *Construction and Building Materials*. v. 23, p. 2473-2480.
- Hardy, J. R. (1970) *Factors Influencing the Lime Reactivity of Tropically and Subtropically Weathered Soils* (PhD Dissertation), University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.
- Klinsky, L. M. G.; V. C. Faria e A. D. Leal (2014) Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada. *Relatório de Pesquisa (CCR-ND-SCH-RTF-SET)* – Agência Nacional de Transportes Terrestres, Brasília.
- Kolay, P. K.; M. R. Aminur; S. N. L. Taib e M. I. S. Mohd Zain (2011) Stabilization of Tropical Peat Soil from Sarawak with Different Stabilizing Agents. *Geotechnical and Geological Engineering*. v. 29, p. 1135-1141.
- Little, D. N. (1995) *Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. Lime Association of Texas, Austin, USA.
- Lovato, R. S. (2004) *Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação*. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.
- Medeiros, A. A. L. (2017) *Contribuição ao Estudo da Dosagem de Cal para a Estabilização de um Solo de Comportamento Laterítico e um Não Laterítico* (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Negawo, W. J.; G. Di Emidio; A. Bezuijen; R. D. Verastegui Flores e B. François (2017) Lime-Stabilisation of High Plasticity Swelling Clay from Ethiopia. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, p 1-11.
- Nogami, J. S. e D. F. Villibor (1995) *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Editora Vilibor, São Paulo.
- Ormsby, W. C. e E. B. Kinter (1972) Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strength Development in Mixtures with Two Clay Minerals. *Report (FHWA M-0051)* – Federal Highway Administration, Washington D.C., USA.
- Silva, M. F.; A. A. L. Medeiros; E. P. Borelli e A. P. Furlan (2016) Comparação do Comportamento Mecânico de Misturas Solo-Cal em Relação ao Critério de Dosagem do Aditivo. *Anais do 30º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 1, p. 74-84.
- Thompson, M. R. (1970) Suggested Method of Mixture Design Procedure for Lime-Treated Soils. (*Special Technical Publication 479*) – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.