

INFLUÊNCIA DOS MECANISMOS DE REAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DE DOIS SOLOS TROPICAIS MELHORADOS COM CIMENTO E CAL

Influence of reaction mechanisms in the physical and chemical properties of two tropical soils modified with cement and lime

Fernando Henrique Martins Portelinha*

Dario Cardoso de Lima**

Maurício Paulo Ferreira Fontes***

Carlos Alexandre Braz de Carvalho****

Rafaela Sena Stehling*****

RESUMO – O artigo consiste na avaliação do emprego de baixos teores de cal e cimento, na modalidade de solos modificados, nas alterações das propriedades físicas e químicas de dois solos tropicais, enfatizando a influência dos mecanismos de reação a curto prazo. Para tal, ensaios de caracterização geotécnica de limites de liquidez, plasticidade e análises de granulometria foram realizados em amostras de solos modificados com 1%, 2% e 3% de cal e cimento, representando as características físicas dos solos. A caracterização química foi baseada nas determinações do pH, CTC e concentração de cátions de cálcio. Ainda, se analisou a influência do tempo decorrido entre mistura e realização dos ensaios. De modo a avaliar a significância da influência do tempo na variação dos valores do IP e frações granulométricas, utilizou-se de análises estatísticas de variância e testes de médias. Resultados mostraram aumentos nos valores de pH, CTC e íons cálcio com o incremento dos agentes modificadores. Maiores alterações nos parâmetros físicos e químicos foram observados nas misturas do solo laterítico do que com o solo saprolítico. De modo geral, as propriedades físicas tiveram maiores alterações com cimento, inclusive considerando o efeito imediato nas propriedades analisadas. Não foi observado tempos limites para o uso de cal. Já o cimento apresentou melhorias mais significativas em maiores tempos entre mistura e ensaios, enfatizando as reações de hidratação e cimentação como dominantes.

ABSTRACT – This paper intends to evaluate the influence of low contents of lime and cement, in soil modification category, on chemical and physical properties of two tropical soils, emphasizing reaction mechanism influences in the short term. For these purposes, geotechnical index properties of liquid limit, plastic limit and grain size distribution were carried out in samples of mixtures of soils and 1%, 2% and 3% of lime and cement, representing physical properties of soils. Chemical characterization was based on pH, CEC, and concentration of calcium. Additionally, the effect of elapsed time between mixture and tests was evaluated. Variance statistical analyses and test of means were performed in order to verify the significance of the variable time on the IP and grain size distributions. Results showed increases on chemical parameters pH, CEC, and ions of calcium with increasing of the stabilizers contents. Alterations on physical and chemical parameters were higher in mixtures of the lateritic soil than in mixtures of the saprolitic soil. Physical properties showed higher alterations with cement, even when taking into account the instantaneous effect on

* Doutorando em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, E-mail: fernando@sc.usp.br

** Prof. Titular, Depto. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, E-mail: declima@ufv.br

*** Prof. Titular, Depto. de Solos, Universidade Federal de Viçosa, E-mail: mpfontes@ufv.br

**** Prof. Associado, Depto. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, E-mail: cabraz@ufv.br

***** Bolsista de IC, PROBIC FAPEMIG/UFV, Depto. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

these properties. The use of lime did not show that there is a best elapsed time between mixture and testing. On the other hand, cement had significant improvements with longer elapsed time, emphasizing hydration and cementation reactions as the most effective.

PALAVRAS CHAVE – Estabilização química, mecanismos de reação, solos modificados.

1 – INTRODUÇÃO

Considerando a realidade técnica e o estado atual da malha viária brasileira, infere-se que há um campo considerável para pesquisas relativas ao emprego de estabilizantes químicos que possam produzir boas misturas para uso como camadas do pavimento rodoviário, do ponto de vista técnico e econômico. Com o uso de baixos teores de cal hidratada e cimento Portland, na modalidade de solos melhorados, em acordo com a terminologia do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes do Brasil (DNIT, 2006), pode-se obter materiais com grande potencial para emprego como camadas de melhoria do subleito, reforço, sub-base e, mesmo, base de pavimentos. Outro aspecto relevante é que razões de natureza econômica de mercado podem, temporalmente, definir o emprego de um ou de outro desses estabilizantes em obras rodoviárias.

As soluções para a estabilização química de solos são bastante discutidas na literatura (Ingles e Metcalf, 1973; Rico e Del Castillo, 1977; Osula, 1991; Ferraz, 1994; Alcântara, 1995; Bell, 1996; Lima *et al.*, 2003; Cristelo e Jalali, 2004; Osinubi, 2006; Trindade, 2006). Mas, nos últimos anos, tem havido uma crescente preocupação em buscar estabelecer princípios teóricos que possam explicar os mecanismos de atuação de cada um dos agentes estabilizantes disponíveis no mercado, particularmente no caso da estabilização química dos solos de clima tropical (Osula, 1996; Osinubi, 2006; Trindade, 2006).

Resultados de trabalhos que mostram a eficiência do cimento e da cal na estabilização de solos arenosos e argilosos têm sido relatados na literatura (Herrin e Mitchell, 1961; Ingles e Metcalf, 1973; TRB, 1976; Aiban, 1994; Bhattacharja *et al.*, 2003; Cristelo e Jalali, 2004). Contudo, poucos estudos têm sido desenvolvidos no campo da modificação de solos tropicais no Brasil e ao nível internacional, podendo-se referir, respectivamente, aos trabalhos de Pinto (1964), em que se apresentam resultados de pesquisa realizada com um solo A-7-5 estabilizado com cimento e cal, de Osula (1996), em que se aborda a influência da adição de cimento e cal nas propriedades índices de caracterização geotécnica de um solo laterítico. Cabe salientar que a modalidade de solo modificado (ou melhorado) quimicamente é classificado como misturas com baixos teores de estabilizantes - até 4% de acordo com o DNIT (2006) – enquanto valores acima destes são classificados como solos estabilizados quimicamente.

Os solos de clima tropical costumam apresentar comportamentos diferenciados daqueles formados em regiões temperadas. Em ambientes tropicais, as condições de intemperismo conduzem à formação de materiais cuja composição mineralógica é basicamente o argilomineral caulinita (haloisita), óxidos-hidróxidos de Fe e Al, e quartzo, em maior ou menor proporção, distribuídos ao longo de suas frações granulométricas. Tais características condicionam as diferentes reações físico-químicas, quando comparadas às que ocorrem nos solos de clima temperado, respondendo diferentemente a estabilização com o uso de cal e cimento. Segundo Attoh-Okine (1995), as características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos.

Outro aspecto de grande interesse no emprego de aditivos químicos em estradas como agentes de cimentação ou aglomerantes é a análise da influência do tempo decorrido entre mistura e exe-

cução do produto final (camada do pavimento acabada), haja vista o conjunto de limitações práticas de execução das misturas no campo (Sant'Ana, 2003). Ingles e Metcalf (1973) relatam a perda de resistência de dois solos estabilizados com o teor de 10% de cimento e cal, devido o retardamento no processo de compactação na energia normal de compactação.

Quanto aos mecanismos que regem a estabilização solo-cal, informa-se que as reações se iniciam com a dissociação da cal na presença de água na forma de íons Ca^{2+} e OH^- , ocasionando elevação do pH do solo. O excesso dos íons Ca^{2+} provoca a expulsão dos cátions presentes nos sítios de troca, ou são adsorvidas pelo solo se houver ânions disponíveis na superfície da partícula (TRB, 1976; Osula, 1996). As reações de efeito imediato são inicialmente correlacionadas com propriedades físicas dos solos, especialmente, com os limites de Atterberg e a granulometria (Lima *et al.*, 2003). Alguns fenômenos que podem originar esse efeito no processo da interação da cal com um solo fino são: reações de troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal, reações pozolânicas e cimentação.

Hilt e Davidson (1960) argumentam que o aumento do pH do sistema resulta num acréscimo da sua capacidade de troca catiônica. Esses autores, ainda, relatam que mudanças na granulometria e na plasticidade em sistemas solo-cal somente ocorrem acima de certo teor de cal, denominado ponto de fixação da cal (LFP - *lime fixation point*), sendo que para teores de cal acima do mesmo a cal continua na forma molecular e é utilizada na cimentação. Segundo os autores, a fixação da cal está relacionada com a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Conforme Ingles e Metcalf (1973), a adição de pequenos teores de cal ao solo, até aproximadamente 2%, são suficientes para promover a completa substituição dos cátions na superfície da argila, mas, ainda insuficientes para desencadear as reações pozolânicas, que são mecanismos de cimentação entre as partículas do solo.

O fenômeno de floculação pode ser resultado da troca catiônica ou devido ao excesso de íons cálcio adsorvidos na superfície das partículas de argila, causando uma queda do potencial zeta ou do poder de repulsão (O'Flaherty, 1979). Há uma aglomeração causada pela atração das partículas ainda carregadas negativamente com as carregadas positivamente afetadas pela troca catiônica.

Bell e Coulthard (1990) argumentam que todos os tipos de minerais de argila reagem com a cal. No entanto, o fenômeno de troca catiônica não faz muita diferença em solos cauliniticos, sendo, porém, significativo em solos montmoriloníticos. Por outro lado, Osula (1996) relata um imediato melhoramento da plasticidade de um solo laterítico tratado com baixos teores de cal.

Quanto ao cimento, o efeito da sua adição aos solos pode ser visto de duas formas distintas, conforme se refira aos solos granulares ou aos solos coesivos. Nos primeiros, o aditivo destina-se, principalmente, a criar ligações nos contatos intergranulares, de modo a garantir resistência mecânica mais efetiva do material às solicitações externas, por aumento da parcela resistente relativa à coesão. No caso dos solos finos, os grãos de cimento comportam-se como núcleos, aos quais aderem pequeníssimas partículas que os rodeiam, formando regiões de materiais floculados que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação. Com relação aos mecanismos de reação de misturas solo-cimento, pode-se referir, também, o trabalho de Herzog e Mitchell (1963), onde se considera a influência de teores de cal livre no desempenho mecânico da mistura argila caulinitica-cimento. O hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do clínquer do cimento Portland, tem sobre os solos argilosos um efeito rápido e bem definido, constatado pelas modificações que ocorrem nos solos estabilizados com o uso da cal. Essa melhoria ocasionada pode ser justificada pela ocorrência de fenômenos de troca catiônica, carbonatação, formação de cristais de hidróxido de cálcio e/ou floculação.

Com base nestes conceitos, este trabalho direciona-se à caracterização física e química em laboratório de solos residuais de gnaiss da Zona da Mata Norte de Minas Gerais melhorados com cimento e cal. Analisa-se a eficiência desses estabilizantes na melhoria da trabalhabilidade dos solos, sob o prisma de mecanismos de reação, através dos resultados de análises químicas e de ensaios geotécnicos de caracterização. Justifica-se a necessidade de se desenvolver o presente estudo

pelo fato de que solos melhorados com cimento e cal podem ser considerados materiais com grande potencial para emprego em pavimentação rodoviária, no Brasil. O entendimento dos mecanismos de reação baseados na relação entre parâmetros físicos e parâmetros químicos desse tipo de mistura proporciona embasamento teórico para aplicação e dosagem das misturas.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Materiais

O trabalho foi realizado com dois solos residuais de gnaiss, sendo um solo residual maduro (solo laterizado), pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, aqui denominado solo 1, e um solo residual jovem (solo saprolítico) oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaiss do Pré-Cambriano, que apresenta coloração acinzentada, aqui denominado solo 2. Esses materiais representam solos característicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, em especial da microrregião de Viçosa, além de ser muito encontrados em outros pontos da Região Sudeste do país. Na Fig. 1 apresentam-se fotografias dos perfis onde ambos os solos foram extraídos.

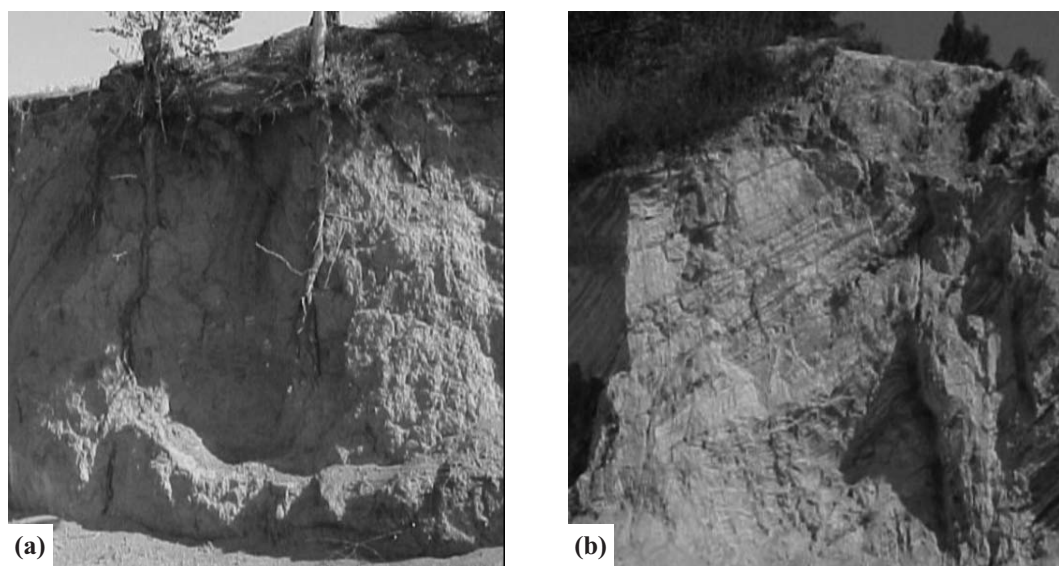


Fig. 1 – Fotografias dos perfis de extração dos solos (a) 1 e (b) 2.

O solo 1 (Fig. 1a) apresenta evolução pedológica avançada e é de ocorrência nas encostas mais suavizadas com horizonte B latossólico de tonalidade amarelada, com textura argilo-areno-siltosa. Na fração argila desse solo predominam os minerais caulinita e goethita, embora sejam encontrados também traços de gibsita, como se ilustra na Fig. 3. Este tipo de solo abrange uma área significativa do território brasileiro, em especial da Região Sudeste.

O solo 2 (Fig. 1b), saprolítico, é essencialmente quartzoso, com horizonte C profundo. É um solo residual jovem oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaiss do Pré-Cambriano, que apresenta coloração acinzentada, com textura areno-silto-argilosa. Conforme se apresenta na Fig. 2, a sua fração areia é constituída, basicamente, de quartzo, e pseudomorfos de caulinita. Na sua fração argila, predomina a caulinita, com traços de goethita e mica. Esse material é comumente

encontrado no Complexo Cristalino Brasileiro. Apresenta, como particularidade de interesse, uma composição granulométrica que se enquadra na faixa recomendada para misturas densas (“n” no intervalo de 0,4 a 0,6) pela equação de Fuller-Talbot. Refere-se, também, que este material enquadra-se nas exigências granulométricas da Norma NBR 12253 (ABNT, 1992), para a dosagem de camadas de base solo-cimento de pavimentos rodoviários.

No Quadro 1, encontram-se parâmetros geotécnicos e classificações geotécnicas de ambos o solos, segundo os Sistemas TRB (*Transportation Research Board*), USC (*Unified Soil Classification*) e a Metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical), preconizada por Nogami e Villibor (1995). Nas Figs. 2 e 3, apresentam-se, respectivamente, as curvas de distribuição granulométrica e a constituição mineralógica dos solos 1 e 2. No Quadro 2 são apresentadas as propriedades químicas dos solos consideradas influentes no processo de estabilização química, na modalidade de solos melhorados.

Os estabilizantes químicos utilizados foram produtos comerciais, englobando um cimento Portland do tipo CPII-E-32 e uma cal hidratada do tipo CH-III.

Quadro 1 – Parâmetros geotécnicos e classificações TRB, USC e MCT dos solos.

Propriedades	Solo 1	Solo 2
w_L (%)	69,5	25
w_P (%)	40,9	16
IP (%)	28,6	9
γ_s^* (kN/m ³)	27,25	25,3
Classificação TRB	A-7-5 (20)	A-2-4 (0)
Classificação USC	CH	SC
Classificação MCT	LG'	NA'

* γ_s – peso específico dos grãos

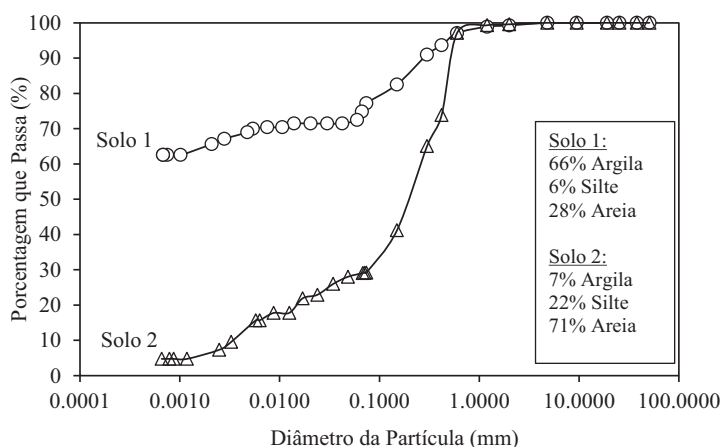


Fig. 2 – Curvas de distribuição granulométrica para os solos 1 e 2 (ABNT, 1984a).

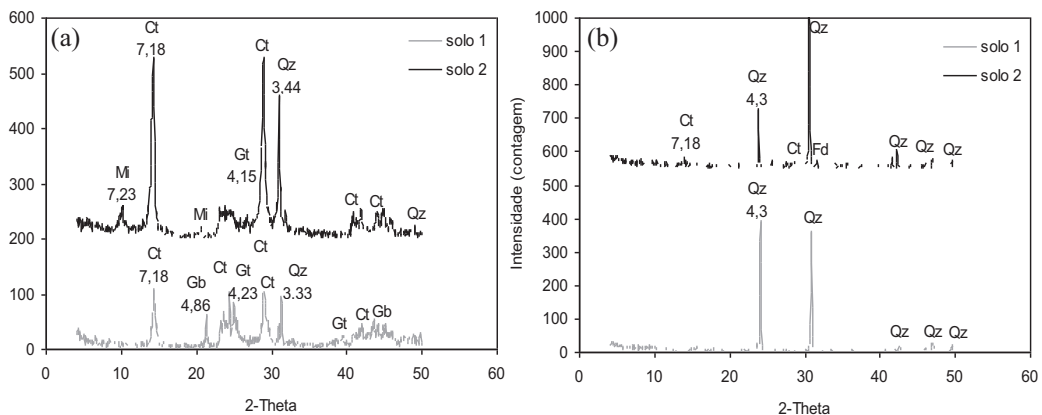


Fig. 3 – Difratogramas de raios-X das (a) frações silte-argila e (b) areia das amostras dos solos 1 e 2.

Quadro 2 – Propriedades químicas dos solos.

Material	pH		PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC _t	V
	H ₂ O	KCl		mg/dm ³		cmol/dm ³					%
Solo 1	6,8	6,4	6,0	3,5	31,0	1,2	0	0	0,3	1,3	80
Solo 2	6,5	4,3	2,0	10,5	59,0	0,6	0,1	0,5	1	1,4	48

2.2 – Métodos

Os procedimentos empregados na preparação das amostras para a realização dos ensaios de caracterização obedeceram à NBR 6457 (ABNT, 1986). Os solos utilizados na presente pesquisa foram retirados dos taludes de corte, trazidos para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foram secos ao ar. Em seguida, cada material foi destorroado, homogeneizado, quarteado, passado na peneira nº 4 (4,8mm) e armazenado, inicialmente, em barris vedados. As amostras na umidade higroscópica foram separadas em sacos plásticos devidamente isolados, para se evitar qualquer alteração no teor de umidade, e homogeneizadas. Todo material empregado foi pesado em balança, com precisão de 0,01 g.

Utilizaram-se, isoladamente, os teores de 1%, 2% e 3% de cal e de cimento, em relação à massa seca de solo, que foram adicionados e homogeneizados nas amostras ensacadas. Posteriormente, deixaram-se as misturas descansarem por períodos de 0 h, 1 h, 2 h, 4 h e 8 h, até a realização dos ensaios, buscando-se reproduzir possíveis tempos de aplicação das misturas no campo. No momento da realização dos ensaios adicionou-se água até a umidade ótima de compactação de cada solo.

As análises granulométricas dos solos e das misturas foram realizadas de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984a), por peneiramento e sedimentação com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio. Os pesos específicos dos grãos dos solos e misturas foram determinados segundo o procedimento descrito na NBR 6508 (1984d). Os limites de liquidez (w_L) dos solos e misturas foram determinados de acordo com a NBR 6459 (1984b) e os limites de plasticidade (w_P) de acordo com o procedimento descrito na NBR 7180 (1984c).

A análise estatística dos dados foi realizada através de Análise de Variância – ANOVA (Banzatto e Kronka, 1996), para verificação da significância das variações dos valores das frações granulométricas e índices de plasticidade considerando a variável tempo entre mistura e ensaios como

repetições. Nas análises ANOVA, as comparações foram realizadas utilizando-se o teste Tukey, empregando-se o software STATISTICA 6.0. Destaca-se que foram adotados níveis de probabilidade de 1% e de 5% em todas as ANOVAs. O uso do nível de probabilidade 10% foi desconsiderado, uma vez que diminuiria a rigorosidade dos testes aplicados. Para o teste de médias adotou-se o nível de probabilidade de 5%, uma vez que o nível de probabilidade de 1% seria muito rigoroso para os ensaios realizados.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 – Análise granulométrica

Na Fig. 4 apresentam-se as variações das frações granulométricas do solo 1, ocasionadas pela adição de baixos teores de cal e de cimento, isoladamente, bem como a influência dos tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios de granulometria de 0, 1, 2, 4 e 8 horas. Nota-se que houve redução da fração argila com o aumento dos teores de cal e cimento, o que evidenciou a ocorrência de trocas catiônicas no complexo sortivo do solo, com o íon cálcio exercendo papel preponderante na redução da dupla camada difusa e favorecendo a ocorrência de fenômenos de floculação. Muito embora a cal tenha maior concentração de cálcio em sua composição, o cimento proporcionou maiores diminuições na fração argila. Nas misturas solo 1-cal, a influência do tempo de descanso entre mistura e realização do ensaio de granulometria não proporcionou uma tendência nas modificações ocorridas nas frações de solo relatadas por Osula (1996), que verificou aglomerações das partículas de argila crescentes com o tempo; presentemente, ocorreram variações nos tempos de maior floculação para cada teor analisado. Para a mistura com 1% de cal, pode-se visualizar que as aglomerações da fração argila resultaram em aumento da fração silte, não havendo alteração no percentual da fração areia. À medida que se aumentou o teor de cal, verificou-se a ocorrência de maiores alterações na fração silte e de menores, mas expressivas, variações na fração areia. Ocorrência de comportamento similar se observou nas misturas solo-cimento com o aumento do teor de cimento, mas, quantitativamente, notou-se a ocorrência de alterações maiores nas frações argila, silte e areia, o que trouxe à tona a maior eficiência do cimento do que da cal nos mecanismos de aglomeração, onde provavelmente as reações de cimentação que ocorrem logo nas primeiras horas, conjuntamente com os fenômenos de floculação estão sendo efetivos, no presente caso, conforme se ilustra na Fig 4.

Na Fig. 4 observa-se, também, para as misturas solo-cimento, que as alterações na fração argila com o tempo entre a mistura e a realização do ensaio não apresentaram tendência definida de comportamento. Notou-se que, no tempo de 8 h entre mistura e realização dos ensaios de granulometria, ocorreram maiores alterações nas frações granulométricas, principalmente nas frações argila e silte, em concordância com resultados de Osula (1996). Comparativamente com a cal, conclui-se que o cimento mostra-se mais efetivo nas alterações das frações granulométricas do solo 1, principalmente nos teores de 2% e 3% dos estabilizantes, o que pode estar relacionado às reações de troca catiônica associadas a reações de hidratação do cimento responsáveis, também, por alterações mais significativas em prazos mais longos.

Na Fig. 5, ilustram-se as alterações imediatas nas frações granulométricas do solo 1 ocasionadas pela adição de cal e cimento nos teores de 1%, 2% e 3%. Nota-se, claramente, que as alterações imediatas provocadas pela cal na fração argila do solo, têm relação quase direta com as alterações promovidas na fração silte. Certifica-se tal fato pela permanência dos valores da fração areia, com pequenas variações a partir do teor de 2% do estabilizante. Por outro lado, as modificações ocasionadas pelo uso do cimento foram mais intensas que as alterações promovidas pela aplicação da cal, e estão associadas às alterações proporcionadas à fração silte e areia, concomitantemente. Para ambos tratamentos, o efeito imediato é bastante significativo para os teores de 2 e 3% tanto da cal quanto do cimento.

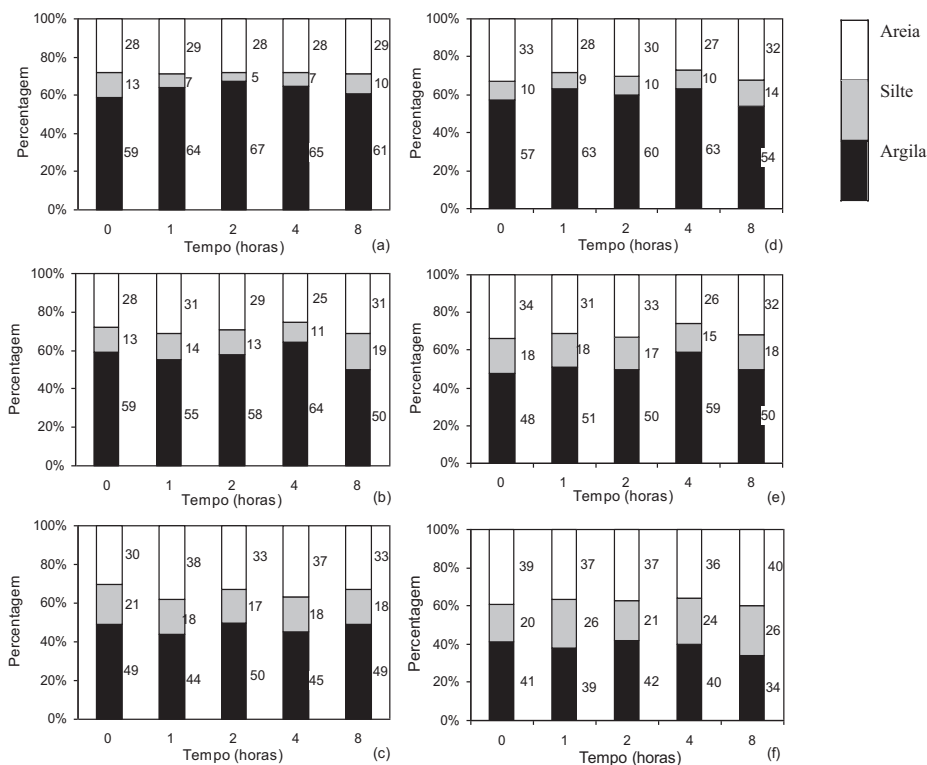


Fig. 4 – Variação das frações granulométricas das misturas (a) solo 1- 1% cal, (b) solo 1-2% cal, (c) solo 1-3% cal, (d) solo 1-1% cimento, (e) solo 1-2% cimento e (f) solo 1-3% cimento, e a influência dos tempos de descanso entre mistura e a realização do ensaio de granulometria.

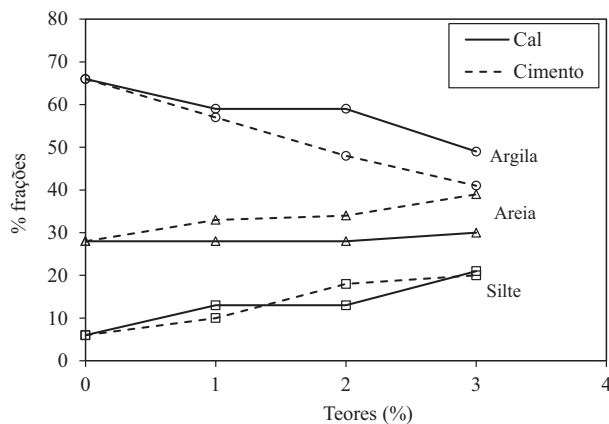


Fig. 5 – Efeito imediato dos estabilizantes na composição granulométrica do solo 1.

Nos Quadros 3 e 4, onde F.V. é o fator de variância, G.L. é o grau de liberdade, S.Q. é a soma dos quadrados e Q.M. é o quadrado médio, apresentam-se os resultados da Análise de Variância (ANOVA) aplicada aos valores das frações granulométricas, considerando-se os tempos entre mistura e realização do ensaio como repetições, respectivamente, para as misturas solo 1-cal e

solo 1-cimento, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%. Nos Quadros 5 e 6, apresentam-se resultados do teste Tukey das percentagens das frações argila, silte e areia, ao nível de 5% de probabilidade, para as misturas do solo 1 com os teores de 1%, 2% e 3% de cal e cimento.

Avaliando-se os resultados apresentados nos Quadros 3 e 4, notou-se que, estatisticamente, as frações areia, silte e argila das misturas, foram influenciadas pelas variáveis de tratamento teores e/ou tempo entre mistura e a realização do ensaio de granulometria, para ambos os tipos analisados de misturas, para o nível de probabilidade de 1%.

Nos Quadros 5 e 6, analisou-se, pelo teste Tukey, o contraste das médias dos tratamentos realizados com a adição dos estabilizantes para as misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, com a finalidade de se verificar quais tratamentos foram significativos nas alterações das frações granulométricas. De referir que \bar{X} são as médias das repetições para cada tratamento, sendo que as médias seguidas de pelo menos uma letra não diferem entre si.

Quaro 3 – Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cal, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%.

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	636,1	318,1	21,6**
Resíduos	12	176,8	14,7	
Total	14	812,9	58,1	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	251,2	125,6	17,8**
Resíduos	12	84,4	7,0	
Total	14	335,6	24,0	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	104,9	52,5	9,2**
Resíduos	12	68,8	5,7	
Total	14	173,7	12,4	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

Observa-se no Quadro 3 que, para as misturas solo 1-cal, o teor de 3% provocou variação significativa nas frações argila e areia quando comparado com os teores de 1% e 2%, o que não ocorreu entre esses valores. Já para a fração silte, os teores de 2% e 3% não alteraram significativamente entre si, sendo que ambos apresentaram contraste com teor de 1% de cal. No Quadro 6, nas misturas solo 1-cimento, nota-se que os teores de 1%, 2% e 3% foram responsáveis por alterações significativas nas frações argila e silte. Na fração areia só houve diferença nos contrastes das médias dos tratamentos de 1% e 3% de cimento.

No solo 2, as variações ocorridas nas frações granulométricas ocasionadas pela adição da cal e do cimento são apresentadas na Fig. 6, assim como a influência dos tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios de granulometria, no molde do estudo realizado com o solo 1. Nota-se que as misturas solo 2-cal não sofreram alterações significativas nas frações granulométricas quando comparadas com as misturas solo 1-cal, em decorrência da menor percentagem da sua fração argila, que consiste na parte ativa que participa de, praticamente, todas as reações físico-quími-

Quadro 4 – Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cimento, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%.

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	1037,7	518,9	35,9**
Resíduos	12	173,2	14,4	
Total	14	1210,9	86,5	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	409,7	204,9	46,2**
Resíduos	12	53,2	4,4	
Total	14	462,9	33,1	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	176,4	88,2	14,1**
Resíduos	12	75,6	6,3	
Total	14	252,0	18,0	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

Quadro 5 – Teste de médias (Tukey) dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cal, para um nível de probabilidade de 5%.

Fração argila		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	63,2	a
2%	57,2	a
3%	47,4	b
Fração silte		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	8,4	a
2%	14,0	b
3%	18,4	b
Fração areia		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	28,4	a
2%	28,8	a
3%	34,2	b

cas que ocorrem no solo. Da mesma maneira, para fins práticos, pode-se afirmar que as reações de hidratação, que ocorreram a curto prazo não foram efetivas nas misturas solo 2-cimento, uma vez que não houve alterações significativas na composição granulométrica, quando se analisou o tempo entre mistura e realização dos ensaios de granulometria.

Quadro 6 – Teste de médias (Tukey) dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%.

Fração argila		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	59,4	a
2%	51,6	b
3%	39,2	c
Fração silte		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	10,6	a
2%	17,2	b
3%	23,4	c
Fração areia		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	30,0	a
2%	31,2	ab
3%	37,8	b

Apesar da influência pouco expressiva do tempo decorrido entre mistura e realização do ensaio na composição granulométrica, na Fig. 6, pode-se observar que as maiores modificações ocorreram no tempo de 8 horas, sendo para o teor de 3% de cal. Já, para misturas solo 2-cimento, o tempo que levou à ocorrência de maior aglomeração de partículas oscilou com o teor avaliado.

As alterações imediatas nas frações granulométricas do solo 2 pela adição de cal e cimento são apresentadas na Fig. 7, podendo-se visualizar a atuação pouco expressiva dos estabilizantes. Como as maiores alterações ocorreram no tempo de 8 h, pode-se admitir que somente as reações de cimentação foram causadoras de alterações significativas na composição granulométrica desse tipo de solo.

De modo geral, as incorporações da cal e do cimento individualmente aos solos em estudo não produziram alterações significativas na composição granulométrica do solo 2, o que pode estar associado à sua menor percentagem de fração argila em comparação com o solo 1, sendo esta a responsável maior pela ocorrência dos fenômenos de floculação. Em contrapartida, no caso do solo 1, as alterações foram expressivas, sendo que nas suas misturas com cal não se detectou a ocorrência de um tempo específico em que os fenômenos de floculação foram máximos. Observou-se que os tempos de maior floculação variam para cada teor de estabilizante avaliado, sendo que nas misturas solo 1-cimento as alterações granulométricas foram maiores, principalmente após o período de tempo de 8 horas entre a mistura e a realização dos ensaios de granulometria.

Os resultados da Análise de Variância dos valores das frações granulométricas são apresentados nos Quadros 7 e 8 para as misturas solo 2-cal e solo 2-cimento, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%. Avaliando-se os resultados, notou-se que, estatisticamente, os valores das frações granulométricas não foram influenciados pelos teores e/ou variações no tempo entre mistura e realização do ensaio, para ambos os tipos de misturas analisadas. Uma vez que a variação não foi significativa, não se faz necessário a avaliação via teste de médias.

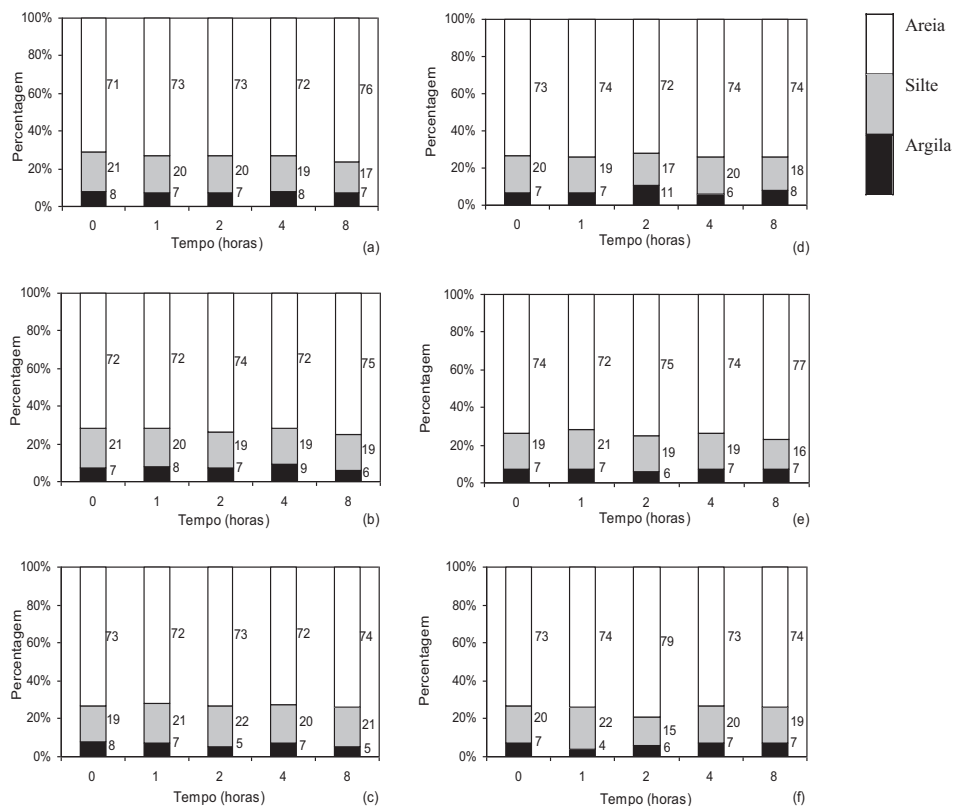


Fig. 6 – Variação das frações granulométricas das misturas solo 2- 1% cal (a), solo 2-2% cal (b), solo 2-3% cal (c), solo 2-1% cimento (d), solo 2-2% cimento (e) e solo 2-3% cimento (f), com os tempos de descanso entre mistura e a realização do ensaio de granulometria.

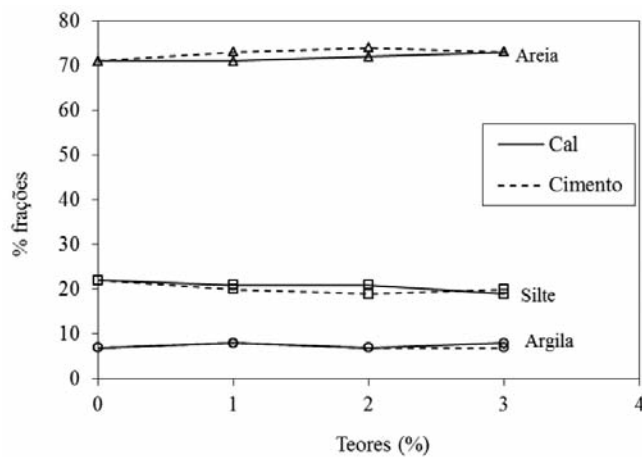


Fig. 7 – Efeito imediato dos estabilizantes na constituição granulométrica do solo 2.

Quadro 7 – Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%.

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	3,3	1,7	1,5 ^{ns}
Resíduos	12	13,6	1,1	
Total	14	16,9	1,2	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	4,1	2,1	1,4 ^{ns}
Resíduos	12	17,6	1,5	
Total	14	21,7	1,6	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,1	0,1	0,0 ^{ns}
Resíduos	12	24,8	2,1	
Total	14	24,9	1,8	

^{ns}não significativo

Quadro 8 – Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%.

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	6,5	3,3	1,7 ^{ns}
Resíduos	12	22,4	1,9	
Total	14	28,9	2,1	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,5	0,3	0,1 ^{ns}
Resíduos	12	46,4	3,9	
Total	14	46,9	3,4	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	4,1	2,1	0,6 ^{ns}
Resíduos	12	41,6	3,5	
Total	14	45,7	3,3	

^{ns}não significativo

3.2 – Limites de Atterberg

Nas Figs. 8 e 9, apresentam-se os resultados dos ensaios de limites de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_p) do solo 1 estabilizado com cal e com cimento, bem como os valores do índice de plasticidade (I_p), considerando-se os tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios de 0, 1, 2, 4 e 8 horas. Os resultados da variação da plasticidade do solo na Fig. 8 mostram que baixos teores de cal em torno de 1 e 2% provocam a redução na plasticidade do solo. Um aspecto interessante é que após 2% do estabilizante a plasticidade do solo passa a aumentar. A redução da plasticidade foi verificada também com o aumento do tempo entre mistura e realização dos ensaios. O tempo de 8 horas mostrou uma maior redução em comparação com os tempos menores. As misturas com cimento apresentaram comportamento semelhante ao verificado nas misturas solo-cal, no entanto as alterações não são tão significativas. Outra diferença é que não se pode notar um aumento no I_p após 2% do estabilizante, mas sim a manutenção desses valores. Do mesmo modo verificado nas misturas com cal, o I_p da mistura sofre redução com o aumento do tempo entre mistura e realização do ensaio. No entanto, pode-se verificar que o efeito imediato promove maiores alteração nos valores de w_L e w_p . Vale destacar que as variações observadas na plasticidade das misturas solo-cal estão diretamente relacionadas à ocorrência de reações de troca catiônica que se processaram a curto prazo. Por esse motivo, espera-se a ocorrência de maiores alterações no I_p nas misturas solo-cal após poucas horas de mistura. Nas misturas solo-cimento pode-se verificar o efeito do retardamento da realização do ensaio com o teor de 1% do estabilizante. Maiores teores não tiveram efeito significativo do tempo entre mistura e ensaio. Ainda, o cimento parece não alterar o w_L , mas sim o w_p .

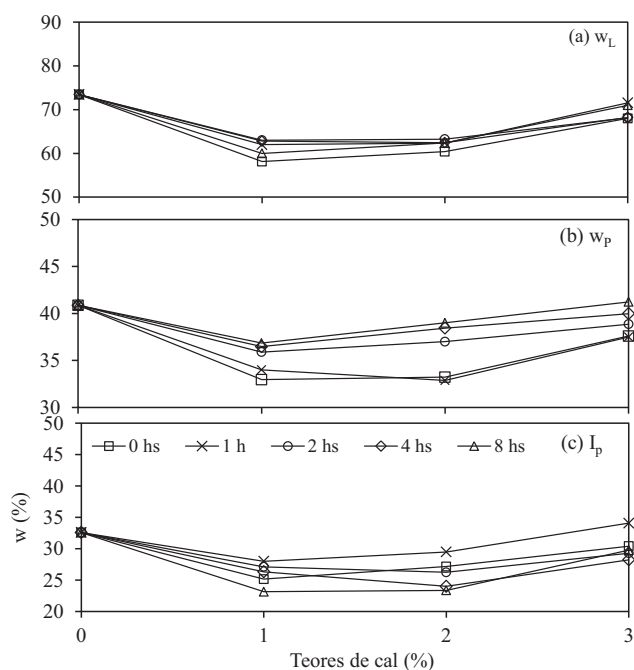


Fig. 8 – Influência da adição de cal nos parâmetros de plasticidade do solo 1, para diferentes períodos de tempo entre misturas e realização dos ensaios.

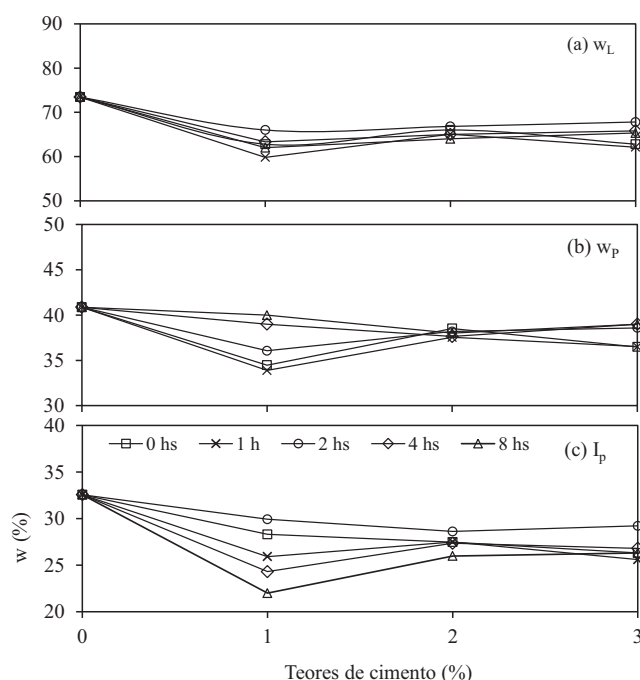


Fig. 9 – Influência da adição de cimento nos parâmetros de plasticidade do solo 1, para diferentes períodos de tempo entre misturas e realização dos ensaios.

Nos Quadros 9 e 10 apresentam-se os resultados da Análise de Variância aplicada aos valores dos índices de plasticidade, considerando-se os tempos entre mistura e realização dos ensaios como repetições, respectivamente, para as misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%. Com os resultados apresentados, observou-se que, estatisticamente, os valores de I_p não foram influenciados pelos teores utilizados e/ou tempo entre mistura e ensaios, para ambos os tipos de misturas analisados.

Quadro 9 – Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	9,4	4,7	0,5 ^{ns}
Resíduos	12	106,6	8,9	
Total	14	116,1	8,3	

^{ns}não significativo

Quadro 10 – Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	41,8	20,9	2,6 ^{ns}
Resíduos	12	95,2	7,9	
Total	14	137,0	9,8	

^{ns}não significativo

O comportamento imediato dos limites de Atterberg do solo 1 tratado com os teores de 1%, 2% e 3% de cal e de cimento pode ser observado na Fig. 10. De modo geral, para ambas as misturas, as maiores reduções nos valores do I_p ocorreram com a adição de 1% dos estabilizantes, com variações menos expressivas a partir deste teor. Assim, presume-se que as reações de troca catiônica se processam suficientemente fortes já com o teor de 1%. Comparativamente, as alterações promovidas nos parâmetros de plasticidade pela adição da cal foram mais significativas do que as variações provocadas pelo uso do cimento, o que trás à tona a efetividade das trocas catiônicas no processo.

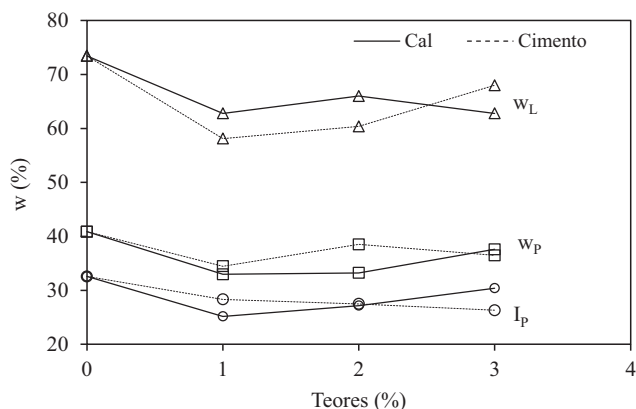


Fig. 10 – Efeito imediato dos estabilizantes nos limites de Atterberg do solo 1.

Nas Figs. 11 e 12, apresentam-se os resultados dos ensaios de limites de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_P) do solo 2 estabilizado com cal e com cimento, bem como os valores do índice de plasticidade (I_p), considerando-se os tempos decorridos entre mistura e a realização dos ensaios de 0, 1, 2, 4 e 8 horas. Na Fig. 11, apresenta-se o comportamento da plasticidade do solo 2 estabilizado com cal, onde pode-se notar que a cal foi responsável por diminuições nos valores de w_L e manutenção dos valores de w_P , o que resultou a pequena queda nos valores de I_p . Ainda, as maiores reduções neste parâmetro ocorreram com 1% de cal, sendo que maiores teores do estabilizante não proporcionaram alterações significativas. Ainda, observou-se que as variações do I_p nessas misturas foram menores do que as variações observadas nas misturas solo 1-cal. De modo geral, as variações dos valores de I_p com os tempos entre mistura e ensaios foram relativamente pequenas quando comparadas com as misturas realizadas com o solo 1. Observou-se que as variações promovidas nos valores de w_L foram insignificantes, sendo que diminuições foram mais significativas imediatamente após a mistura, o que provocou maiores alterações também nos valores do I_p . Cabe salientar que as reações de troca catiônica atuantes no solo 2 foram menos intensas do que no solo 1, uma vez que a percentagem da sua fração argila é menor.

Os resultados apresentados na Fig. 12 demonstraram que os teores de cimento avaliados ocasionaram maiores modificações na plasticidade do solo 2, sendo que essas alterações foram mais significativas a partir de 2% de cimento. As variações nos valores de w_L mostraram-se expressivas, enquanto que os valores de w_P praticamente não sofreram alterações. No entanto, pode-se dizer que os tempos entre mistura e realização dos ensaios não promoveram alterações significantes nos parâmetros de plasticidade.

De modo geral, misturas realizadas com o solo 2 apresentaram variações menos significativas do que as misturas realizadas com o solo 1, sendo que o cimento mostrou-se mais eficiente na modificação de plasticidade de ambos os solos. Possivelmente, as reações de hidratação influenciaram

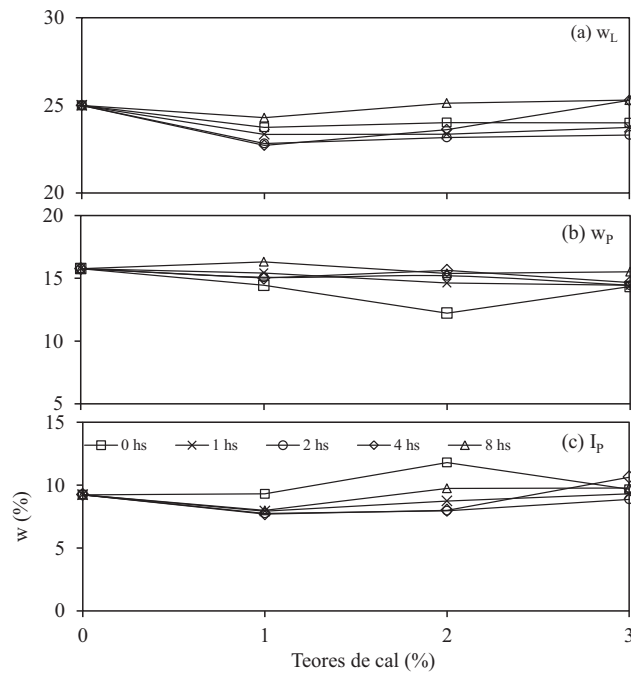


Fig. 11 – Influência da adição de cal nos parâmetros de plasticidade do solo 2, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.

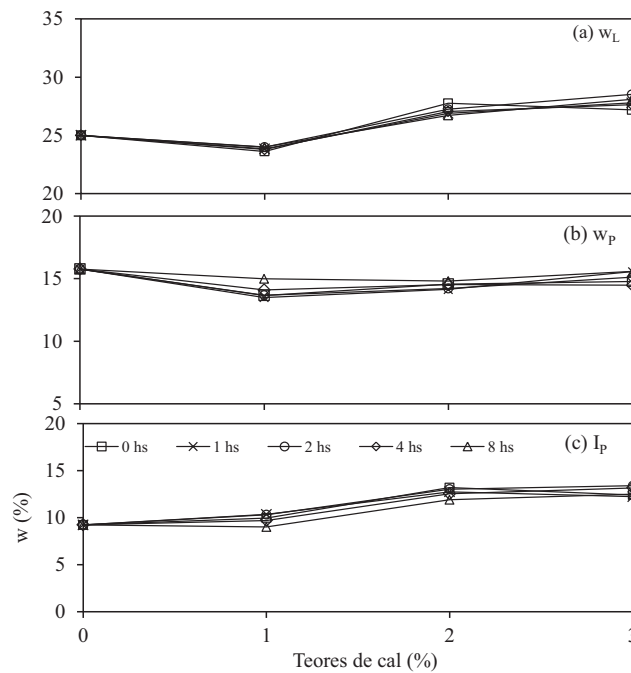


Fig. 12 – Influência da adição de cimento nos parâmetros de plasticidade do solo 2, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.

as plasticidades dos solos. Segundo Castro e Serafim Luis (1974), solos com elevado I_p mostram-se mais suscetíveis à redução de plasticidade, enquanto que aqueles moderadamente plásticos são menos afetados, podendo haver acréscimos no valor do I_p .

Nos Quadros 11 e 12 apresentam-se os resultados da Análise de Variância aplicada aos valores dos índices de plasticidade, considerando-se os tempos entre mistura e realização dos ensaios como repetições, respectivamente, para as misturas solo 2-cal e solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%. Avaliando-se os resultados apresentados no Quadro 11, observa-se que, estatisticamente, os valores de I_p não foram influenciados pelo tratamento com cal. Já para as misturas solo 2-cimento, observa-se no Quadro 12 que os valores de I_p apresentam variações significativas ao nível de probabilidade de 1%.

Quadro 11 – Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	2,1	1,1	0,7 ^{ns}
Resíduos	12	17,4	1,5	
Total	14	19,5	1,4	

^{ns}não significativo

Quadro 12 – Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	15,8	7,9	8,8**
Resíduos	12	10,8	0,9	
Total	14	26,6	1,9	

**significativo ao nível de 1% de probabilidade

No Quadro13 analisou-se, pelo teste Tukey, o contraste das médias dos tratamentos, ao nível de 5% de probabilidade, para as misturas solo 2-cimento. Observa-se que os contrastes das médias dos tratamentos realizados com teores de 2% e 3% de cimento não apresentaram variações significativas entre si. Já o teor de 1% do estabilizante apresentou variação significativa, quando comparado com os teores de 2% e 3% de cimento. Portanto, pode-se dizer que as variações foram significativas pela variável teores. A variável tempo não foi responsável por alterações significativas estatisticamente.

Quadro 13 – Teste de médias (Tukey) dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%.

Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	10,5	A
2%	12,5	B
3%	12,7	B

Na Fig. 13 apresentam-se as alterações promovidas nos valores dos limites de Atterberg do solo 2, imediatamente após a aplicação dos teores de 1%, 2% e 3% de cal e de cimento. Observou-se que, diferentemente do ocorrido com o solo 1, as maiores alterações nos valores do I_p ocorreram

com o teor de 2% dos estabilizantes, induzindo a aumentos no valores deste parâmetro. Notou-se que os teores de cimento não provocaram variações nos valores de w_L , mas reduções no w_P , até o teor de 2%. Já a cal produziu aumento no w_L , a partir do teor de 1%, e redução nos valores de w_P , até 1%.

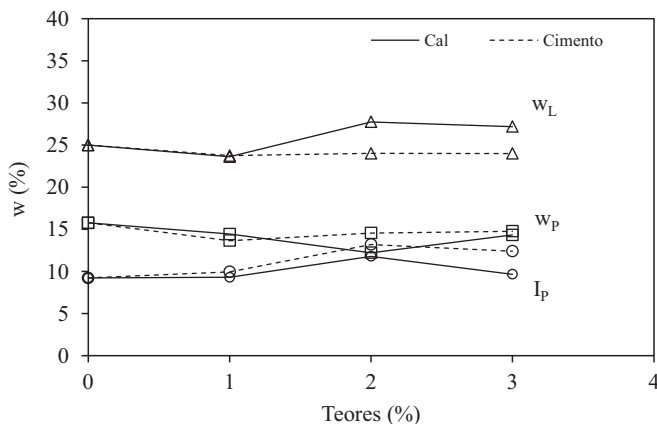


Fig. 13 – Efeito imediato dos estabilizantes nos limites de Atterberg do solo 2.

3.3 – Propriedades químicas dos solos e misturas

Nos Quadros 14 e 15 mostram-se os resultados das caracterizações químicas das amostras dos solos 1 e 2 e de suas misturas com cal e cimento, respectivamente. Segundo os dados apresentados, os valores de pH medidos em água dos solos 1 e 2 foram, respectivamente, 6,76 e 6,47, sendo classificados como moderadamente ácidos, de acordo com terminologia referida por Guimarães (1997). Destaca-se que os valores de pH dos solos, em geral, situaram-se entre 4 e 7, sendo que números abaixo desta faixa indicaram a presença de ácidos livres, enquanto que acima refletiram a ocorrência de solos salinos ou calcários, em concordância com Raij *et al.* (1987). Os valores de capacidade de troca catiônica dos solos 1 e 2 foram, relativamente, baixos e compatíveis com a mineralogia das suas frações argila, predominantemente compostas por caulinita e óxidos de ferro e de alumínio. Refere-se que esses são minerais secundários com, respectivamente, valores de CTC entre 3 e 15 cmolc/kg (Guimarães, 1971) e 2 e 4 cmolc/kg (Meurer, 2006). Com relação aos valores da percentagem de saturação de bases, os solos 1 e 2 apresentaram valores menores que 80%. De acordo com Brady e Weil (1999), solos de regiões tropicais úmidas, em que predominam argilas silicatadas, são ácidos quando esse valor é menor do que 80%. Os valores de acidez potencial ($H + Al$) dos solos 1 e 2 foram, respectivamente, 0,3 e 1, ou seja, apresentaram relação inversa com os valores de pH, mostrando que a soma dos compostos de hidrogênio e de alumínio influenciou nas medidas dos seus valores de pH. O trabalho de Akoto e Singh (1981) mostra que solos com elevadas quantidades de alumina geram misturas com melhores propriedades mecânicas. No Quadro 2 pode-se observar que os solos apresentam baixa quantidade de Al^{3+} na composição; no entanto, o trabalho de Portelinha *et al.* (2011) evidencia uma melhoria efetiva nas propriedades mecânicas de ambos os solos analisados, mostrando potencial para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos. Mesmo assim, tal melhoria em relação ao solo puro pode não ser tão eficiente quando comparada aos solos com grande concentração de óxido de alumínio.

Brady e Weil (1999) relatam que são complexos os fatores responsáveis pela acidez do solo, pois, ao mesmo tempo, existem dois grupos de elementos dominantes que exercem influência significativa, ou seja, o alumínio e o hidrogênio favorecem a ocorrência de acidez, enquanto que os outros cátions, na sua maioria, a neutralizam.

Quadro 14 – Resultados das análises químicas das misturas do solo 1 com cal e cimento.

Amostra	Propriedades químicas										
	pH		PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC _t	V
	H ₂ O	KCl		mg/dm ³		cmol _c /dm ³					%
Solo 1	6,8	6,4	6,0	3,5	31,0	1,2	0	0	0,3	1,3	80
cal (1%)	8,3	8,1	7,9	190,1*	13,0	5,3	0	0	0,6	6,2	91
cal (2%)	8,5	8,5	8,6	-	28,0	7,0	0	0	0	7,1	100
cal (3%)	10,9	10,8	10,6	6,8	8,0	7,1	0	0	0	7,2	100
cimento (1%)	8,6	8,4	8,2	6,4	100,0	5,9	0	0	0	6,2	100
cimento (2%)	8,6	8,4	8,3	14,5	130,0	6,0	0	0	0	6,4	100
cimento (3%)	8,8	8,7	8,6	26,6	195,0	6,9	0	0	0	7,5	100

*provável erro de análise

Quadro 15 – Resultados das análises químicas das misturas do solo 2 com cal e cimento.

Amostra	Propriedades químicas										
	pH		PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC _t	V
	H ₂ O	KCl		mg/dm ³		cmol _c /dm ³					%
Solo 2	6,5	4,3	2,0	10,5	59,0	0,6	0,1	0,5	1	1,4	48
cal (1%)	9,3	8,8	8,4	11,5	99,0	5,2	0	0	0	5,5	100
cal (2%)	10,4	10,3	10,3	9,5	86,0	5,2	0	0	0	5,5	100
cal (3%)	10,7	10,8	11,0	10,5	84,0	6,4	0	0	0	6,7	100
cimento (1%)	9,6	9,3	9,1	31,6	170,0	4,8	0	0	0	5,4	100
cimento (2%)	9,9	9,8	9,7	44,6	212,0	6,3	0	0	0	11,7	100
cimento (3%)	9,9	9,9	9,8	28,6	195,0	6,3	0	0	0	6,9	100

Para os solos 1 e 2, as diferenças entre os valores de pH determinados em solução de KCl 1mol/L e daquele medido em H₂O foram, respectivamente, de -0,37 e -2,22, indicando a predominância de cargas elétricas variáveis. Os valores da capacidade de troca catiônica dos solos 1 e 2 foram, respectivamente, 1,25 e 1,39 cmol_c/kg. Esses valores podem ser considerados relativamente baixos e compatíveis com a mineralogia de suas frações argila, que se mostraram, predominantemente, compostas por caulinita e óxidos de ferro e de alumínio, segundo Trindade (2006). As estimativas dos Pontos de Carga Zero (PCZ) para os solos 1 e 2, obtidas pela diferença entre o dobro do pH mensurado em KCl e o pH medido em água, para cada solo, foram, respectivamente, de 6,02 e 2,03. Segundo Trindade (2006), os solos tropicais cauliniticos e oxidicos, como os estudados nesse trabalho, possuem cargas variáveis, as quais se manifestam a partir da protonação e desprotonação dos colóides. Acredita-se que a predominância de minerais cauliniticos, bem como a falta de minerais oxidicos, fez com que o solo 2 apresentasse valor baixo de PCZ.

Nos Quadros 14 e 15, mostra-se que com a adição dos estabilizantes químicos, os solos apresentaram aumentos significativos nos valores das seguintes propriedades químicas: pH; soma de bases trocáveis (SB), principalmente devido ao aumento de íons de Ca²⁺; capacidade de troca catiônica; e índice de saturação de bases. Por outro lado, houve expressivas reduções nas quantidades de hidrogênio livre e de alumínio e, conseqüentemente, na acidez potencial (H+Al), que se tornou nula assim que se adicionaram aos solos os estabilizantes analisados. Portanto, a

incorporação dos estabilizantes químicos aos solos proporcionou um aumento na saturação de bases e um consumo total dos íons H^+ e Al^{3+} trocáveis, gerando modificações nos seus valores de pH, passando de ácidos para alcalinos.

Dentre as características químicas presentes neste trabalho, o pH tem sido a mais usada no estudo da estabilização química dos solos. Segundo Rogers e Glendinning (2000), mudança que venha ocorrer nos valores de pH de misturas, resultando em valores suficientemente elevados, provocam a dissolução parcial da sílica e da alumina, seguida da formação de novos minerais silicatos e aluminatos, que, quando cimentados, conferem aumentos na resistência mecânica dos solos. Observou-se que ocorreram aumentos significativos nos valores de pH, nos teores de cal e de cimento de 2% e 3%, que se relacionaram às elevadas concentrações dos íons cálcio fornecidas pelos estabilizantes e às reduções na acidez potencial. Assim, o aumento do pH dos solos ocorreu devido à liberação de sítios de troca originalmente ocupados por hidrogênio e/ou alumínio, após a adição de teores crescentes de cal e cimento, tendo este processo resultado na possível precipitação do alumínio e na diminuição da acidez potencial.

A partir dos resultados de PCZ apresentados nos Quadros 14 e 15, verificou-se que ocorrem aumentos nos valores de PCZ com aumentos nos teores de cal e de cimento, chegando-se a quantitativos maiores com teores maiores de estabilizantes, assim como ocorreu com os valores de pH e de capacidade de troca catiônica dos solos. Semelhantemente ao comportamento observado nos solos não tratados, os valores de PCZ determinados para as misturas foram, com poucas exceções, inferiores àqueles de pH em H_2O , evidenciando, pois, o predomínio de carga variável negativa nos colóides das misturas.

3.4 – Relação entre propriedades físicas e químicas das misturas

Na Fig. 14 apresenta-se a relação entre os parâmetros químicos e as propriedades de índice de plasticidade e percentagem da fração argila das misturas dos solos 1 e 2 com cal e cimento. Inicialmente, pode-se dizer que, de modo geral, os parâmetros químicos CTC, pH e concentração de íons cálcio parecem estar relacionados, o que é coerente com os trabalhos do TRB (1976) e Hilt e Davidson (1960). Para o solo 1, pode-se verificar a relação entre o aumento da CTC, pH e Ca^{2+} e a diminuição do I_p e da percentagem da fração argila das misturas com a cal e cimento. No entanto, para o solo 2 o comportamento não é semelhante. Observa-se inicialmente um aumento dos parâmetros físicos e, posteriormente, queda. Neste caso, a cal promoveu aumentos mais significativos que o cimento, sendo que as alterações na fração argila podem ser desprezíveis.

Naturalmente, esperava-se que o solo 1 apresentasse maiores alterações nos parâmetros químicos e físicos do solo, uma vez que se trata de um solo argiloso. No entanto, por ser solo laterítico, as alterações físicas e químicas podem ser menos efetivas que as alterações em solo com minerais argílicos mais ativos (esmectita ou montmorilonita) em sua composição. De modo geral, os aumentos dos parâmetros químicos aqui relacionados resultaram em diminuições nos valores de I_p e percentagem de fração argila de ambos os solos.

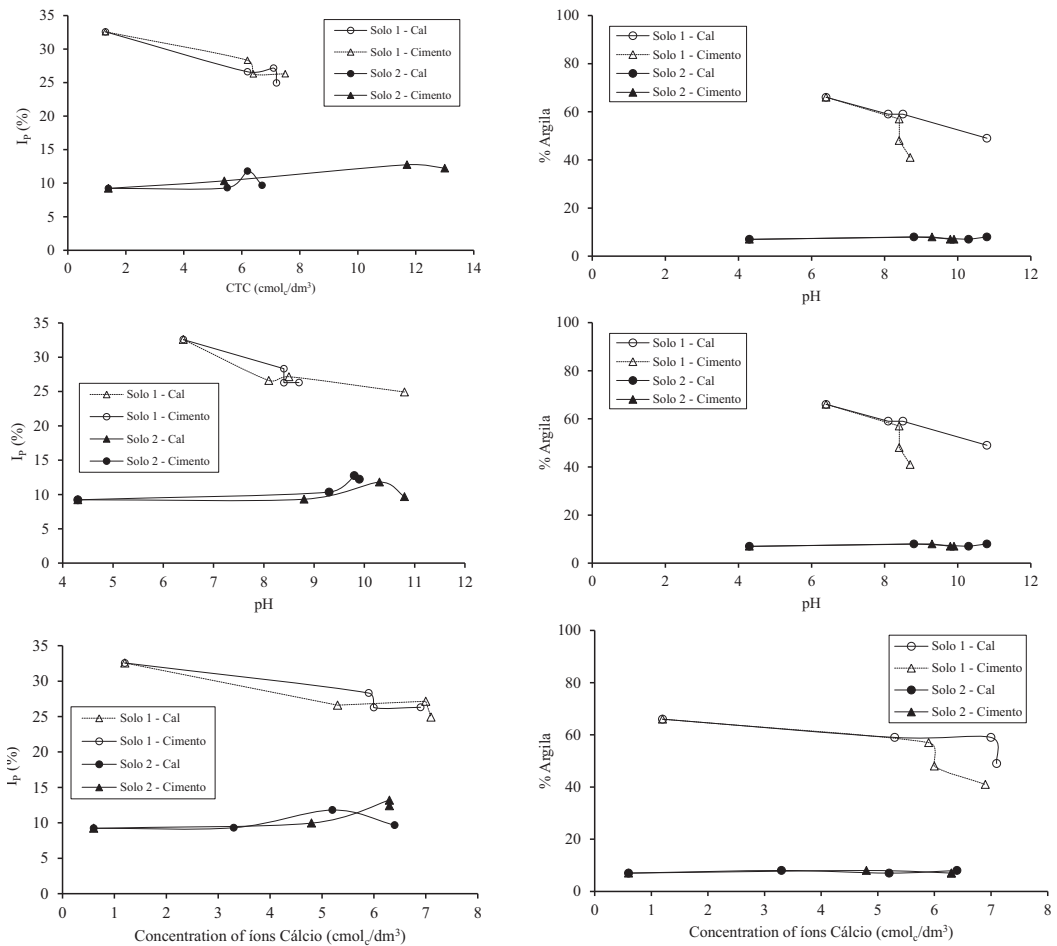


Fig. 14 – Relação entre parâmetros químicos e propriedades físicas dos solos 1 e 2.

3.5 – Considerações finais

As propriedades geotécnicas das misturas realizadas com o solo 2 sofreram menores alterações, quando comparadas com o solo 1. As incorporações da cal e do cimento, individualmente, ao solo 2 não produziram alterações significativas na composição granulométrica e I_p com o tempo entre mistura e realização dos ensaios, e não apresentaram nenhum tipo de semelhança na trajetória das curvas que descrevem tais comportamentos. Quando se refere às misturas solo 2-cimento, as variações tornaram-se mais expressivas. O cimento demonstrou ser mais eficiente na modificação de plasticidade, onde, possivelmente, as reações de hidratação que ocorreram influenciaram os comportamentos de plasticidade do solo 2. O tempo entre mistura e ensaio não influenciou, de forma significativa, os valores de I_p das misturas. Observou-se, também, que a incorporação do cimento foi mais efetiva nas alterações das frações granulométricas do solo 2, destacando-se, novamente, o tempo entre mistura e realização do ensaio de 8 horas. Ainda, as alterações na percentagem de fração argila foram acompanhados com as alterações nos I_p de ambos os solos. Parâmetros químicos CTC, pH e concentração de Ca^{2+} apresentam-se relacionados com as modificações físicas proporcionadas.

Destaca-se que os comentários apresentados têm embasamento nas características químicas das misturas estudadas. Observou-se a ocorrência de aumentos nos valores de pH com os teores dos estabilizantes, nos dois solos utilizados. Entende-se que tal fato se relacionou com o aumento da CTC e com a saturação da superfície da partícula pelos íons cálcio, que foram responsáveis pelo fenômeno de floculação. As reações de troca catiônica foram ativadas pela presença de tal íon, sendo assim, responsáveis pelo comportamento dos parâmetros discutidos anteriormente. Adicionalmente, cabe destacar a ocorrência das reações de hidratação do cimento Portland, que foram responsáveis por alterações nas propriedades das misturas solo-cimento, no período mais longo entre mistura e realização dos ensaios. Notou-se que houve freqüentes oscilações na constituição granulométrica e índice de plasticidade, o que, ao longo do trabalho, foi justificado por reações de troca catiônica. Osula (1996) supõe que as mudanças nas propriedades dos solos ocorrem até que o processo de aglomeração cesse. No entanto, é esperado que essas alterações reduzam-se com o período de tempo, provavelmente de forma exponencial. Acredita-se que, apesar das reações de troca acontecerem instantaneamente, ocasionando quedas nos valores de I_p com os teores de estabilizantes, nos tempos entre mistura e realização dos ensaios elas ainda estão se processando, não conferindo aos solos um comportamento definido. Entende-se que, também, o ponto de fixação de cal (LPF), relatado por Hilt e Davidson (1960) não foi presentemente alcançado, considerando-se as características mineralógicas dos solos estudados.

4 – CONCLUSÕES

Os baixos teores de cal e cimento utilizados nas misturas provocaram variações significativas, estatisticamente, na composição granulométrica do solo 1, destacando-se que o cimento foi mais efetivo, inclusive nos maiores tempos entre mistura e a realização dos ensaios. Para o solo 2, as variações não foram significativas, salientando-se, somente, a atuação do cimento nos períodos mais longos entre mistura e a realização dos ensaios.

Apesar de não ocorrerem variações significativas, estatisticamente, com o tempo entre mistura e realização dos ensaios, a incorporação da cal foi mais efetiva na queda instantânea da plasticidade dos solos. Por outro lado, nas misturas solo-cimento, ocorreram reações de troca catiônica, bem como de hidratação que ocasionaram maiores alterações na plasticidade, em tempos maiores entre mistura e ensaio. As análises químicas mostraram aumentos de pH, CTC e íons cálcio, que foram proporcionais aos teores de cal e cimento avaliados. A presença de íons cálcio aumentou a CTC dos solos que foram responsáveis pelas modificações nos valores de I_p , constituição granulométrica e pH dos solos. Cabe salientar que alterações químicas do solo 2 não foram suficientes para promover modificações significantes nas suas propriedades físicas.

Os dois solos avaliados apresentam potencialidade para compor camadas de pavimentos. O solo 1 apresentou melhorias na plasticidade quando modificado com baixos teores de cimento, o que pode favorecer sua aplicação no campo. Já o solo 2 consiste em um bom material para pavimentação em seu estado natural. A adição de cal não proporcionou melhorias na plasticidade do solo. No entanto, o cimento certamente viria a ser o melhor agente de modificação uma vez que proporciona melhor cimentação das partículas. Portanto, o cimento consistiu em um melhor agente modificador da plasticidade de ambos os solos, uma vez que as reações de hidratação e cimentação passaram a ser mais efetivas que as reações de floculação proporcionada pela cal.

Ainda, com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que os tempos entre mistura e realização dos ensaios avaliados nesse trabalho não foram suficientes para se obter um tempo ótimo entre a realização da mistura e a compactação do solo tratado com cal. Pode-se concluir que a compactação pode ser efetuada até 8 horas depois da mistura sem maiores prejuízos na compactação do solo modificado com cal. Já a utilização de baixos teores de cimento mostrou que entre os tempos

estabelecidos nesse trabalho, o maior tempo, 8 horas, mostrou diminuir mais significativamente os valores do I_p . Ainda, não se sabe o efeito de maiores tempos entre mistura e compactação. Cabe salientar, que estas análises foram realizadas com baixos teores dos estabilizantes. Misturas de cimento com maiores percentagens de estabilizantes podem vir a cimentar até 8 horas depois da mistura.

Outro aspecto relevante é que a homogeneização da mistura no campo passa a ser dificultada com a utilização de baixos teores dos estabilizantes, necessitando-se realizar um processo de mistura mais intenso nas aplicações de campo. Outro aspecto a se ressaltar é que o presente trabalho traz uma abordagem de análises de laboratório, antevendo-se ser necessário a execução de camadas experimentais no campo, para fins de validação prática dos resultados obtidos.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores vêm expressar os seus agradecimentos à FAPEMIG, pelo apoio financeiro ao presente projeto, através do Processo TEC APQ-0830-5.07/07, e pela concessão de bolsa de iniciação científica para o último autor, à CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor, bem como à Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foi realizado o presente trabalho.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiban, A.A. (1994). *A study of sand stabilization in eastern Saudi Arábia*. Engineering Geology, no. 38, pp. 65-79.
- Akoto, B. K. A.; Singh, G. (1981). *Some geotechnical properties of a Lime stabilized laterite containing a high proportion of aluminium oxide*. Engineering Geology, no. 34, pp. 185-199.
- Alcântara, M. A. M. (1995). *Estabilização química dos solos para fins rodoviários: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira-SP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, 91p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). *NBR 6457: solo: amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, RJ, 7 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). *NBR 7181/84: Solo – Análise granulométrica – Procedimento*. Rio de Janeiro, 13p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984b). *NBR 6459/84: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984c). *NBR 7180/84: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984d). *NBR 6508/84: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). *NBR 12253/90: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento*. Rio de Janeiro, 4p.
- Attoh-Okine, N. O. (1995). *Lime treatment of laterite soils and gravels – revisited*. Construction and Building Materials, v.9, no. 5, pp. 283-287.
- Banzatto, O. A.; Kronka, S. N. (1996). *Experimentação agrícola*. 4ª edição, FUNEP, Jaboticabal.

- Bell, F. G. (1996). *Lime stabilization of clay minerals and soils*. Engineering Geology, no. 42, pp. 223-237.
- Bell, F.G.; Coulthard, J.M. (1990). *Stabilization of clay soils with lime*. Mun. Engr. 7, pp.125-140.
- Bhattacharja, S.; Bhatta, J. I.; Todres, H. A. (2003). *Stabilization of clay soils by Portland cement or lime – a critical review of literature*. PCA R&D Serial N°2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 60p.
- Brady, N.C.; Weil, R.R. (1999). *The nature and properties of soils*. 12a edição, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 881 p.
- Castro, E.; Serafim Luis, A. (1974). *Solo-cal na pavimentação de estradas e aeródromos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, Memória no. 450, pp. 45-51.
- Cristelo, N.; Jalali, S. (2004). *Estabilização química de um solo residual de granito*. Geotecnia, no. 101, pp. 25-40.
- DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (2006). *Manual de pavimentação*. 3ª ed., Publicação IPR - 719, Rio de Janeiro, RJ: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviária (IPR), 274 p.
- Ferraz, R.L. (1994). *Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e Habitacionais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, 180p.
- Guimarães, J.E.P. (1971). *Estabilização de solos: nova e importante aplicação da cal, seus conceitos e suas vantagens*. Boletim no. 5, São Paulo, SP: ABPC, 67 p.
- Guimarães, J.E.P. (1997). *A Cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil*. 1ª edição. São Paulo: PINI, 99 p.
- Herrin, M.; Mitchell, H. (1961). *Lime-soil mixtures*. Highway Research Board Bulletin, Washington D. C., no. 304, pp. 99-121.
- Herzog, A.; Mitchell, J.K. (1963). *Reactions accompanying the stabilization of clay with cement*. Highway Research Record, Washington D.C, no. 36, pp. 146–171.
- Hilt, G.H.; Davidson, D.T. (1960). *Lime fixation in clayey soils*. Highway Research Record, Washington D. C., no. 262, pp. 20-32.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. (1973). *Soil stabilization principles and practice*. Swikey e Sans, New York, E.U.A, 374 p.
- Lima, D.C.; Machado, C.C.; Carvalho, C.A.B.; Silva, C.H.C.; Pereira, R.S.; Trindade, T.P.; Barbosa, P.S.A. (2003). *A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais*. 6º Simpósio Brasileiro sobre colheita e transporte florestal, Belo Horizonte, Minas Gerais. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pp. 69-117.
- Meurer, E.J. (2006). *Fundamentos de química dos solos*. 3ª edição, Porto Alegre, EVANGRAF, 285p.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Villibor, 213p.
- O' Flaherty, C. A. (1979). *Highway engineering*. London, Edward Arnold, v.2, 458p.

- Osinubi, K. J (2006). *Compactive delay effects on properties of lime-treated soil*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 18, no. 2, pp. 250-258.
- Osula, D.O.A. (1991). *Lime modification of problem laterite*. Engineering Geology, no. 30, pp. 141- 154.
- Osula, D.O.A. (1996). *A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite*. Engineering Geology, v. 42, no. 1, pp. 71-81.
- Pinto, C.S (1964). *Estudo da avaliação da capacidade de suporte de um solo pela adição de pequena quantidade de cal ou de cimento*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, São Paulo, SP, 41p.
- Portelinha, F. H. M.; Lima, D. C.; Carvalho, C. A. B; Fontes, M. P. F (2011). *Mineralogical mechanisms of strength improvement in cement modification*. Proceedings of 14th Pan-American CGS geotechnical conference. Toronto, Canada, 6p.
- Raij, B. van; Quaggio, J.A.; Cantarella, H.; Ferreira, M.E.; Lopes, A.S.; Bataglia, O.C. (1987). *Análise química de solo para fins de fertilidade*. Campinas, Fundação Cargill, 170p.
- Rico, A.; Del Castillo, H. (1977). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México, D.F.: Editorial Limusa S.A., v. 2, 643p.
- Rogers, C.D.F.; Glendinning, S. (2000). *Lime requirement for stabilization*. Transportation Research Board. 79th Annual Meeting. Washington, D.C.
- Sant'Ana, A.P. (2003). *Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto forno granulada moída para fins rodoviários*. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 71p.
- TRB – Transportation Research Board (1976). *State of the art - lime stabilization: reactions, properties, design, construction*. Report no. 180, Washington, DC, 31p.
- Trindade, T.P. (2006). *Caracterização tecnológica de solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em estradas e em obras geotécnicas de caráter ambiental*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 254p.