

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UM SOLO LATERÍTICO ARGILOSO ESTABILIZADO COM CIMENTO E BIOENZIMA

Ivonei Teixeira

Faculdade de Tecnologia
Universidade Estadual de Campinas

Cássio Eduardo Lima de Paiva

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas

Marcelo de Castro Takeda

Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de São Carlos

RESUMO

A estabilização química de solos pode permitir seu uso em camadas de pavimentos de materiais que em princípio não atendem a requisitos técnicos, tais como solos finos. Estes podem ser estabilizados quimicamente com cimento ou bioenzimas, sendo as últimas específicas para estes materiais, pois encontram elementos necessários para sua ação. Assim, estudou-se o comportamento de um solo laterítico argiloso estabilizado com cimento e bioenzima, avaliando-se o comportamento mecânico, a partir da resistência à compressão simples, do solo puro e do solo estabilizado. Avaliaram-se os ganhos devido ao aumento dos teores de estabilizantes e do período de cura, bem como do efeito da água sobre misturas. Verificou-se que o aumento do tempo de cura e do teor de cimento produz aumento da resistência das misturas. O aumento do teor de bioenzima resulta em aumento da resistência, contudo, o período de cura não é significativo para explicar os aumentos de resistência.

ABSTRACT

Soil stabilization may allow the use in pavement layers of materials that would not meet technical requirements, such as fine soils. These can be chemically stabilized with cement or bioenzimas, the latter specific to these materials as are necessary elements for its action. Thus, we studied the behavior of a lateritic soil stabilized with cement and clay bioenzima, evaluating the mechanical behavior, from the compressive strength, the pure soil and soil stabilized. We assessed the gains due to increased levels of stabilizers and curing period, and the effect on water mixtures. It was found that increasing the curing time and content of cement produces increased resistance of mixtures. The enhanced content of bioenzima results in increased resistance, however, the curing period is not significant to explain the increases in resistance.

1. INTRODUÇÃO

Diante das dificuldades de obtenção de materiais granulares para a utilização como camadas estruturais de pavimento, tornou-se inevitável a tentativa de utilização de solos finos locais, e é de conhecimento que alguns destes solos devido ao ambiente de clima tropical e intensa percolação de água, sofrem um processo de laterização e lixiviação. De acordo com Nogami e Villibor (1995), em função deste processo, a fração argilosa do solo passa a ser constituída principalmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, tornando-se mais estável a presença de água. Assim, a metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical) classifica os solos como lateríticos e não-lateríticos.

A utilização de solos lateríticos como material de base e sub-base em rodovias no Brasil vindo sendo foco de estudos há várias décadas e também já difundida em algumas regiões a utilização deste tipo de material como camada para estradas de baixo volume de tráfego. Mesmo solos com comportamento laterítico, em sua condição natural, podem não apresentar requisitos para a utilização como material para compor camadas mais nobres do pavimento; a alternativa para viabilizar o seu uso é a técnica de estabilização, que pode ser realizada de diversas formas sendo a adição de aglutinantes como o cimento e aditivos químicos uma técnica a ser considerada e também o foco deste trabalho.

A mistura solo-cimento é o resultado de um produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de métodos de dosagem. O processo de melhora das qualidades dessa mistura ocorre pelo processo de cimentação com o aumento do tempo de cura, conferindo ganho de coesão, tendo como resultado final materiais com características superiores quando comparados aos materiais originais como capacidade de suporte a esforços de compressão e tração, redução de compressibilidade e permeabilidade (Bechara *et al*, 2010).

Segundo Bandeira *et al* (2008) é comum no Estado de São Paulo a utilização de base de solo arenoso fino laterítico (SAFL) para estradas de baixo volume de tráfego ou de base de solo cimento quando o tráfego for da ordem de 10^7 de solicitações do eixo padrão. Neste mesmo trabalho os autores citam que já foram realizados mais de dez mil quilômetros de estradas usando bases de solo laterítico em seu estado natural ou estabilizado com cimento e que mesmo após 30 anos, muitas dessas estradas ainda estão em excelentes condições.

Na literatura técnica e científica atual, pode-se constatar o esforço de entender o comportamento desses solos quanto as suas propriedades naturais ou em relação à sua estabilização química, sendo assim uma alternativa de melhoramento das características de resistência e deformabilidade, ampliando seu uso em obras geotécnicas em geral (Delgado *et al* 2005).

A experiência brasileira na utilização de solos finos concentra-se em solos do tipo arenosos finos lateríticos (SAFL), inclusive a norma de dosagem para solo-cimento NBR 12253 (1992) requer que o material se encaixe dentro de classificações de materiais granulares como A-1, A-2, A-3 e A-4. Outra parcela dos solos finos locais tem características diferentes dessas citadas, pois possuem grande quantidade de silte e argila de forma que, segundo as classificações tradicionais, os desqualificam para uso em pavimentação.

Para este tipo de material vale também a tentativa de estabilização com cimento ou a aplicação de outros estabilizantes. Conforme Brazetti e Domingues (1998a), a estabilização química tem como objetivo melhorar as propriedades de engenharia do solo mesmo em contato com a umidade melhorando as interações entre as partículas de solo e as moléculas de água, de maneira que seu comportamento não seja afetado.

A utilização de compostos orgânicos também conhecidos como aditivos ou estabilizantes orgânicos tais como as bioenzimas, vem sendo alvo de pesquisas, uma vez que esses produtos têm sua ação direcionada a materiais com grande quantidade de partículas finas (silte e argila) melhorando assim seu comportamento à presença de água.

As bioenzimas são substâncias químicas, orgânicas, líquidas e concentradas, com uso cada vez mais frequente na estabilização de agregados e materiais terrosos para aplicação na construção rodoviária e em outras áreas da pavimentação (Brazetti e Murphy, 2000).

De acordo com Brazetti e Domingues (1998b), num aditivo à base de enzimas necessita-se de uma alta porcentagem de argila, pois estes finos contem húmus que é a fonte de matéria orgânica para a ação das enzimas. Já nas bioenzimas soma-se às proteínas da enzima uma população de microorganismos capazes de produzir componentes orgânicos necessários às reações enzima-argilomineral. Portanto a utilização desse tipo de aditivo se torna mais eficaz

em solos que a princípio não teriam características ideais para serem utilizados

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico, a partir do ensaio de compressão simples, de um solo laterítico argiloso estabilizado com cimento e com uma bioenzima, ambos nas condições com e sem imersão prévia à ruptura, possibilitando avaliar o efeito da água sobre essas misturas.

Cabe ressaltar que para as misturas solo bioenzima foram avaliados também o seu efeito no comportamento mecânico medido através do índice de Suporte Califórnia para as situações com e sem imersão prévia a ruptura e também através de ensaios triaxiais cíclicos. Os resultados e discussões podem ser encontrados em Teixeira *et al* (2010a e 2010b) respectivamente.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1. Solo estudado

O solo estudado foi coletado no campus I da Unicamp – Limeira – SP, sendo este um material característico na região. Em laboratório o solo foi preparado para posterior realização dos ensaios de caracterização e compactação. Os ensaios de limites de consistência indicaram, respectivamente, 41% e 31%, e IP de 10%. O solo foi classificado como A-5 e ML, segundo as classificações HRB e unificada. Pela classificação MCT o solo é laterítico argiloso (LG'), com parâmetros $c' = 2,00$ e $e' = 1,0$.

A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica do solo estudado. Observa-se que o material possui aproximadamente 23% de areia, 22% de silte e 55% de argila, podendo ser classificado como argila areno-siltosa.

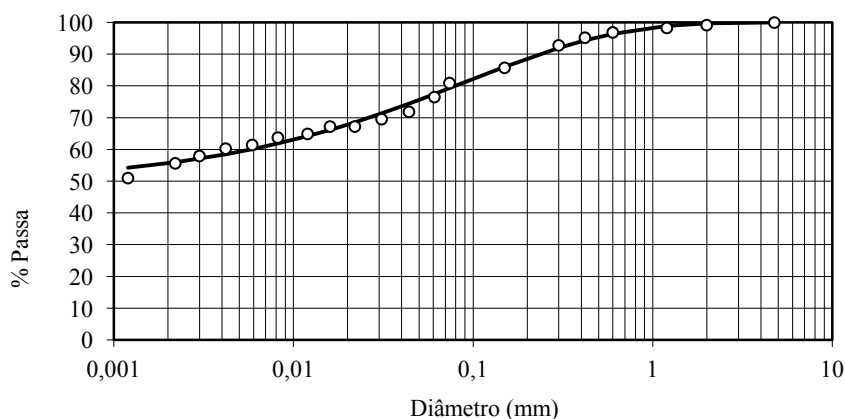


Figura 1. Distribuição granulométrica do solo estudado

3.2. Aditivo

Segundo Silva (2007) o aditivo estudado é um material composto basicamente por extrato fermentado de melaço de cana, sulfatantes não iônicos, potássio como clorido, alumínio como sulfato e cálcio como clorido, possuindo a finalidade de melhorar a trabalhabilidade e as características do solo. Conforme informações do fabricante, o produto seria capaz de promover o colapso dos materiais orgânicos do solo alterando suas propriedades físicas e químicas.

De acordo com o fabricante, o aditivo pode ser aplicado em solos não granulares, de

partículas finas coesivas, com 15 a 65% passando na peneira nº 200 (0,075mm), sendo que o solo objeto desse estudo possui aproximadamente 80% dos grãos passando na referida peneira conforme Figura 1, estando fora do intervalo indicado, contudo atende aos demais requisitos quanto aos limites de consistência e índice de plasticidade.

3.3. Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi do tipo CII-E-32 por ser de fácil aquisição comercial. Conforme estabelecido pela norma brasileira, este tipo de cimento é composto de 56 a 94% de clínquer + sulfatos de cálcio, de 6 a 34% de escória granulada de alto forno e de 0 a 10% de material carbonático. Esses valores expressos em porcentagem em massa.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Ensaios de Compactação

Foram realizados os ensaios com o solo puro nas três energias de compactação, com o solo mais a adição de cimento nas energias normal e intermediária e finalmente o solo mais bioenzima na energia intermediária. As dosagens de cimento utilizadas foram de 1 até 10% com variação de 1% e um teor adicional de 15%, contudo serão apresentados somente os resultados dos teores de 5, 10 e 15%.

Os teores de bioenzima utilizadas foram de 0,4, 0,5 e 0,6 ml/10 kg de solo segundo recomendação inicial do fabricante e adicionalmente, considerou-se um teor de bioenzima de 0,8 ml/10 kg de solo para avaliar o efeito de maiores quantidades no comportamento mecânico do solo. Para a aplicação do aditivo, este foi misturado à água utilizada para o umedecimento do solo.

4.2. Ensaios de Compressão Simples (RCS)

Para este ensaio, foram compactados três corpos de prova nas dimensões de 5 x 10 cm para o material puro, com a adição de cimento nas energias normal e intermediária e para as misturas solo-bioenzima na energia intermediária, todos na umidade ótima e massa específica aparente seca máxima e ensaiados com imersão prévia em água por 4 horas e sem imersão.

Assim, os valores apresentados de RCS são resultado da média de pelo menos dois ensaios. Para avaliar o efeito do tempo de cura os corpos de prova foram ensaiados com 07, 14 e 28 dias para as mistura de solo-cimento e com 07, 14, 28 e 56 dias para as misturas solo-bioenzima. A inclusão de um período de cura maior para as misturas com bioenzima teve por objetivo avaliar o efeito da estabilização em períodos mais longos, tendo em vista este comportamento não estar tão bem definido quanto o de materiais estabilizados com cimento. Durante o procedimento de cura os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida com umidade e temperatura controladas.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Ensaio de Compactação (Proctor)

A Tabela 1 apresenta os valores ρ_{dmax} e w_o para as condições avaliadas. Para ilustrar o comportamento das misturas são apresentadas as curvas de compactação para o solo puro com a variação da energia de compactação (Figura 2), para o solo com diferentes teores de bioenzima na energia intermediária (Figura 3) e as para o solo com a adição de cimento para as energias normal e intermediária (Figuras 4 e 5, respectivamente).

Tabela 1 – Valores de Massa Específica e Umidade Ótima

Solo-cimento						Solo-Bioenzima		
En. Normal			En. Intermediária			En. Intermediária		
Cimento %	w _o (%)	ρ _{dmax} (g/cm ³)	Cimento %	w _o (%)	ρ _{dmax} (g/cm ³)	Bioenzima (ml/10 kg solo)	w _o (%)	ρ _{dmax} (g/cm ³)
Puro	23,4	1,592	Puro	21,9	1,665	Puro	21,9	1,665
5	25,6	1,526	5	21,5	1,657	0,4	23,0	1,617
10	23,7	1,554	10	20,6	1,674	0,5	22,5	1,615
15	23,2	1,568	15	22,8	1,646	0,6	22,0	1,617
						0,8	21,9	1,617

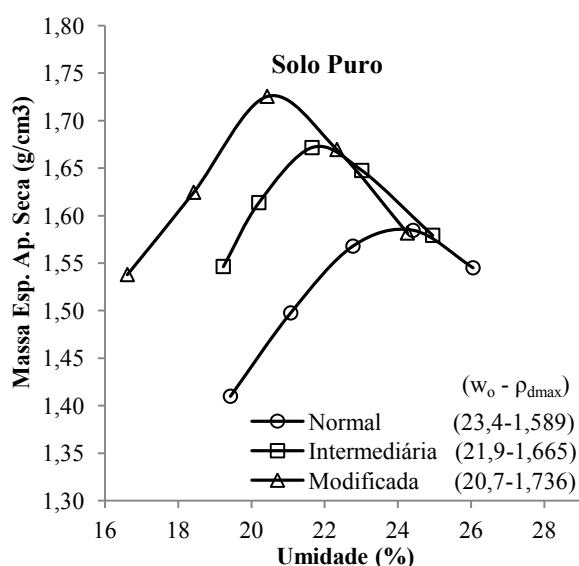


Figura 2. Variação da energia de compactação

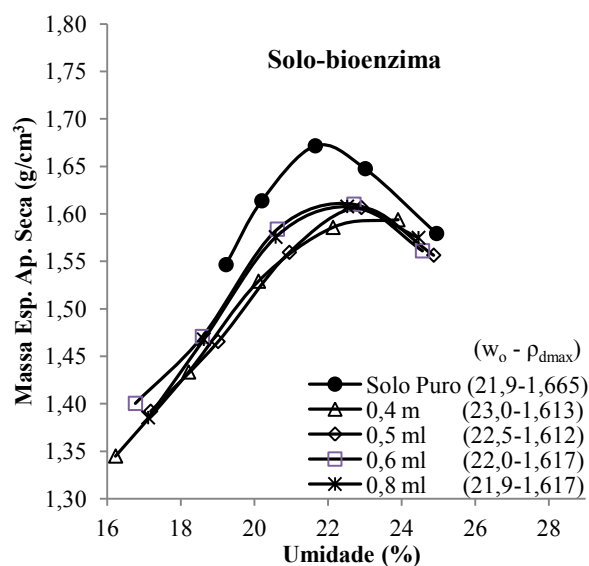


Figura 3. Variação do teor de bioenzima – En. Intermediária

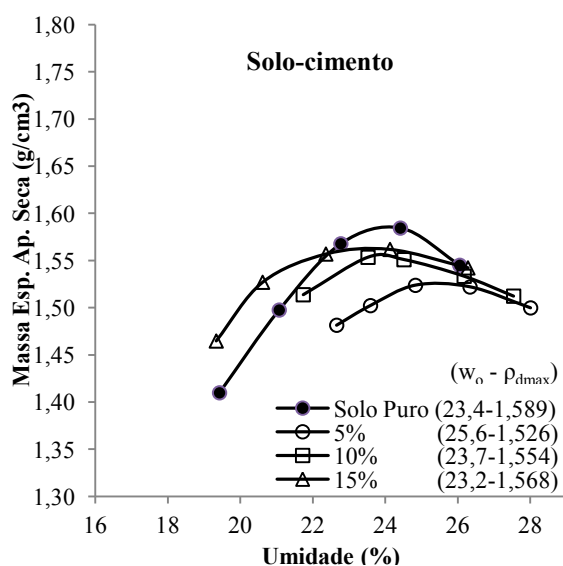


Figura 4. Variação do teor de cimento – En. Normal

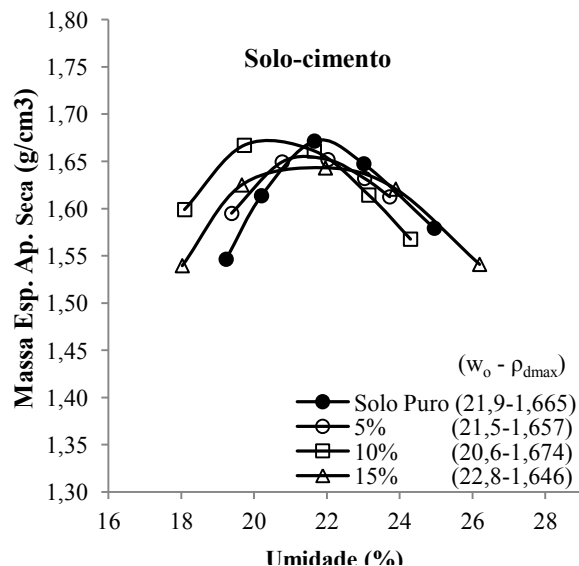


Figura 5. Variação do teor de cimento – En. Intermediária

Analisando-se a Figura 2, observa-se que, conforme esperado, houve a redução da w_o e o aumento da ρ_{dmax} com o aumento da energia de compactação. Verifica-se na Figura 3, que a adição de teores crescentes de bioenzima produz uma redução da w_o e uma tendência de aumento da ρ_{dmax} . Contudo, se comparado ao solo puro, há um aumento da w_o para os menores teores de bioenzima reduzindo-se para os maiores teores a valores semelhantes ao utilizado para comparação. Com relação à ρ_{dmax} , a adição de bioenzima produziu a sua redução quando comparados ao solo puro para todos os teores de enzima (Teixeira *et al* 2010b).

Observando a Figura 4, pode-se notar que as misturas de solo-cimento na energia normal sofreram uma redução da ρ_{dmax} e aumento da w_o em relação ao solo puro, porém tendo comportamento inverso à medida que a quantidade de cimento foi aumentada. Na Figura 5, utilizando energia intermediária, o comportamento das misturas não seguiu o mesmo padrão, sendo que para algumas misturas os valores tanto de w_o quanto de ρ_{dmax} aumentaram e para outras diminuíram em relação ao material puro não sendo possível assim justificar um padrão de comportamento.

5.2. Ensaios Compressão Simples

Os ensaios permitiram avaliar o comportamento do solo estabilizado com cimento e com a adição de uma bioenzima, ambos nas situações de imersão prévia à ruptura e sem a imersão. Os resultados de RCS para o material puro e para as misturas de solo cimento nas energias normal e intermediária com e sem imersão prévia à ruptura são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Tabela valores RCS para misturas de solo-cimento

Sem Imersão						Com Imersão					
En. Normal			En. Intermediária			En. Normal			En. Intermediária		
Cimento %	Idade (dias)	RCS (MPa)	Cimento %	Idade (dias)	RCS (MPa)	Cimento %	Idade (dias)	RCS (MPa)	Cimento %	Idade (dias)	RCS (MPa)
0	0	0,80	0	0	1,18	0	0	-	0	0	-
5	7	0,52	5	7	1,81	5	7	0,40	5	7	1,00
10	7	1,97	10	7	3,12	10	7	1,54	10	7	2,28
15	7	2,80	15	7	4,59	15	7	2,31	15	7	3,33
5	14	0,67	5	14	2,20	5	14	0,41	5	14	1,13
10	14	2,34	10	14	3,85	10	14	1,87	10	14	2,65
15	14	3,66	15	14	4,77	15	14	2,86	15	14	3,70
5	28	0,73	5	28	2,37	5	28	0,45	5	28	1,26
10	28	2,82	10	28	4,34	10	28	2,04	10	28	3,26
15	28	3,96	15	28	5,08	15	28	3,06	15	28	4,29

Para melhor visualização do comportamento do material são apresentadas as curvas de RCS para todas as situações de ensaio já descritas. As Figuras 6 e 7 correspondem aos resultados obtidos para a condição não imersa e as Figuras 8 e 9 para a condição imersa.

Analisando a Tabela 2 e as Figuras 6 a 9, verifica-se que há tendência de aumento da RCS com o aumento do teor de cimento e do tempo de cura, independente da condição de ensaio, fato este já observado em outros trabalhos relacionados a solo-cimento como (Parente *et al*, 2002). No caso de ensaios realizados sem imersão prévia, adotando como referência de comparação o valor da resistência determinada para o solo puro observa-se que, exceto para o teor de 5% de cimento na energia normal, a RCS do solo estabilizado é superior à do solo sem adição de cimento. No caso específico das referidas misturas com 5% de cimento na energia

normal que apresentaram resistência inferior ao do solo puro em todas as idades, as razões para tal fenômeno ainda estão sendo avaliadas, mas especula-se que sejam devidas à redução observada na ρ_{dmax} e o respectivo aumento da w_o . O mesmo tipo de comparação para a condição com imersão prévia não foi possível. O solo puro após o período de imersão não apresentava estabilidade para realização do ensaio.

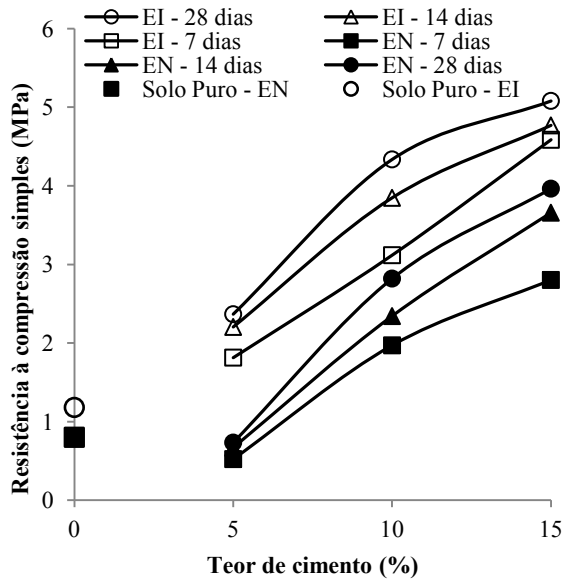


Figura 6. RCS para diferentes períodos de cura nas duas energias de compactação (sem imersão)

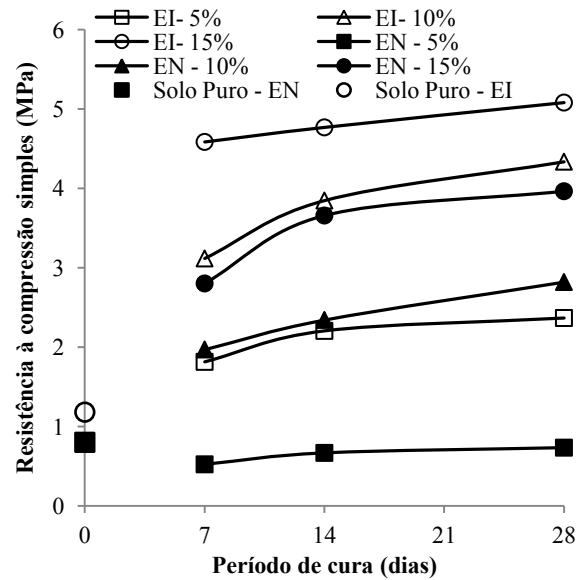


Figura 7. RCS para diferentes teores de cimento nas duas energias de compactação. (sem imersão)

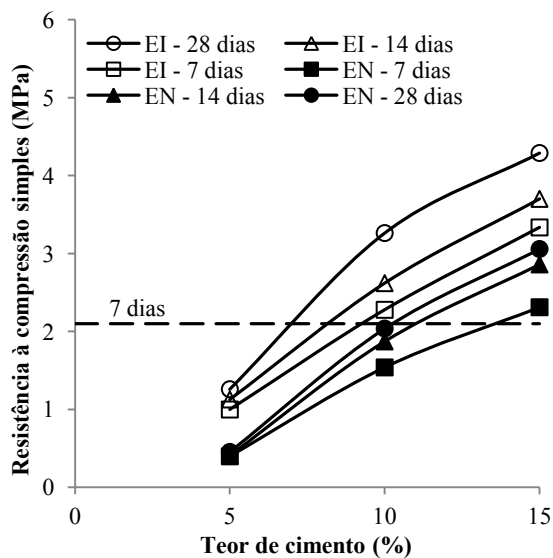


Figura 8. RCS para diferentes períodos de cura nas duas energias de compactação. (com imersão)

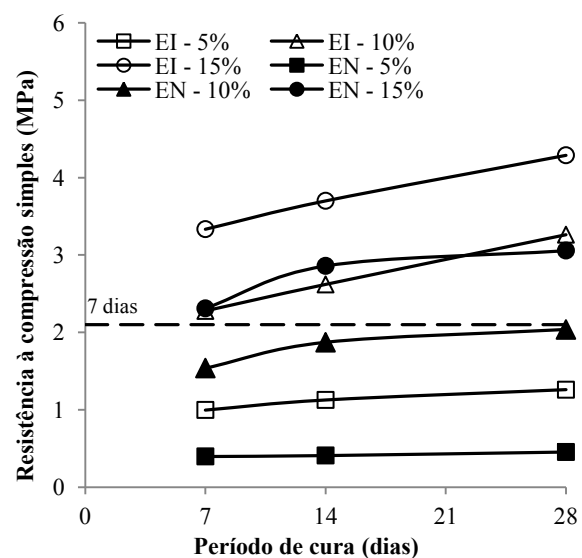


Figura 9. RCS para diferentes teores de cimento nas duas energias de compactação. (com imersão)

Quanto à redução da RCS observada na energia normal, para o teor de 5% de cimento em relação ao solo puro, foi em média, de aproximadamente 25%. Para a mesma energia verifica-se que os ganhos variaram de 146% a 395%. Para a energia intermediária observaram ganhos de resistência entre 53% e 330%.

Ainda analisando a Tabela 2 e as Figuras de 6 a 9, é possível avaliar a influência da energia de compactação e da condição de ensaio sobre os valores de RCS. Verifica-se que, em termos de valores médios para iguais teores de cimento, o aumento da energia de compactação da normal para intermediária produziu aumentos de resistência de aproximadamente 234%, 59% e 41%, respectivamente, para 5%, 10% e 15% de cimento. Avaliação semelhante para condição imersa mostrou aumentos de 169%, 50% e 38%. Observa-se assim a maior influência da energia de compactação para menores teores de cimento.

Para o solo puro o aumento da energia de compactação resultou em um acréscimo de 48% na RCS. As reduções observadas com a imersão em água na energia normal foram, em termos médios para iguais teores de cimento, de 33%, 23% e 21%, respectivamente para 5%, 10% e 15% de cimento. A mesma análise para a energia intermediária mostra reduções 47%, 28% e 22%. Verifica-se que as maiores perdas ocorrem para os menores teores de cimento, com a tendência de redução na medida em que se aumenta a proporção de estabilizante da mistura.

O ganho médio de resistência devido ao aumento do período de cura considerando os resultados dos três teores de cimento para as duas energias de compactação também foram avaliados. Os valores médios para o período entre 7 e 14 dias são de 24 e 15% para a condição não imersa e imersa respectivamente. Já para o período entre 14 e 28 dias os ganhos foram da ordem de 11 e 13% para a condição não imersa e imersa respectivamente. Nota-se, portanto, um incremento maior para o período inicial entre 7 e 14 dias de cura. Porém, o valor da RCS continua crescendo até os 28 dias.

Segundo a NBR 12253 (1992), o teor a ser adotado para fins de dosagem deve ser o menor teor com os quais a resistência média à compressão for igual ou superior a 2,1 MPa aos sete dias de idade para a situação com imersão prévia à ruptura, enquanto que para controle de obra ou outra destinação poderão ser estabelecidos outras idades. Com base neste valor de referência foi inserido nos gráficos apresentados nas Figuras 8 e 9 uma linha correspondente ao valor da RCS de 2,1 MPa para poder avaliar e identificar os teores que atendam a especificação de norma. Analisando os valores obtidos, pode-se observar que os teores que atingiram o valor mínimo de RCS estabelecido por norma foram a de 15% na energia normal e de 10 e 15% na energia intermediária.

Os resultados de RCS para as misturas de solo bioenzima na energia intermediária com e sem imersão prévia à ruptura são apresentadas na Tabela 3 e nas Figuras 10, 11, 12 e 13.

Tabela 3. Tabela valores RCS para misturas de solo bioenzima – En. Intermediária

RCS (MPa)									
Sem Imersão					Com Imersão				
Bioenzima (ml/10 kg de solo)	Idade (dias)				Bioenzima (ml/10 kg de solo)	Idade (dias)			
	7	14	28	56		7	14	28	56
0,4	0,61	0,86	0,88	0,91	0,4	0,21	0,21	0,22	0,20
0,5	0,84	1,00	1,01	0,87	0,5	0,19	0,19	0,20	0,19
0,6	0,99	1,36	1,43	1,67	0,6	0,19	0,19	0,22	0,20
0,8	1,83	1,80	1,86	2,00	0,8	0,17	0,20	0,19	0,19
Solo Puro - EI	Idade: 0 dias		1,18		Solo Puro - EI	Idade: 0 dias		-	

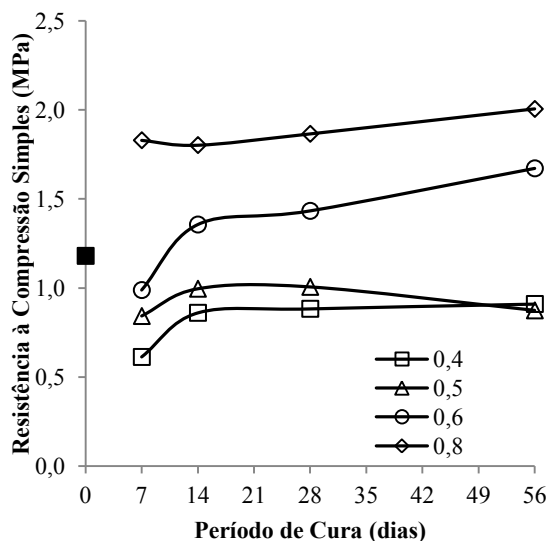


Figura 10. Variação da RCS em função do teor de bioenzima e períodos de cura – Situação Não Imersa (EI)

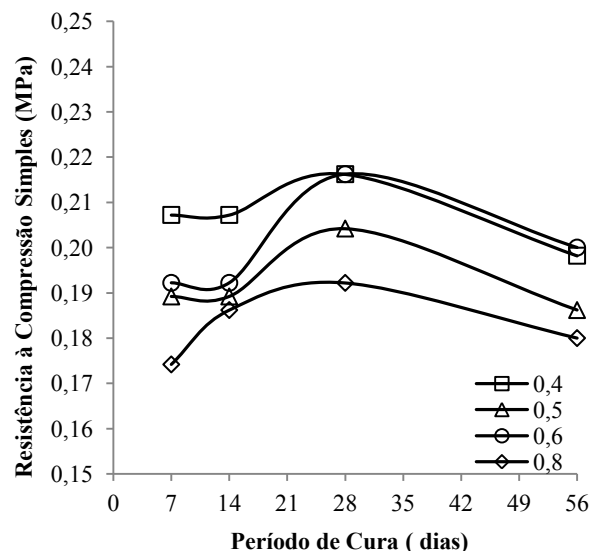


Figura 11. Variação da RCS em função do teor de bioenzima e períodos de cura – Situação Imersa (EI)

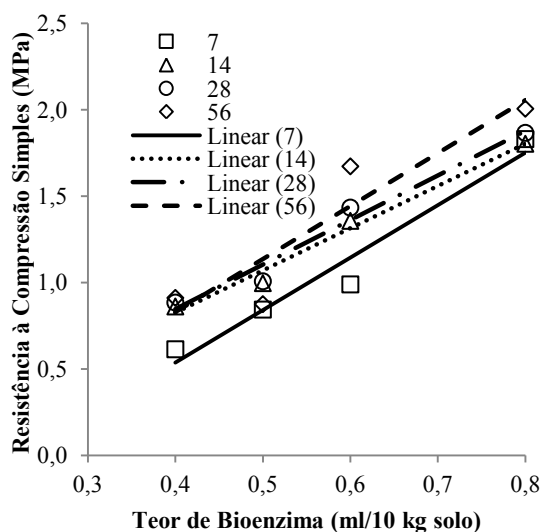


Figura 12. Variação da RCS em função do teor de bioenzima e períodos de cura – Situação Não Imersa (EI)

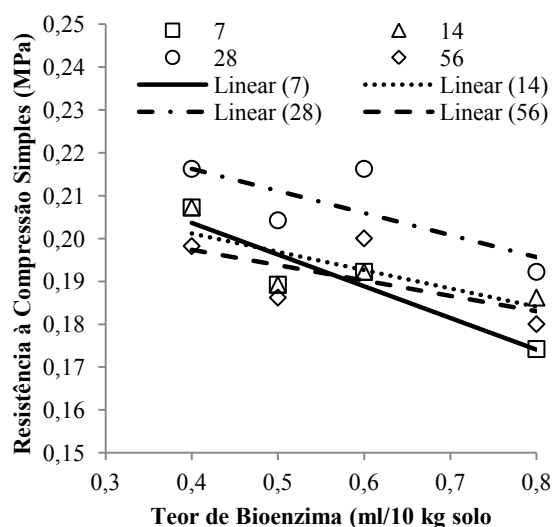


Figura 13. Variação da RCS em função do teor de bioenzima e períodos de cura – Situação Imersa (EI)

Analisando o conjunto de dados que produziram a Tabela 3, é possível dizer, com base em uma análise de variância ao nível de significância de 5%, que o grupo de ensaios realizados em condição sem imersão é estatisticamente diferente daquele ensaiado em condição imersa. Assim, é possível inferir que a imersão produz a redução nos valores de resistência à compressão simples eliminando os ganhos relacionados à estabilização.

Conforme se verifica na Tabela 3 e na Figura 10, para a condição sem imersão, comparando-se a RCS do solo puro com o do estabilizado, a adição de teores de bioenzima de 0,4 e 0,5 ml produziu uma redução nos valores de resistência para todos os períodos de cura. Apenas a partir de teores de 0,6 ml aos 14 dias de cura é que se observaram valores de resistência superiores ao do solo puro. Como não se dispõe da resistência do solo puro após imersão não é possível o mesmo tipo de comparação.

A aplicação de análise de variância com testes de comparação entre as médias mostra que, para os diferentes períodos de cura, não há diferença significativa entre as médias para um nível de significância de 5%. A mesma análise entre os diferentes teores de bioenzima mostra que há diferença entre as médias em pelo menos uma das comparações. Assim, existem indícios de que o tempo de cura não é significativo para o aumento da RCS do solo estabilizado (vide Figura 10).

Analizando a interação entre os fatores, verifica-se que, para iguais teores de bioenzima e nível de significância de 5%, a diferença entre as médias para os diferentes tempos de cura não é estatisticamente significativa. Situação contrária ao que se verifica quando são analisadas as médias obtidas para iguais tempos de cura e diferentes teores. Essa condição reforça a maior influência do teor de estabilizante nos valores de RCS (vide Figura 12).

Analizando os resultados da Tabela 3 e da Figura 12, na condição sem imersão o aumento da quantidade de bioenzima resultou em uma tendência de aumento da RCS para todos os períodos de cura avaliados. Avaliando para os mesmos teores de bioenzima conforme Tabela 3 e Figura 10, o aumento do período de cura resultou também no aumento da RCS, exceto para a condição de 0,5ml de bioenzima aos 56 dias.

Para a condição com imersão prévia apresentada na Tabela 3 e na Figura 11, é possível notar que de forma geral, não houve ganhos substanciais com algumas pequenas variações de RCS, nota-se que para todas as condições estudadas de dosagens e períodos de cura os valores mantiveram-se praticamente inalterados porém com uma tendência de diminuição conforme mostra a Figura 13.

Analizando isoladamente cada um dos fatores verifica-se que a média dos valores de resistência à compressão simples para as diferentes idades não é estatisticamente significativa ao nível de significância de 5%. Para os diferentes teores de estabilizante observa-se diferença significativa apenas entre as médias obtidas para os teores de 0,4 e 0,8 ml/10 kg de solo. Avaliando a interação entre os fatores, ao se comparar as médias para iguais tempos de cura e diferentes teores de estabilizante, ou o contrário, não há diferenças estatisticamente significativas entre as médias.

Dessa forma, pode-se especular se as diferenças observadas nos valores de resistência à compressão simples sejam decorrentes da própria variabilidade do ensaio. Ressalta-se, entretanto, que o uso do estabilizante em qualquer dos teores permitiu a realização do ensaio ao manter a integridade do corpo de prova após a imersão em água. Lembrando que não foi possível a realização do ensaio no solo puro após imersão em água.

A Tabela 4 mostra os ganhos e perdas de RCS em função das variáveis utilizadas na pesquisa. Observando os valores desta tabela é possível notar que para o aumento do teor de bioenzima na situação sem imersão, houve ganho maior de RCS para os teores de 0,6 e 0,8 ml. Para os períodos de cura estudados, os ganhos na condição sem imersão foram maiores para o período entre 7 e 14 dias sendo que os demais foram de pouca expressão. Como foi comentado anteriormente na condição com imersão houve variações com uma tendência de diminuição quando do aumento do teor de bioenzima e do tempo de cura.

Tabela 4. Variação do ganho/perda de RCS para o solo-bioenzima – En. Intermediária

Ganho médio devido ao aumento de bioenzima (média dos 4 períodos avaliados)			Ganho médio devido ao aumento do período de cura (média dos 4 teores avaliados)		
Incremento (ml/10 kg solo)	Sem Imersão	Com Imersão	Períodos (dias)	Sem Imersão	Com Imersão
	Ganho/Perda	Ganho/Perda		Ganho/Perda	Ganho/Perda
0,4 p/ 0,5	16%	-7%	07 p/ 14	24%	2%
0,5 p/ 0,6	47%	4%	14 p/ 28	3%	7%
0,6 p/ 0,8	42%	-8%	28 p/ 56	4%	-8%

Quando se avaliam os resultados de RCS obtidos para os dois tipos de aditivos utilizados nessa pesquisa segundo a mesma energia de compactação (intermediária), é possível observar que na situação sem imersão o valor máximo atingido para o solo-bioenzima (2,00 MPa) é cerca de apenas 10% maior que o valor mínimo atingido na mistura solo-cimento (1,81 MPa), já na condição com imersão o valor máximo para o solo-bioenzima (0,22 MPa) é cerca de 3,5 vezes menor que o menor valor atingido na mistura solo-cimento (1,00 MPa).

6. CONCLUSÕES

Para o solo estudado, a adição da bioenzima produziu, para as menores quantidades, um aumento no valor da umidade ótima se comparado ao solo puro. Com o aumento da quantidade de enzima houve uma diminuição do teor de umidade ótima a partir do máximo determinado. Independentemente da quantidade de bioenzima houve uma redução no valor da massa específica aparente seca máxima em relação ao material puro.

Nas misturas solo-cimento na energia normal, o padrão de comportamento foi semelhante ao das misturas com bioenzima, aumento da umidade ótima e redução da massa específica para o menor teor em relação ao solo puro e com o aumento dessa quantidade resultou na redução da umidade ótima e aumento da massa específica. Na energia intermediária não houve um padrão de comportamento como o observado para as outras situações.

Nos ensaios de compressão simples para as misturas solo-cimento, o aumento dos teores de cimento e também o aumento do período de cura resultou em valores crescentes de RCS para as duas energias de compactação nas situações com e sem imersão prévia. Para o aumento do período de cura, os ganhos foram maiores para o período entre 7 e 14 dias considerando os três teores, as duas energias de compactação e condição de ensaio utilizado. Para essas mesmas misturas, o aumento da energia de compactação para as duas condições de ensaio produziram ganhos, sendo maiores para o menor teor de cimento (5%).

Considerando as mesmas energias de compactação, o efeito da água produziu redução de RCS para todos os teores de cimento aplicados sendo que as maiores perdas observadas foi para o menor teor de cimento (5%) e à medida que essa quantidade foi aumentada as perdas de resistência foram diminuindo em relação ao primeiro. Com base no valor mínimo de resistência para fins de dosagem especificados por norma, os teores avaliados na pesquisa que atingiram esse valor foram de 15% na energia normal e 10 e 15% na energia intermediária, todos aos 7 dias de idade.

Para as misturas com bioenzima na condição não imersa o aumento do teor produziu aumento nos valores de RCS mais significativos do que para o aumento do período de cura. Já para a situação com imersão, os resultados de todos os teores e períodos de cura reduziram de forma geral, oscilando dentro de uma faixa muito estreita de valores não sendo significantes do

ponto de vista estatístico, mas mostrando uma tendência de diminuição, sendo assim é possível concluir que as misturas com bioenzima são mais sensíveis às variações de teores do que de tempo de cura.

E, finalmente, quando são comparados os resultados para os dois tipos de aditivos, verifica-se que as diferenças entre eles são significativas, sendo que o valor máximo obtido pela adição de bioenzima está próximo ao menor valor encontrado com a adição de cimento para a condição não imersa e, quando se trata da condição imersa, essa diferença é quase 3,5 vezes entre o menor valor com cimento e o maior valor com bioenzima, ou seja a água praticamente eliminou os ganhos da estabilização com bioenzima.

Ressalta-se que os resultados aqui apresentados são válidos para as condições e materiais analisados. É importante a ampliação dos estudos para outros tipos de solos e também uma investigação mais detalhada com os materiais utilizados nesta pesquisa com o intuito de ratificar os padrões de comportamento avaliados até então.

Os autores agradecem ao apoio institucional da UNICAMP através da sua Agencia para a Formação Profissional da Unicamp – AFPU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1992) NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Bandeira, A. A.; Merighi, J. V. e Fortes, R. M. (2008). Estudo da utilização de bases cimentadas em pistas de aeroportos. *Anais do 2º CONINFRA – Congresso de Infraestrutura de Transportes, São Paulo, 17p.*
- Bechara, M.F.; Furlan, A.P.; Gigante, A.C. e Fabbri, G.T.P. (2010). Propriedades mecânicas de misturas solos-cimento com solo laterítico e solo não-laterítico. In: *XXIV Anpet – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Salvador, 9p.*
- Brazetti, R. e Domingues, A. A. (1998a). Aditivos orgânicos para estabilização de solos. Metodologia e técnicas associadas para avaliação de compósitos organominerais - Espectometria no infravermelho. *Anais da 31ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, São Paulo, 22p.*
- Brazetti, R. e Domingues, A. A. (1998b). Aditivos orgânicos para estabilização de solos. Estudos evidenciando as interações entre materiais orgânicos e minerais. *Anais da 31ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, São Paulo, 16p.*
- Brazetti, R. e Murphy, S.R. (2000). Difusão generalizada do uso de bioenzimas na pavimentação. *Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Brasília, 11p.*
- Delgado, A.K.; Carvalho, J.C. e Farias, M.M.(2005). Influência da estabilização química no comportamento de solos finos compactados característicos do distrito federal. *Anais da 36ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Curitiba, n.49, 12p.*
- Nogami, J. S. e Villibor, D. F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. 213p. São Paulo, Villibor.
- Parente, E.B.; Parreira, A.B. e Soares, J.B.(2002). Avaliação do comportamento mecânico de um solo lateríticos e de outro não lateríticos estabilizados com cimento. In: *XVI Anpet - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 9p.*
- Silva, C.C. (2007). *Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos*. Curitiba, 2007. 157 p. Dissertação (mestrado em Construção Civil). Universidade Federal do Paraná.
- Teixeira, I.; Paiva, C.E.L. e Takeda, M.C. (2010a). Avaliação do efeito da adição de uma bioenzima no comportamento mecânico de um solo fino. *Anais do 4º CONINFRA – Congresso de Infraestrutura de Transportes, São Paulo, 13p.*
- Teixeira, I.; Paiva, C.E.L. e Takeda, M.C. (2010b). Estudo do comportamento resiliente de um solo laterítico argiloso estabilizado com uma bioenzima. In: *XXIV Anpet – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Salvador, 12p.*

Ivonei Teixeira (ivo@ft.unicamp.br); Cássio Eduardo Lima de Paiva (celpaiva@fec.unicamp.br); Marcelo de Castro Takeda (mctakeda@ufscar.br)